

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

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)

PAR
Alain MAILHOT
Samuel BOLDUC
Guillaume TALBOT
Pradeebane VAITTINADA

RAPPORT FINAL

MARS 2021



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

ISBN : 978-2-89146-979-1 (version électronique)

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

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE EXÉCUTIF	VII
REMERCIEMENTS	XVII
LISTE DES FIGURES	XIX
LISTE DES TABLEAUX.....	XXVII
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XXXI
CHAPITRE 1. INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2. MÉTHODE RATIONNELLE	3
2.1 La méthode rationnelle, 125 ans plus tard.....	3
2.2 Pourquoi utiliser la méthode rationnelle ?	4
2.3 Hypothèses de base de la méthode rationnelle	5
2.4 Interprétation simple de la méthode rationnelle.....	6
CHAPITRE 3. BASSINS-VERSANTS (BV) SOUS ÉTUDE	9
3.1 Sélection et localisation des BV sous étude	9
3.2 Caractéristiques physiographiques des BV sous étude.....	10
CHAPITRE 4. ESTIMATION DES DÉBITS MAXIMA ANNUELS	13
4.1 Analyse préliminaire des données brutes de débit.....	13
4.2 Extraction des débits maxima annuels (DMA) et analyses de tendances	13
4.3 Estimations des quantiles des DMA de diverses périodes de retour	14
4.4 Incertitudes sur les quantiles DMA estimés	15
CHAPITRE 5. TEMPS DE CONCENTRATION	17
5.1 Concept du temps de concentration.....	17
5.2 Estimation du temps de concentration	18
5.3 Extraction, caractérisation et sélection des hydrogrammes.....	20
5.4 Analyses des temps de montée des hydrogrammes retenus	23
5.4.1 Distributions des temps de montée	23
5.4.2 Variabilité des temps de montée médians	26
5.4.3 Asymétrie des distributions des temps de montée.....	27
5.5 Régression linéaire entre temps de montée et caractéristiques physiographiques.....	27

5.6 Comparaison des temps de montée médians aux temps de concentration estimés à partir des équations empiriques proposées.....	28
5.7 Développement d'une équation empirique du temps de concentration	32
5.8 Résumé et conclusion.....	32
CHAPITRE 6. ESTIMATION DES TEMPS DE CONCENTRATION PAR LA MÉTHODE DES Arbres DE RÉGRESSION.....	35
6.1 Arbres de régression obtenus	35
6.2 Analyse de l'arbre de régression retenu.....	39
6.3 Résumé et conclusion.....	42
CHAPITRE 7. RÉVISION DES COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT (CR) ..	45
7.1 Coefficients de ruissellement proposés dans la littérature.....	48
7.1.1 Milieu urbain	49
7.1.2 Milieu naturel	50
7.1.3 Lacs et milieux humides	50
7.1.4 Affleurement rocheux	51
7.2 Estimation des coefficients de ruissellement aux BV sous étude	51
7.3 Coefficient de ruissellement et période de retour	52
7.4 Corrélations entre les caractéristiques physiographiques et les CR	55
7.5 Révision de la table des CR en milieux ruraux.....	58
7.5.1 Approche S-1 : Estimation du CR à partir de la pente du bassin-versant.....	58
7.5.2 Approche S-2 : Première table simplifiée des valeurs de CR	59
7.5.3 Approche S-3 : Deuxième table simplifiée de valeurs de CR	62
7.5.4 Comparaison des approches d'estimation des CR proposées	64
7.6 Avantages et désavantages des approches d'estimation des CR proposées	66
7.6.1 Approche S-1	66
7.6.2 Approche S-2.....	68
7.6.3 Approche S-3.....	68
7.7 Résumé et conclusion.....	69
CHAPITRE 8. APPLICATION DE LA MÉTHODE RATIONNELLE (MÉRA) ET COMPARAISON AVEC LES QUANTILES DE DÉBITS OBSERVÉS	73
8.1 Comparaison des performances des différentes versions de la MÉRA	73
8.2 Application de la MÉRA à des bassins-versants de différentes superficies ...	77
8.2.1 Bassins-versants de 1 à 100 km ²	78
8.2.2 Bassins-versants de moins de 1 km ²	78
8.3 Estimation des débits de conception de périodes de retour 50 et 100 ans.....	82

8.4 Limites d'application et incertitudes	86
8.5 Résumé et conclusion.....	87
CHAPITRE 9. MODÉLISATION HYDROLOGIQUE.....	91
9.1 Modèle hydrologique retenu.....	92
9.2 Bassins-versants retenus pour la modélisation hydrologique	93
9.3 Calage du modèle hydrologique.....	93
9.4 Simulations hydrologiques en climat passé et futur	97
9.5 Résumé et conclusion.....	100
CHAPITRE 10. COURBES IDF EN CLIMAT FUTUR ET PRISE EN COMPTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LA CONCEPTION	103
10.1 Considérations générales.....	104
10.2 Revue et bilan des projections actuelles	105
10.2.1 Innocenti et al. (2019a).....	106
10.2.2 Cannon et Innocenti (2019)	109
10.2.3 Martel <i>et al.</i> (2020)	112
10.2.4 Bush et Lemmen (2019)	113
10.2.5 CSA (2019)	114
10.2.6 Simulations NA-CORDEX	118
10.2.7 Comparaison des résultats des différentes études	121
10.3 Majorations recommandées pour les courbes IDF en climat futur	123
10.4 Utilisation, limites et incertitudes des majorations proposées	127
10.5 Estimation des débits de conception en climat futur	129
CHAPITRE 11. APPROCHE RÉVISÉE DE LA MÉTHODE RATIONNELLE... 131	
11.1 Caractéristiques physiographiques nécessaires à l'application de la MÉRA	131
11.1.1 Longueur du cours d'eau principal	131
11.1.2 Occupation du territoire	133
11.1.3 Pente moyenne du BV.....	133
11.1.4 Pente du cours d'eau.....	133
11.2 Temps de concentration et intensité de précipitation	135
11.3 Coefficient de ruissellement.....	136
11.4 Débits de conception	136
CHAPITRE 12. BASSINS-VERSANTS INSTRUMENTÉS.....	139
12.1 Localisation des sites	139
12.2 Description des sites.....	140

12.2.1 Caractéristiques physiographiques	140
12.2.2 Occupation du territoire	141
12.2.3 Réseau hydrographique	143
12.3 Instrumentation des sites	143
12.4 Calendrier et bilan des campagnes de mesure	146
12.5 Mesure de débit et courbes de tarage.....	148
12.6 Résumé des campagnes de mesures	150
CHAPITRE 13. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	153
BIBLIOGRAPHIE	167

Sommaire exécutif

Le projet *Révision des critères de conception des ponceaux pour des bassins de drainage de 25 km² et moins dans un contexte de changements climatiques - Phase II (CC06.2)* a pour principal objectif de revoir et mettre à jour la méthode rationnelle (MÉRA) telle que décrite dans le *Manuel de conception des ponceaux (MCP)* et actuellement utilisée par le Ministère des Transports (MTQ) afin qu'elle soit mieux adaptée aux bassins-versants (BV) du Québec méridional. Cinq objectifs spécifiques sont visés : 1) poursuivre le programme de suivi de quatre BV instrumentés dans le cadre de la Phase I du projet; 2) développer une nouvelle approche d'estimation des temps de concentration mieux adaptée aux BV du Québec; 3) revoir la procédure d'estimation des coefficients de ruissellement décrite dans le MCP; 4) mettre en place un modèle hydrologique sur des petits BV du Québec et simuler les conditions hydrologiques en climat actuel et futur; 5) formuler des recommandations sur les majorations à appliquer aux courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et sur la prise en compte des changements climatiques (CC) dans la conception.

Bassins versants instrumentés

Quatre BV avaient été instrumentés et fait l'objet d'un suivi lors de la Phase I du projet. L'instauration de ce programme de suivi avait pour principal objectif de colliger des données de débits et des données météorologiques (pluies et températures) afin de mieux comprendre l'hydrologie des petits BV comportant une fraction importante de milieux humides. Deux de ces BV sont situés sur la Côte-Nord, un troisième dans la partie amont du BV de la rivière La Chevrotière située dans la région de la Capitale-Nationale, et le quatrième site se trouve à la tête du BV du ruisseau Rouge dans la région administrative de Saguenay – Lac-Saint-Jean. Les superficies de ces BV vont de 2.6 km² à 26.8 km² et sont majoritairement forestiers avec une présence de milieux humides relativement importante (allant de 3% à près de 27% selon le BV).

Ces sites ont été instrumentés (pluviomètre, capteur d'humidité du sol, thermomètre, enregistreur de données et limnimètre) et ont fait l'objet d'un suivi (visite mensuelle de mai à novembre) de 2015 à 2020. Les courbes de tarage ont été construites à deux des sites alors que les données de stations hydrométriques opérées par la Direction de l'expertise hydrique (DEH) ont été utilisées pour les autres sites. Des données de débits, d'humidité des sols et de précipitations de très bonne qualité ont ainsi été colligées sur l'ensemble des sites sur une période de 5 ans. Ces données n'ont malheureusement pas été exploitées à leur juste mesure dans le cadre de ce projet mais pourront très certainement être ultérieurement analysées afin de mieux comprendre l'hydrologie de ce type de BV. Il est recommandé que les campagnes de mesures se poursuivent dans les années à venir afin de constituer de longues séries permettant une investigation de conditions hydrologiques variées (étiage et crue).

Estimation des temps de concentration

Le temps de concentration (TC) est un concept hydrologique important bien que l'évaluation de sa valeur pour un BV donné reste difficile. Le TC peut être vu comme un

temps 'caractéristique' de la réponse hydrologique d'un BV pouvant être estimé à partir de ses caractéristiques physiographiques.

Les données de débits sous-journalières, souvent aux 15 minutes, de 93 BV de moins de 100 km² situés au Québec, en Ontario et dans certains états du nord-est des États-Unis ont été colligées. Dix années ou plus de débits mesurés (avec moins de 20% de données non valides ou manquantes pour la période du 1er juin au 31 octobre) sont disponibles pour chacun de ces BV. Le nombre d'années de débits mesurés disponibles varie de 10 ans à 46 ans pour une moyenne d'environ 20 ans.

Les caractéristiques physiographiques suivantes ont été estimées : superficie, pente moyenne du BV, longueur du cours d'eau principal, pente moyenne du cours d'eau principal, longueur totale du réseau hydrographique, densité de drainage, forme (rapport entre la longueur du BV et la superficie), occupation du territoire (forestier, agricole, urbain, lacs et milieux humides), classification hydrologique des sols, connectivité des lacs et milieux humides (proportion de la longueur du réseau hydrographique qui transite directement par les lacs et milieux humides), séparation du réseau hydrographique (rapport entre la superficie des BV en amont de points le long du cours principal situés à une certaine distance de l'exutoire et la surface totale du BV), position des lacs et milieux humides.

Une majorité des BV est de type forestier et 16 BV ont une occupation agricole supérieure à 60 %. Plusieurs BV présentent une occupation urbaine, ne dépassant toutefois pas 17 %. Enfin, l'occupation en lacs et milieux humides peut atteindre jusqu'à 30 % et est supérieure à 10 % pour 30 BV.

Plusieurs méthodes d'estimation du TC ont été proposées dans la littérature. Le temps de montée (TM), défini comme la durée séparant le début des hydrogrammes du temps où survient le débit de pointe, a été utilisé pour estimer le TC. Les hydrogrammes ont été extraits des séries de débits et classés en fonction de leur structure (hydrogramme avec un ou plusieurs débits de pointe). Seuls les hydrogrammes à structure simple ont été retenus. La médiane des TM des hydrogrammes associés aux débits de pointe les plus importants a été assimilée au TC de chacun des 93 BV.

Les TM médians ont d'abord été comparés aux TC estimés à partir de 13 équations empiriques de la littérature. Aucune de ces équations ne permet une estimation adéquate du TM médian aux 93 BV sous étude. En ce qui concerne plus spécifiquement les équations FAA et Williams proposées dans le MCP, elles sous-estiment quasi-systématiquement, et parfois de façon importante, les TM médians aux BV. Ces équations ont été développées à partir de BV de caractéristiques physiographiques très différentes des BV du Québec qui se trouvent dans des régions climatiques aussi très différentes. La transposabilité de ces équations empiriques à d'autres BV, et notamment à ceux du Québec, est discutable et demeure problématique comme ces résultats le montrent.

Certaines de ces équations du TC ont été reprises et ajustées pour reproduire au mieux les TM médians des BV sous étude. Les résultats montrent que, même après ajustement des paramètres, les écarts entre TC estimés et observés à ces BV restent importants.

Des régressions linéaires entre TM médians et les caractéristiques physiographiques a permis de montrer que la fraction de lacs et milieux humides est le principal facteur influençant la réponse hydrologique des BV. Cette caractéristique n'apparaît d'ailleurs pas dans aucune des équations empiriques ayant été testées. Le rapport entre la longueur du cours d'eau et sa pente ($L_C/\sqrt{S_C}$), équivalent à un temps de propagation de l'écoulement le long du cours d'eau principal, se classe deuxième. Le pouvoir explicatif des autres caractéristiques demeure faible.

Ces résultats suggèrent que les BV avec une forte présence de lacs et milieux humides présentent des TM médians plus longs. Ceci n'exclut toutefois pas que certains BV avec peu de lacs et milieux humides ont des TM médians très longs et que, vice-versa, des BV avec beaucoup de lacs et milieux humides présentent des TC anormalement courts. Un constat similaire s'applique au rapport $L_C/\sqrt{S_C}$.

Un examen plus minutieux confirme que, dans beaucoup de cas, la réponse hydrologique est conditionnée par certaines caractéristiques physiographiques spécifiques aux BV sous examen. Il est dès lors difficile d'identifier un ou quelques facteurs physiographiques qui pourraient expliquer les TM pour l'ensemble des BV sous étude. La diversité et l'hétérogénéité physiographique des BV (pente, présence de milieux humides, occupation du territoire, etc.), représentatives des BV du Québec méridional, et la complexité de la réponse hydrologique, montrent que plusieurs facteurs peuvent conditionner le TC.

Aucune corrélation significative entre le TC et la superficie des BV n'est observée. Deux facteurs expliquent ce résultat apparemment contre-intuitif et contraire à la littérature : 1) les BV des études publiées couvrent souvent des gammes de superficies très larges (p. ex. de 1 km² à plusieurs milliers de km²); 2) les BV analysés présentent souvent des caractéristiques similaires (p. ex. pente ou occupation du territoire très similaire). Ces conditions font en sorte que la superficie devient un facteur clef conditionnant le TC. A *contrario*, les 93 BV sous étude sont tous de moins de 100 km² et présentent des caractéristiques physiographiques très hétérogènes.

La méthode par arbre de classification ou par arbre de régression (*classification and regression trees*) a été utilisée pour identifier les facteurs clés à considérer pour l'estimation du TC. Cette approche, simple et facile à utiliser, permet une classification systématique des facteurs explicatifs clefs.

L'application de cette approche aux 93 BV sous étude résulte en un arbre (appelé arbre D-4) de deux niveaux (voir Figure plus bas). Le premier niveau est associé à la fraction de lacs et milieux humides (LMH) et deux groupes sont définis (LMH ≥ 10% ou LMH < 10%) alors que le deuxième niveau est associé au rapport $L_C/\sqrt{S_C}$. où chaque groupe du premier niveau est subdivisé en deux groupes. Cet arbre comprend au final quatre groupes, désignés par G-1 (LMH < 10% et $L_C/\sqrt{S_C} < 21$ km), G-2 (LMH < 10% et $L_C/\sqrt{S_C} \geq 21$ km), G-3 (LMH ≥ 10% et $L_C/\sqrt{S_C} < 33$ km) et G-4 (LMH ≥ 10% $L_C/\sqrt{S_C} \geq 33$ km). Le TC attribué à chacun des quatre groupes correspond au temps moyen des TM médians

des BV de ce groupe, respectivement 9 heures (G-1), 13 heures (G-2), 17 heures (G-3) et 28 heures (G-4).

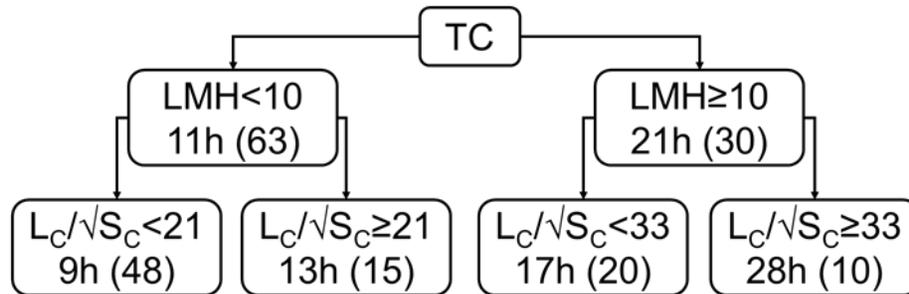


Figure – Arbre D-4 recommandé pour l’estimation du TC. La fraction de lacs et milieux humides et de la valeur de $L_c/\sqrt{S_c}$ (L_c : longueur du cours d’eau principal; S_c : pente moyenne du cours d’eau) sont les facteurs physiographiques considérés. Le TC correspondant à chaque groupe est indiqué en bas à gauche et le nombre de BV de chaque groupe est indiqué entre parenthèses.

Les groupes G-1 à G-4 représentent des BV très différents. Le groupe G-1 correspond aux BV avec peu de LMH et un temps de parcours plus court, favorisant des TC courts. À l’autre extrême, les BV du groupe G-4 comprennent beaucoup de LMH et les temps de parcours sont plus longs, résultant en des TC très longs. Les groupes G-2 et G-3 sont intermédiaires avec, pour le groupe G-2 peu de LMH mais de longs temps de parcours et, pour le groupe G-3 beaucoup de LMH mais des temps de parcours courts.

L’arbre D-4 est recommandé pour estimer les TC des BV du Québec méridional. L’utilisation de cet arbre exige toutefois de s’assurer que le BV analysé ne se distingue pas de façon importante des 93 BV utilisés pour le construire. Ainsi il faudra s’assurer que : 1) sa superficie est comprise entre 1 et 100 km²; 2) sa pente moyenne est inférieure à 25%; 3) son occupation urbaine est inférieure à 20%; 4) son pourcentage de LMH est inférieur à 30%. Ces prescriptions valent de façon plus générale pour l’application de la version proposée de la MÉRA.

Les valeurs estimées de TC à certains BV sous étude s’écartent de manière importante des valeurs estimées à partir de l’arbre D-4. Un examen minutieux de ces cas confirme que la réponse hydrologique de ces BV est souvent conditionnée par certaines caractéristiques physiographiques (p. ex. séparation du BV en deux sous-bassins, avec des caractéristiques physiographiques différentes, près de l’exutoire) que l’arbre D-4 ne prend pas en compte. Les hydrogrammes de plusieurs BV montrent aussi des structures complexes avec plusieurs pointes de débits, certaines plus rapides associées à des zones urbaines ou agricoles du BV et d’autres plus tardifs associées à des zones forestières.

L’arbre D-4 ne permet pas d’attribuer de TC à des BV de moins de 1 km² et dont la longueur du cours d’eau principal n’est que de quelques centaines de mètres. L’équation suivante développée dans le cadre d’un projet antérieur et réalisée pour le compte du MAPAQ à partir des données de six parcelles agricoles du Québec méridional (superficie

entre 0.03 et 0.11 km² et longueurs du cours d'eau principal entre 0.27 et 1.33 km) est proposée pour l'estimation des TC (en heures) dans ces cas :

$$TC = 2.8 L_C^{1.6}$$

La longueur du cours d'eau principal (L_C en km) est utilisée comme variable physiographique. Son utilisation est recommandée pour les BV où $L_C < 2$ km. L'utilisateur doit toutefois être conscient que cette équation pourrait sous-estimer les TC dans le cas de BV forestier, et donc surestimer les débits de conception.

Estimation des coefficients de ruissellement

Plusieurs valeurs de coefficient de ruissellement (CR) ont été proposées dans la littérature pour différents types de territoire et en fonction de différentes caractéristiques (végétation, pente et classification hydrologique). Ces valeurs semblent toutefois souvent subjectives et basées sur l'expertise de divers utilisateurs. Peu d'études ont été réalisées où des valeurs de CR ont été proposées sur la base d'analyse de données observées.

En premier lieu, le nombre de classe associé au milieu urbain a été réduit à trois classes : 1) faible densité (CR = 0.20); 2) moyenne densité (CR = 0.50); 3) densité élevée (CR = 0.90). Ces valeurs reflètent mieux le niveau de précision que l'on peut escompter compte tenu des incertitudes importantes associées à ces valeurs.

Les CR aux 93 BV sous étude associés aux débits maxima annuels (DMA) de périodes de retour (PdR) 10, 25, 50 et 100 ans ont été estimés à partir de l'équation de la MÉRA. L'estimation de ces CR repose sur l'utilisation du DMA estimé à partir des séries de débits observés et du TC estimés à partir de l'arbre D-4. Les intensités de pluie de durée égale au TC et de PdR donnée ont ensuite été estimées à partir des courbes IDF disponibles.

Trois constats importants découlent de l'examen des CR obtenus : 1) les valeurs de CR augmentent avec la PdR; 2) la dispersion des valeurs de CR obtenus à partir des tables du MCP est beaucoup moins étendue que celle des valeurs estimées aux BV sous étude; 3) certaines valeurs de CR sont supérieures à un (résultat déjà rapporté dans la littérature que certains auteurs attribuent à l'interprétation 'statistique' du CR).

La dépendance du CR en fonction de la PdR observée dans le cadre de cette étude est beaucoup moins marquée que ce qui est généralement rapporté dans la littérature, notamment pour les grandes PdR. Ces différences suggèrent que les capacités d'infiltration, de rétention et de laminage des BV sous étude pour les pluies de PdR 10 ans ne sont pas très différentes pour les pluies plus extrêmes. Ce point n'a pas cependant pas été investigué davantage dans le cadre de cette étude.

Les CR estimés pour la PdR 25 ans ont ensuite été corrélés aux caractéristiques physiographiques des BV afin d'identifier les caractéristiques à retenir pour l'estimation des CR de d'autres BV. Trois approches sont proposées afin d'estimer les valeurs de CR : 1) la première ne considère que la pente du BV comme variable physiographique et utilise une équation de régression (approche S-1); 2) la seconde propose une table similaire à celle du MCP où les valeurs de CR dépendent de la pente du BV et de l'occupation du

territoire (agricole, forestier, urbain et LMH, approche S-2); 3) la troisième reprend la seconde mais considère également les groupes hydrologiques des sols (approche S-3).

Chacune des approches proposées présente des avantages et des inconvénients. L'approche S-1 est simple et rapide à mettre en place puisqu'elle ne nécessite que la détermination de la pente du BV. Son principal désavantage est qu'elle ne tient compte que de la pente du BV. Ainsi, deux BV de même pente mais présentant des occupations du territoire très différentes se verront attribuer le même CR.

L'approche S-2 intègre l'occupation du territoire (ce qui peut être plus satisfaisant d'un point de vue hydrologique) et s'apparente à l'approche actuelle du MCP.

L'approche S-3 tient compte des types de sols et permet d'attribuer des CR à des BV dont les types de sols sont différents (p. ex. BV avec des argiles et des limons versus un BV caractérisé par la présence de loams et de loams sableux).

Plusieurs classes des tables de CR proposées pour les approches S-2 et S-3 sont sous-représentées dans l'échantillon des 93 BV sous étude. Les valeurs proposées demeurent donc, dans une certaine mesure, fondées sur une appréciation incomplète bien qu'hydrologiquement fondée, de leurs impacts sur les débits de crue.

Application et performance de la MÉRA

Les DMA enregistrés sur la période du 1^{er} juin au 31 octobre de chaque année ont été extraits des séries de débits en chaque BV. Ces séries de DMA ont été utilisées pour estimer les quantiles de débits de diverses PdR. La distribution statistique offrant le meilleur ajustement aux DMA a été retenue et les quantiles de PdR 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans et les intervalles de confiance (95 %) correspondants ont été estimés à partir de cette distribution. Ces quantiles ont servi de référence pour l'ajustement de la MÉRA.

Quatre versions de la MÉRA ont été considérées et appliquées aux 93 BV et les débits de conception ainsi estimés ont été comparés aux quantiles DMA estimés à partir des débits mesurés : 1) la version Williams-MTQ utilise les TC estimés à partir de l'équation de Williams et la procédure du MCP; 2) la version D-4/S-1 utilise l'arbre D-4 pour estimer les TC et l'approche S-1 pour calculer les CR; 3) la version D-4/S-2 utilise l'arbre D-4 pour estimer les TC et l'approche S-2 pour calculer les CR; 4) la version D-4/S-3 utilise l'arbre D-4 pour l'estimation du TC et l'approche S-3 pour estimer les CR.

Les versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3 conduisent à une amélioration appréciable des estimations des DMA par rapport à la version Williams-MTQ. La version Williams-MTQ tend en effet à surestimer les plus faibles débits (DMA < 50 m³/sec), parfois de façon importante, et à surestimer les débits plus importants (DMA > 150 m³/sec) pour cinq BV sur six. Les surestimations s'expliquent en grande partie par la forte sous-estimation des TC par l'équation de Williams qui résulte en une surestimation des débits de conception.

Les performances des versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3 sont très similaires et se dégradent légèrement lorsque la PdR augmente. Seulement trois des 30 BV de moins de 25 km² ont des débits de conception 25 ans estimés par la MÉRA (version D-4/S-2) sous la borne inférieure de l'intervalle 95 % des DMA estimés à partir des débits mesurés,

suggérant une sous-estimation significative dans ces cas. Pour les BV de 25 km² à 100 km², six des 63 BV présentent des débits de conception 25 ans MÉRA (version D-4/S-2) inférieurs aux DMA estimés à partir des débits mesurés.

Modélisation des conditions hydrologiques en climat actuel et futur

La mise en place d'un modèle hydrologique vise deux objectifs spécifiques : 1) permettre la simulation de longues séries de débits afin d'améliorer l'estimation des quantiles de débits extrêmes; 2) développer des projections futures sur l'évolution des DMA en climat futur.

Ces travaux ont d'abord permis de mettre en lumière les énormes défis que représentent la modélisation hydrologique des BV de moins de 100 km². Ces défis sont essentiellement de deux ordres. D'abord peu de modèles ont été appliqués à des BV de moins de 100 km² et ensuite peu de données de précipitations et de températures sous-journalières nécessaires au calage et à l'utilisation de ces modèles sont disponibles.

Le modèle GRH5 a été retenu. Ce modèle simple ne comporte que cinq paramètres de calage et simule à un pas de temps horaire. Le module CemaNeige a été intégré au modèle GR5H pour simuler les conditions hydrologiques hivernales. Ce modèle a été mis en place sur six BV (Des Aulnaies 051004; Des Eaux Volées 051002; Des Eaux Volées 051003; Rivière Chevrotière 062002; Ruisseau Rouge 062002; Rivière Montmorency 051005) situés au Québec et de superficies allant de 1.6 à 265 km². Ces BV sont principalement forestier (un seul BV a une occupation agricole importante) et compte de 0 à 8 % de LMH. Le nombre d'années de données disponibles pour le calage du modèle hydrologique varie de 10 à 18 ans selon le BV.

Le calage du modèle hydrologique a permis de mettre en lumière de nombreuses incohérences entre les précipitations et les débits mesurés (p. ex. précipitations importantes sans augmentation des débits ou augmentations notables des débits sans précipitation). Ce travail a également montré l'importance de procéder à un contrôle de qualité rigoureux, certes fastidieux mais essentiel, des données disponibles avant de procéder au calage du modèle hydrologique.

La performance du modèle en période estivale (1er juin au 31 octobre) est supérieure à la performance annuelle sauf pour l'un des BV. Elle est cependant très variable d'une année à l'autre et souvent plus mauvaise les années de faible hydraulité.

L'investigation des impacts hydrologiques des CC sur les DMA du BV du ruisseau Rouge a été réalisée à partir de l'ensemble du *Canadian Regional Climate Model* (CRCM5-LE) composé de 50 simulations couvrant la période 1954 à 2099 et utilisant le RCP 8.5. Les précipitations horaires et les températures simulées ont été extraites au point de grille couvrant le BV du ruisseau Rouge.

Les DMA estimés à partir des débits simulés sont en bon accord avec les valeurs correspondantes estimées à partir des débits mesurés pour les PdR de 5 ans et moins alors que les DMA simulés tendent à surestimer les DMA mesurés pour les PdR 10 et 25 ans, cette surestimation s'accroissant avec la PdR.

Une comparaison des précipitations et températures simulées par le modèle climatique aux valeurs observées révèle toutefois l'existence de biais parfois importants dans les valeurs simulées (résultat maintes fois rapporté dans la littérature). Ces biais doivent toutefois être 'corrigés' avant de pouvoir utiliser les séries climatiques simulées pour la modélisation des conditions hydrologiques futures.

L'application de méthodes de correction de biais *à priori* adaptées à la problématique présente n'a pas permis d'obtenir de résultats concluants. Ce faisant les simulations hydrologiques en climat futur sont trop incertaines pour être exploitables ou d'une quelconque utilité pour le développement de projections futures. Des analyses complémentaires devront être conduites pour consolider les approches utilisées.

Courbes Intensité-Durée-Fréquence en climat futur

La dernière partie du projet vise à mettre à jour les recommandations sur les majorations à appliquer aux courbes IDF actuelles afin de tenir compte des CC. Une révision s'impose considérant les avancées importantes en matière de modélisation climatique.

Une revue de littérature des travaux les plus récents sur le sujet a été réalisée. Elle reprend l'approche utilisée dans le cadre des travaux de Mailhot *et al.* (2014). La revue de littérature s'est intéressée aux études couvrant en tout ou en partie l'est du Canada.

Si l'augmentation des pluies extrêmes en climat futur est jugée très probable, l'ampleur des changements escomptés reste pour une bonne part incertaine. La revue de littérature des études sur le sujet a permis de recenser et vérifier la cohérence des projections disponibles. Ces projections ont ensuite été combinées afin de proposer les majorations les plus vraisemblables et une conception d'ouvrages qui minimise les risques posés par les CC. Ces recommandations sont similaires à celles proposées à la Communauté Urbaine de Québec et la Ville de Québec dans le cadre d'un projet récent.

Six groupes de projections climatiques relatifs aux extrêmes de précipitations ont été analysés et comparés. Trois sont basés sur l'utilisation de modèles régionaux du climat, deux sur l'utilisation de modèles globaux du climat et enfin un qui utilise une relation entre les variations des pluies extrêmes et les variations de températures.

Les projections issues de ces différentes études ont permis de mettre en lumière les différences importantes entre les valeurs proposées. Toutes indiquent une augmentation progressive des précipitations extrêmes au cours du siècle à venir, augmentations d'autant plus importantes que les concentrations de gaz à effet (GES) seront élevées.

Les majorations recommandées s'appliquent aux courbes IDF actuelles (période de référence 1990-2020) et varient selon la période future considérée (2020-2040, 2040-2060, 2060-2080, 2080-2100), la durée (1, 2, 6, 12, 24, 48, 72 heures) et le scénario d'évolution des GES (RCP 4.5 : scénario modéré RCP 8.5 : scénario pessimiste). À titre d'exemple, dépendant de la période future considérée, elles pourront varier de 7 à 21% pour les maxima annuels de précipitation (MAP) 24 heures pour le RCP 4.5 et de 8.5 à 48.5% pour le RCP 8.5.

Le choix du RCP à retenir dans un cas spécifique d'application dépend de l'appréciation du niveau de risque et d'optimisme face à la réponse de nos sociétés devant le défi climatique. À terme, les majorations associées au RCP 8.5 aux horizons 2070 et 2090 sont très élevées et possiblement très coûteuses à mettre en place (40% en moyenne à l'horizon 2070 et 60% à l'horizon 2090) alors que les majorations associées au RCP 4.5 demeurent élevées mais plus réalistes d'un point de vue opérationnel (21% en moyenne à l'horizon 2070 et 26% à l'horizon 2090).

Considérant que les majorations associées au RCP 8.5 (scénario pessimiste) et 4.5 (scénario modéré) sont très différentes, un scénario 'intermédiaire', qui correspond approximativement à une hausse des températures estivales de l'ordre de 3.0 à 3.5°C à l'horizon 2080, a également été considéré. Les majorations pour ce scénario à l'horizon 2040-2050 sont de l'ordre de 12.5 à 25.5% selon la durée et augmentent de manière marquée pour les horizons 2060-2080 et 2080-2100.

Le choix de la majoration effective à appliquer dans un cas spécifique exige de préciser : 1) la durée de vie utile de l'ouvrage (horizon futur à considérer); 2) la durée des MAP (p. ex. temps de concentration du BV); 3) le RCP retenu (appréciation du niveau de risque et application du principe de précaution).

Les incertitudes sur les majorations proposées demeurent très importantes. Elles intègrent celles associées à l'évolution future des concentrations de GES (scénarios RCP), aux modèles climatiques et à la variabilité naturelle du climat (lié au caractère chaotique du climat). Ces incertitudes augmentent avec l'horizon futur considéré.

Les majorations proposées doivent être vues et utilisées comme des valeurs 'guides' pour la prise en compte de l'impact des CC lors de la conception d'ouvrages dont la durée de vie utile s'échelonne sur les décennies à venir. L'utilisateur doit être conscient des incertitudes associées à ces valeurs et devra faire preuve de jugement et de discernement face à une application particulière pour adapter ces valeurs en fonction du contexte d'application et des éléments de risque et de vulnérabilité en présence.

Remerciements

Des remerciements sont d'abord adressés à M. Louis Duchesne et M. Jean-Pierre Saucier de la Direction de la recherche forestière du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) pour avoir transmis les données de débits des bassins-versants du lac Clair, du lac Laflamme et du lac Tirasse ainsi que pour les données météorologiques correspondantes. Un merci également à M. Jean-Luc Martel qui nous a fourni le code du modèle hydrologique GR5H du module neige à intégrer au modèle.

Un grand merci également à tous les membres du comité de suivi pour leur participation active lors des rencontres, leurs expertises et les nombreuses suggestions et commentaires qui ont considérablement enrichi ce projet (Aubert Michaud, IRDA; Daniel Julien, MFFP; Jean-François Cyr, DEH MELCC; Louis-Vincent Gagné, MFFP; Nathalie Bleau, Ouranos; Robert Lagacé, Université Laval et Sylvain Jutras, Université Laval; Sylvain Paquet, MELCC). Les auteurs tiennent également à souligner la contribution importante des principaux intervenants du Ministère des Transports du Québec impliqués dans ce projet (MM. Christian Poirier et Michel Michaud).

Le modèle MRCC5 a été développé par le centre ESCER (Centre pour l'étude et la simulation du climat à l'échelle régionale) de l'Université du Québec à Montréal (UQAM; www.escer.uqam.ca) en collaboration avec ECCC. Les données du MRCC5 ont été générées et fournies par Ouranos et les simulations du MRCC5 ont été effectuées sur le supercalculateur Guillimin de l'Université McGill, sous la gouverne de Calcul Québec et Calcul Canada. L'exploitation de ce supercalculateur est financée par la Fondation canadienne pour l'innovation (FCI), le ministère de l'économie, de la science et de l'innovation du Québec (MESI), et le Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies (FRQ-NT).

Les auteurs souhaitent remercier Ouranos pour l'utilisation de l'ensemble CRCM5-LE. Cet ensemble a été produit dans le cadre du projet ClimEx financé par le *Bavarian State Ministry for the Environment and Consumer Protection*. Les auteurs tiennent également à remercier le *Centre Canadien de Modélisation et d'Analyse du Climat* d'Environnement et Changement Climatique Canada pour la production et la mise à disposition des simulations du *CanESM2 Large Ensemble* utilisées pour la réalisation de l'ensemble CRCM5-LE, de même que le *Canadian Sea Ice and Snow Evolution Network* pour l'idée initiale de réaliser ces simulations. Les simulations du CRCM5 dans le cadre du projet ClimEx ont été réalisées sur le superordinateur SuperMUC du *Leibniz Supercomputing Centre* (LRZ) de la *Bavarian Academy of Sciences and Humanities*. L'opération de ce superordinateur est financée via le *Gauss Centre for Supercomputing* (GCS) par le Ministère fédéral allemand de l'Éducation et de la Recherche et par le Ministère Bavarois de l'Éducation, des Sciences et des Arts.

Les auteurs souhaitent finalement remercier toutes les équipes qui ont produit les simulations climatiques utilisées dans le cadre de cette étude.

Liste des figures

Figure 2.1 Interprétation simple de la méthode rationnelle	7
Figure 3.1 - Localisation des stations hydrométriques des BV sous étude (États américains : MA; Massachusetts; ME; Maine; New York; NY; Vermont; VT)	10
Figure 3.2 – Distributions (box-plots) des caractéristiques physiographiques des BV sous étude (A : aire; L : longueur du cours d'eau; S_B : pente du bassin-versant; S_C : pente du cours d'eau; LMH : occupation en lacs et milieux humides; F : occupation forestière; Ag : occupation agricole; AB : groupe de sol hydrologique AB, CD : groupe de sol hydrologique CD). Les bornes inférieures et supérieures des boîtes représentent le 1 ^e (Q1) et le 3 ^e quartile (Q3) alors que la ligne verticale à l'intérieur des boîtes définit la médiane. La longueur des « moustaches » vaut 1,5 fois l'écart interquartile (Q3-Q1). ..	12
Figure 4.1 – Distribution du nombre d'années disponibles pour l'estimation des quantiles de DMA pour les 93 BV sous étude.....	15
Figure 4.2 – Débits maxima annuels de 1990 à 2016 pour le site 1349810 (États-Unis, 70 km ²).....	15
Figure 4.3 – Estimation des quantiles de débit de période de retour 25 ans à partir des débits maxima annuels et l'intervalle de valeur (95 %) correspondant pour les 10 BV présentant les plus grandes variances dans les débits maxima annuels (ordre décroissant).....	16
Figure 5.1 - Représentation des variables de temps (t_i) utilisées dans les différentes méthodes d'estimation du temps de concentration recensées par McCuen (2009)	20
Figure 5.2 – Exemples d'hydrogrammes (t_1 : début de l'hydrogramme et du temps de montée; t_2 : temps d'occurrence du débit de pointe (Q_P) et fin du temps de montée; t_3 : temps marquant la fin de l'hydrogramme)	22
Figure 5.3 - Classification des hydrogrammes selon quatre grands types : A) hydrogramme simple; B) hydrogramme multiple avec débit de pointe maximal au début de l'hydrogramme suivi d'une ou plusieurs pointes de débits de moindres amplitudes; C) hydrogramme multiple avec débit de pointe maximal succédant à une pointe de débit de moindre amplitude; D) hydrogramme multiple avec débit de pointe maximal succédant à plusieurs pointes de débits de moindres amplitudes (voir le Tableau 5.1 pour la définition des caractéristiques des hydrogrammes).	22
Figure 5.4 - Distribution (boxplots) des temps de montée (en heure) aux 93 BV sous étude classés en ordre croissant de rang de superficie (0.5 à 100 km ²). Le trait noir représente la médiane (2 ^e quartile), les limites des boîtes représentent les 1 ^{er} et 3 ^e quartiles, la moustache supérieure correspond au 3 ^e quartile + 1.5 (3 ^e quartile - 1 ^{er} quartile) et la moustache inférieure correspond 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). Le point rouge correspond au TM moyen.....	24

Figure 5.5 – Moyenne et écart-type des temps de montée aux 93 BV sous étude classés en rang croissant de superficie (0.5 à 100 km ²).....	25
Figure 5.6 – Relation entre la superficie et le temps de montée médian aux 93 BV sous étude.....	26
Figure 5.7 – Distribution des temps de montée médians aux 93 BV sous étude.....	26
Figure 5.8 – Comparaison des temps de montée médians (en abscisse) et moyens (en ordonnée) aux 93 BV sous étude.....	27
Figure 5.9 – Coefficient de détermination (R ²) des régressions linéaires entre les temps de montée médians et diverses caractéristiques physiographiques (voir Tableau 5.2). Seules les caractéristiques avec des corrélations supérieures à 0.005 sont présentées.	29
Figure 5.10– Relation entre temps de montée médians de chaque BV à l'étude et l'occupation en lacs et milieux humides (LMH; en %) et le rapport entre la longueur du cours d'eau (L _c) et la pente du cours d'eau (S _c).....	30
Figure 5.11 – Coefficient de détermination (R ²) entre les temps de montée médians et les temps de concentration estimés selon différentes équations empiriques de la littérature (voir Tableau J.1 de l'Annexe J pour les références).	30
Figure 5.12 - Comparaison des temps de montée médians et des temps de concentration estimés à partir des équations empiriques FAA (1970) et Williams (1922)	31
Figure 6.1 – Division initiale (D-1), intermédiaires (D-2 et D-3) et finale (D-4) en fonction de la fraction de lacs et milieux humides (LMH) et de la valeur de L _c S _c (L _c : longueur du cours d'eau principal; S _c : pente moyenne du cours d'eau) obtenues après application de la méthode des arbres de régression. Le nombre de BV dans chaque groupe est indiqué entre parenthèses, TC (temps de concentration).	36
Figure 6.2 – Division supplémentaire de l'arbre D-4 du groupe de 48 BV (LMH < 10% et L _c S _c < 21 km.....	37
Figure 6.3 – Histogrammes des écarts absolus (heure) (estimé – observé) entre les TM médians des BV sous étude et les TC estimés à partir des équations FAA et Williams proposées dans le Manuel de conception des pontceaux (première ligne) et par les arbres D-1, D-2, D-3 et D-4 de la Figure 6.1 (deuxième et troisième lignes).....	38
Figure 6.4 - Distributions des TM médians des BV classés dans les quatre groupes G-1 à G-4 selon l'arbre D-4. Les lignes horizontales bleues en pontillées correspondent aux valeurs de TC attribuées à chaque groupe.....	40
Figure 6.5 – Écarts absolus (heure) (estimé – observé) entre les TM médians des BV sous étude et les TC estimés à partir de l'arbre D-4 pour chacun des groupes G-1 à G-4 (voir Figure 6.1 et Tableau 6.1)	41

Figure 7.1 – Distributions des CR estimés aux BV sous étude pour les périodes de retour 10, 25, 50 et 100 ans et à partir de la table des CR du Manuel de conception des ponceaux (Tableau 3.4.1a de Transports Québec, 2017).....	53
Figure 7.2 – Coefficient de ruissellement (CR) de période de retour (PdR) 25, 50 et 100 ans en fonction du CR de PdR 10 ans pour l'ensemble des BV sous étude	54
Figure 7.3 – Coefficient de détermination (R^2) en ordre décroissant entre diverses caractéristiques physiographiques et les coefficients de ruissellement estimés avec l'équation 7.1 considérant la période de retour 25 ans. Seules les caractéristiques avec des corrélations supérieures à 0.05 sont présentées.....	56
Figure 7.4 – Coefficient de ruissellement estimé à partir de l'équation 7.1 pour la période de retour 25 ans aux 93 BV sous étude en fonction de la pente moyenne du BV (S_B). Les lignes verticales correspondent aux classes de pente définies pour l'estimation des CR (voir Section 7.5.2 et Tableau 7.6).....	57
Figure 7.5 – Coefficient de ruissellement (CR) estimé à partir de l'équation 7.1 pour la période de retour 25 ans aux 93 BV sous étude (graphique du haut) et pente moyenne du BV (S_B ; graphique du bas) en fonction de l'occupation forestière (%).....	57
Figure 7.6 – Coefficient de ruissellement (CR) estimé à partir de l'équation 7.1 aux 93 BV sous étude en fonction de la pente moyenne du bassin-versant (S_B) pour la période de retour : A) 10 ans; B) 25 ans; C) 50 ans ; D) 100 ans. Les régressions obtenues sont représentées par les courbes en tiret (voir équations 7.2 à 7.6).	59
Figure 7.7 – Comparaison des CR estimés à parti des valeurs suggérées dans le Manuel de conception des ponceaux (CR MTQ en ordonnée; Tableau 7.1) et à partir des données observées (CR 25 ans en abscisse; Équation 7.1).....	64
Figure 7.8 - Comparaison des CR estimés à partir de l'approche S-1 (CR S-1) et à partir des données observées (CR 25 ans; Équation 7.2).....	65
Figure 7.9 - Comparaison des CR estimés à partir de l'approche S-3 (CR S-3, en ordonnée) et S-1 (CR S-1, en abscisse).....	66
Figure 7.10 – Relation entre la pente moyenne des bassins-versants (S_B , %) et l'occupation forestières (A), agricole (B), la représentativité des groupes hydrologiques AB (C) et CD (D), l'occupation en lacs et milieux humides (E) et urbaine (F).....	67
Figure 8.1 – Comparaison des quantiles de débit de PdR 25 ans estimés à partir des séries observés aux débits de conception estimés selon les quatre versions de la MÉRA :A) MTQ-Williams; B) D-4/S-1; C) D-4/S-2; D) D-4/S-3.....	74
Figure 8.2 – Performance des quatre versions de la MÉRA : A) coefficient de détermination (R^2); B) erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error; RMSE); C) biais moyen sur l'ensemble des BV	75
Figure 8.3 – Comparaison des biais et des débits moyens (m^3/sec) pour chaque classe de pente (%) selon les quatre versions de la MÉRA : A) MTQ-Williams; B) version D-4/S-1; C) version D-4/S-2; D) version D-4/S-3; E) débits moyen. Les valeurs des biais	

(graphiques A à D) et des débits moyens (graphique E) de chaque classe sont indiquées au-dessus de chacun des graphiques. 76

Figure 8.4 – Comparaison des DMA de période de retour 25 ans (croix noires) avec leur intervalle de confiance à 95 % (moustaches grises) estimés à partir des séries observées et des débits de conception estimés à partir de la version D-4/S de la MÉRA pour les BV dont la superficie est : A) inférieure à 5 km² (13 BV); B) comprise entre 5 et 10 km² (6 BV); C) comprise entre 10 et 15 km² (6 BV); D) comprise entre 15 et 25 km² (5 BV)..... 79

Figure 8.5 - Comparaison des DMA de période de retour 25 ans (croix noires) avec leur intervalle de confiance à 95 % (moustaches grises) estimés à partir des séries observées et des débits de conception estimés à partir de la version D-4/S de la MÉRA pour les BV dont la superficie est : A) comprise entre 25 et 50 km² (6 BV); B) comprise entre 50 et 75 km² (6 BV); C) comprise entre 75 et 100 km² (5 BV) 80

Figure 8.6 – Estimation du temps de concentration à partir de l'équation 8.1 pour une longueur de cours allant jusqu'à deux kilomètres. Les trois points correspondent aux trois BV de la présente étude avec une longueur du cours d'eau principal inférieure à 2 km. 81

Figure 8.7 – Débits de conception estimés à partir de la version D-4/S-1 de la MÉRA en fonction des DMA estimés à partir des séries mesurées pour les périodes de retour : a) 25 ans; b) 50 and; c) 100 ans. 84

Figure 8.8 - Débits de conception estimés à partir de la version D-4/S-2 de la MÉRA en fonction des DMA estimés à partir des séries mesurées pour les périodes de retour : a) 25 ans; b) 50 ans; c) 100 ans. 84

Figure 8.9 - Débits de conception estimés à partir de la version D-4/S-3 de la MÉRA en fonction des DMA estimés à partir des séries mesurées pour les périodes de retour : a) 25 ans; b) 50 and; c) 100 ans. 85

Figure 8.10 – Biais moyen (m³/sec) (colonne de gauche) et des erreurs quadratiques moyennes (RMSE; colonne de droite) pour les versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3 en fonction de la période de retour (25, 50 et 100 ans). Les débits apparaissant dans le graphique à haut à gauche correspondent aux débits moyens pour chaque période de retour..... 85

Figure 8.11 – Écarts absolus entre débits spécifiques estimés par la MÉRA et les débits spécifiques estimés à partir des débits mesurés (MÉRA-mesuré) en fonction du débit spécifique mesurés. 86

Figure 8.12 – 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. Les points correspondent aux valeurs observées alors que la courbe continue correspond à la distribution Log-normale ($\mu = 0.205$; $\sigma = 0.572$)..... 90

Figure 9.1 – Comparaison des débits simulés (courbe rouge) et observés (courbe noire) (axe de gauche) pour le ruisseau Rouge (DEHA, 062002) pour les années 2009 (haut) et 2018 (bas). Les précipitations (en bleu) réfèrent à l'axe de droite.....	95
Figure 9.2 - Débits maxima annuels observés et simulés à partir du CRCM5-LE sur le BV du ruisseau Rouge. L'échelle des x correspond au quantile Gumbel pour diverses périodes de retour T indiquées sur l'axe des x au haut du graphique. Les points noirs correspondent aux valeurs estimées à partir des débits observés, les croix rouges, à partir des débits simulés avec des séries de précipitations et températures observées, et le trait (médiane) et la zone bleue (intervalles 95%), à partir des 50 séries de précipitations et températures du CRCM5-LE. Les chiffres le long des lignes verticales en tirets indiquent les valeurs estimées des débits maxima annuels de périodes de retour 2, 5, 10 et 25 ans.	98
Figure 10.1 - Scénarios de forçage radiatif (Representative Concentration Pathways ou RCP) exprimés en $W m^{-2}$ proposés dans le cadre du 5e rapport de l'IPCC. La période historique (avant 2000) correspond au forçage radiatif observé	105
Figure 10.2 - Domaine de simulation du CRCM5. Les lignes rouges pointillées correspondent au territoire considéré pour l'estimation des variations des précipitations (entre 42° et 52° parallèles nord et à l'est de la longitude 80° ouest).....	107
Figure 10.3 - Distributions des valeurs de β (%/décennie) (voir Équation 7.1) pour le territoire d'étude (voir Figure 7.2) en fonction de la durée pour les périodes de retour 2 ans (en haut), 25 ans (au milieu) et 100 ans (en bas).....	108
Figure 10.4 - Valeurs moyennes de β (voir Équation 7.1) pour le territoire d'étude (voir Figure 7.1) en fonction de la durée pour les périodes de retour 2 (courbe rouge), 25 (courbe bleue) et 100 ans (courbe en gris).....	109
Figure 10.5 - Changements relatifs projetés (%) en fonction de la durée pour le sud du Québec entre les périodes 2020-2040, 2040-2060, 2060-2080 et 2080-2100 et la 1990-2020 pour les périodes de retour 2 ans (en haut), 25 ans (au milieu) et 100 ans (en bas)	111
Figure 10.6 - Variations relatives (%) médianes des intensités des précipitations extrêmes pour le sud du Québec pour diverses périodes futures selon les RCP 4.5 et 8.5 estimés à partir de l'approche proposée dans CSA (2019). Les zones ombrées représentent l'intervalle entre les 10 ^e et 90 ^e percentiles des valeurs estimées. La période de référence est 1990-2020.	117
Figure 10.7 - Distributions des écarts relatifs des MAP journaliers de période de retour 2 à 50 ans aux différents points de grille couvrant le sud du Québec entre les périodes 2040-2070 et 1990-2020 pour les 11 simulations NA-CORDEX utilisant le scénario RCP 8.5 (voir le Tableau V.1 de l'Annexe V pour la liste des simulations NA-CORDEX).....	119
Figure 10.8 - Écarts relatifs médians pour le sud du Québec des MAP de période de retour 2 à 50 ans entre les périodes 2040-2070 et 1990-2020 pour les 11 simulations	

NA-CORDEX utilisant le scénario RCP 8.5 pour les durées : a) 24 heures; b) 48 heures; c) 72 heures. Les points rouges correspondent aux valeurs moyennes.....	120
Figure 10.9 - Variations relatives (%) des intensités des précipitations extrêmes pour divers horizons futurs selon différences sources. L'horizon est défini par l'année centrale de la période considérée. Les bandes en bleu et rouge (intervalle entre 10 ^e et 90 ^e percentiles) correspondent aux variations relatives (%) selon les RCP 4.5 (en bleu) et 8.5 (en rouge) estimées à partir de l'approche CSA (2019) (Figure 10.6). Les valeurs pour Bush et Lemmen (2019), Innocenti et al. (2019a) et NA-CORDEX sont détaillées au Tableau 10.6. Les intervalles pour Innocenti et al. (2019a) correspondent aux durées 1 h et 72 h et la valeur centrale à la durée 24 heures, pour Bush et Lemmen (2019) à l'intervalle interquartile et pour NA-CORDEX aux valeurs maximales et minimales simulées. La ligne en tiret horizontale correspond à la recommandation de Mailhot et al. (2014) d'une majoration de +18% à l'horizon 2050 pour toutes durées et périodes de retour. Toutes les valeurs ont été ajustées en fonction de la période de référence 1990-2020.....	123
Figure 10.10 – Majorations recommandées (%) à appliquer aux courbes IDF en climat de référence (1990-2020) pour l'estimation des courbes IDF pour diverses périodes futures (2020-2040, 2040-2060, 2060-2080, 2080-2100) selon : a) le RCP 4.5 (scénario modéré); b) le RCP 8.5 (scénario pessimiste)	126
Figure 11.1 – Réseau hydrographique du BV 030423 et cours d'eau principal associé au plus long parcours de l'eau.....	132
Figure 11.2 – Occupation du territoire du BV 030423	132
Figure 11.3 – a) Relief du BV 030423 provenant d'un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 10 m x 10 m; b) fonction de répartition des pentes des tuiles du MNT ayant servi à estimer la pente moyenne du BV; c) profil de l'altitude du cours d'eau principal.....	134
Figure 11.4 – Estimation du temps de concentration du BV 030423 dont l'occupation en lacs et milieux humides (LMH) est de 9.3 % et le rapport LC/SC est de 39.2 km	135
Figure 12.1 – Localisation des quatre sites instrumentés	140
Figure 12.2– Pourcentage de la superficie du BV S1 occupé par les différentes occupations du territoire	141
Figure 12.3 – Pourcentage de la superficie du BV S3 occupé par les différentes occupations du territoire	142
Figure 12.4 - Pourcentage de la superficie du BV S4 occupé par les différentes occupations du territoire	142
Figure 12.5 – Réseau hydrographique des BV instrumentés et localisation des appareils de mesure (point blanc : station de jaugeage; point noir : station météorologique pouvant comprendre un pluviomètre, un capteur d'humidité du sol et un thermomètre).....	144

Figure 12. 6 - Lac artificiel (A), vanne de vidange (B) et barrage avec vue vers l'aval (C) situé au milieu du BV du site S3 (Photos : Samuel Bolduc)	145
Figure 12.7 - Mesure de débit le long d'un transect à l'exutoire du site S1 (Photo : Alain Mailhot)	147
Figure 12.8 – Débits et hauteurs d'eau mesurés et courbe de tarage au site S1	149
Figure 12.9 - – Débits et hauteurs d'eau mesurés et courbe de tarage au site S2.....	149

Liste des tableaux

Tableau 3.1 - Localisation des BV sous étude, organisations responsables de la prise des données de débits et nombre de BV provenant de chaque organisation	9
Tableau 3.2 - Caractéristiques physiographiques des BV considérées dans le cadre du projet de recherche	11
Tableau 5.1 – Caractéristiques des hydrogrammes (voir les Figures 5.2 et 5.3 pour une représentation graphique de ces caractéristiques).	21
Tableau 5.2 - Caractéristiques physiographiques des bassins-versants considérées dans le cadre de la présente étude	29
Tableau 5.3 - Équations considérées, valeurs des paramètres de régression et coefficient de détermination (R^2) selon différentes formulations liant temps de concentration et certaines caractéristiques physiographiques des BV sous étude (voir le Tableau 5.2 pour une description de ces variables et de leurs unités). Le temps de concentration est exprimé en heure et les paramètres à ajuster représentés par a , α , β , et γ	31
Tableau 6.1 – Description des quatre groupes de l'arbre D-4 (Figure 6.1).....	40
Tableau 7.1 – Valeurs de coefficients de ruissellement du Manuel de conception des ponceaux (Tableau 3.4.1a de Transports Québec, 2017).....	46
Tableau 7.2 - Valeurs de coefficients de ruissellement du Manuel de conception des ponceaux pour l'utilisation en milieu urbain (ASCE et WPCF, 1969, Tableau 3.4.1b de Transports Québec, 2017).....	47
Tableau 7.3 - Facteurs de correction proposés dans la littérature et estimés dans le cadre de la présente étude à appliquer aux valeurs de CR en milieu naturel de PdR 10 ans pour estimer les CR de PdR 25, 50 et 100 ans	54
Tableau 7.4 – Quantité de précipitations pour les périodes de retour 10, 25, 50 et 100 ans et les durées 1, 2, 6, 12 et 24 heures provenant des courbes intensité-durée-fréquence de la station météorologique Saint-Sébastien (7027725, voir Annexe O pour plus de détails sur cette station)	54
Tableau 7.5 - Caractéristiques physiographiques considérées pour l'estimation des coefficients de ruissellement (voir Figure 7.3).....	56
Tableau 7.6 – Classes de pente des BV retenues pour l'estimation des CR et nombre de BV appartenant à chaque classe (voir Figure 7.4).	60
Tableau 7.7 – Table des valeurs de CR obtenues pour l'approche simplifiée S-2. En rouge : valeurs fixes pour la première optimisation, En orange : Valeurs fixes suite à la première optimisation.	61
Tableau 7.8 – Table finale des valeurs des CR selon l'approche S-2	62

Tableau 7.9 – Table des valeurs de CR obtenues pour l’approche simplifiée S-3. En rouge : valeurs fixes pour l’optimisation.....	63
Tableau 7.10 - Table finale des valeurs des CR selon l’approche S-3.....	63
Tableau 7.11 – Coefficient de détermination (R^2) entre les CR estimés pour la période de retour 25 ans (Équation 7.2), à partir des valeurs du Tableau 7.1 du MCP et avec les approches S-1, S-2 et S-3 d’estimation du CR	64
Tableau 9.1 – Liste et principales caractéristiques des BV retenus pour la modélisation hydrologique.....	94
Tableau 9.2 – Valeurs du critère de Nash-Sutcliffe (NSE) suite au calage du modèle hydrologique GR5H aux BV sous étude	94
Tableau 10.1 - Changements projetés (%) en fonction de la période de retour et de la durée pour le sud du Québec entre les périodes 2020-2040, 2040-2060, 2060-2080 et 2080-2100 et la 1990-2020 (Innocenti et al., 2019a)	110
Tableau 10.2 - Augmentations projetées des maximums journaliers de précipitations pour le Québec. Les valeurs présentées sont les médianes des simulations CMIP5 et les nombres entre parenthèses correspondent aux 25 ^e et 75 ^e percentiles des valeurs simulées. La période de référence est 1986-2005 (valeurs tirées du Tableau 4.6 de Bush et Lemmen, 2019). La période de référence est 1986-2005.	114
Tableau 10.3 - Projections climatiques d’évolution des températures moyennes saisonnières (°C) pour le sud du Québec pour divers horizons futurs et selon différents RCP (10 ^e et 90 ^e percentiles des variations estimées selon les simulations climatiques de l’ensemble CMIP5). La période de référence est 1971-2000 (valeurs tirées du Tableau 1-2 de Ouranos 2014).	116
Tableau 10.4 - Variations des températures moyennes estivales (JJA) (°C) pour le sud du Québec pour diverses périodes futures selon les RCP 4.5 et 8.5 (10 ^e et 90 ^e percentiles des variations estimées selon les simulations climatiques de l’ensemble CMIP5). La période de référence est 1990-2020 (valeurs estimées à partir des valeurs du Tableau 10.3). La valeur médiane est obtenue en faisant la moyenne des valeurs associées aux 10 ^e et 90 ^e percentiles.....	116
Tableau 10.5 - Variations relatives (%) des intensités des précipitations extrêmes pour le sud du Québec pour diverses périodes futures selon les RCP 4.5 et 8.5 estimés à partir de l’équation 10.1 (CSA, 2019) en utilisant les valeurs du Tableau 10.4 La période de référence est 1990-2020. La valeur médiane est obtenue en faisant la moyenne des valeurs associées aux 10 ^e et 90 ^e percentiles.....	117
Tableau 10.6 - Variations relatives (%) des intensités des précipitations extrêmes pour diverses périodes futures. Toutes les valeurs ont été ajustées pour la période de référence 1990-2020. Ces valeurs ont été utilisées pour la construction de la Figure 10.9.....	122

Tableau 10.7 - Changements projetés normalisés (%) en fonction de la valeur pour la durée 24 heures de périodes de retour 2 ans (voir Tableau 10.1) pour le sud du Québec pour les périodes futures 2020-2040, 2040-2060, 2060-2080 et 2080-2100.....	125
Tableau 10.8 – Majorations recommandées (%) à appliquer aux courbes IDF en climat de référence (1990-2020) pour l’estimation des courbes IDF pour diverses périodes futures (2020-2040, 2040-2060, 2060-2080, 2080-2100) selon les RCP 4.5 (scénario modéré) et 8.5 (scénario pessimiste)	125
Tableau 11.1 – Estimation des caractéristiques physiographiques du BV 030423	131
Tableau 11.2 – Valeurs de CR pour la classe de pente [0-3] % considérant l’approche S-2 et, entre parenthèses, les fractions de la superficie du BV 030423 se trouvant dans chacune des catégories (adaptation du Tableau 7.6)	136
Tableau 12.1 – Principales caractéristiques des BV instrumentés.....	140
Tableau 12.2 - Types et nombre d’instruments installées dans chacun des BV instrumentés.....	144
Tableau 12.3 – Date de début et de fin des campagnes de mesure de 2015 à 2020 pour les quatre sites instrumentés.....	147

Liste des abréviations

BV : Bassin-versant
CC : Changement climatique
CMIP5 : *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*
CORDEX : *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*
CP : Caractéristique physiographique
CR : Coefficient de ruissellement
CRCM : Canadian Regional Climate Model
CSA: *Canadian Standard Association*
DEH : Direction de l'expertise hydrique
DMA : Débit maxima annuel
ECCC : Environnement et Changements Climatiques Canada
FOM : Forêt Montmorency
GES: Gaz à effet de serre
GEV: *Generalized Extreme Value*
GR4J : Génie Rural à quatre paramètres et journalier
GR5H : Génie rural à cinq paramètres et horaire
IDF : Intensité-Durée-Fréquence
LMH : Lacs et milieux humides
MA : Maxima annuel
MCP : Manuel de conception des ponceaux
MAP : Maxima annuel de précipitation
MELCC : Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques
MÉRA : Méthode rationnelle
MFFP : Ministère de la forêt de la faune et des parcs
MHP : Modélisation hydrologique parcimonieuse ou Modèle hydrologique parcimonieux
MSE : Erreur quadratique moyenne
MTQ : Ministère des transports du Québec
NA : *North America*
NSE : *Nash-Sutcliffe Efficiency*
PdR : Période de retour

RCP : *Representative Concentration Pathways*

RMSE : *Root Mean Square Error*

SMBS: *Smoothed Minima Baseflow Separation*

SP: *Sous-période*

TC: *Temps de concentration*

TM : *Temps de montée*

WFR : *Weather Research and Forecasting*

Chapitre 1. Introduction

Le présent rapport présente l'ensemble des travaux et résultats 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 - Phase II (CC06.2). Ce projet fait suite à la Phase I du même projet qui avait pour objectif de revoir la méthode rationnelle (MÉRA) tel que décrite dans le Manuel de conception des ponceaux (MCP). Au terme de cette phase I, les travaux réalisés ont permis : 1) d'identifier dans quel contexte ou pour quel type de bassin versant (BV), les différences entre les débits calculés et observés sont les plus importantes; 2) de procéder à une première évaluation de l'effet des lacs et des milieux humides sur les débits de pointe et proposer des modifications aux paramètres de conception utilisés dans ces cas; 3) de mettre à jour les tables des coefficients de ruissellement (CR); et 4) de comparer différentes équations empiriques utilisées pour estimer les temps de concentration (TC). Toutes ces analyses serviront ultimement à adapter la MÉRA afin que les débits de pointe estimés reflètent avec une plus grande justesse les débits de pointe observés.

Quatre BV ont également été instrumentés (débits et précipitations) dans le cadre de la phase I du projet. Ces BV avaient été sélectionnés suite à des échanges et aux recommandations du Ministère. Les données, recueillies entre 2015 et 2017, ont servi à mieux comprendre les processus hydrologiques en jeu sur ces petits BV.

La Phase II du projet vise à compléter les travaux de la Phase I et à examiner certains enjeux et problématiques spécifiques qui n'ont pas été totalement couverts lors de la Phase I notamment en ce qui concerne le développement d'une méthode d'estimation du TC adaptée aux BV du Québec méridional et la révision des majorations à appliquer aux courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) afin de tenir compte des impacts d'une modification des régimes pluviométriques en climat futur.

Les résultats des phases I et II rapportés dans le présent rapport serviront à actualiser le MCP (Transports Québec, 2004), notamment le Chapitre 3 (Hydrologie). Ainsi les différents paramètres de la MÉRA pourront être mis à jour afin de mieux refléter la réalité hydrologique des BV du Québec méridional. Cette mise à jour permettra également de tenir compte des impacts des changements climatiques (CC) sur la conception afin d'assurer un niveau de service adéquat des infrastructures tout au long de leur durée de vie.

La Phase II du projet visait cinq objectifs spécifiques : 1) poursuivre le suivi de quatre BV instrumentés dans le cadre de la Phase I du projet; 2) développer une nouvelle approche d'estimation des TC mieux adaptée aux BV du Québec; 3) revoir la procédure d'estimation des CR; 4) mettre en place un modèle hydrologique sur des petits BV du Québec et simuler les conditions hydrologiques en climat actuel et futur; 5) formuler des recommandations sur les majorations à appliquer aux courbes IDF et sur la prise en compte des CC dans la procédure de conception.

Le document est structuré autour de ces cinq objectifs spécifiques. Le rapport débute par une description de différentes considérations théoriques et historiques relatives à la

MÉRA (Chapitre 2). Le Chapitre 3 présente les 93 BV utilisés pour les diverses analyses présentées dans ce rapport et donne une description de leurs principales caractéristiques physiographiques. Le Chapitre 4 aborde la question des données de débits mesurés et disponibles en chacun de ces BV et décrit la procédure utilisée pour estimer les débits maxima annuels (DMA) de diverses périodes de retour (PdR).

Les Chapitres 5 et 6 traitent du TC. Le Chapitre 5 traite plus spécifiquement de la définition du TC, de son estimation à partir des hydrogrammes extraits des séries de débits mesurés et des diverses équations empiriques proposées dans la littérature pour lier les TC estimés aux caractéristiques physiographiques des BV. Le Chapitre 6 quant à lui propose et décrit la démarche retenue, basée sur les arbres de régression, afin d'identifier et estimer les TC à partir des caractéristiques physiographiques clefs.

Le Chapitre 7 aborde la question des CR. Le chapitre débute par une brève description des valeurs de CR proposées dans la littérature, suivi d'une explication de la démarche utilisée pour estimer les CR aux BV sous étude. Enfin trois approches sont proposées pour lier ces valeurs aux caractéristiques physiographiques des BV. Trois versions révisées de la MÉRA sont ensuite évaluées au Chapitre 8 et comparées à la version actuelle décrite dans le MCP. La question de l'application de la MÉRA au très petits BV (moins de 1 km²) est également abordée à ce chapitre.

La modélisation hydrologique des BV est discutée au Chapitre 9. Après une brève présentation du modèle hydrologique retenu, une description des BV sélectionnés pour l'application de ce modèle est présentée. Les résultats de l'application du modèle en période historique sont ensuite détaillés. Enfin les résultats des simulations des conditions hydrologiques futures sont brièvement discutés.

Le Chapitre 10 s'intéresse aux projections futures des précipitations extrêmes et à la prise en compte des CC dans la conception. Après un bref rappel des recommandations antérieures en matière de majoration des courbes IDF, la nécessité de revoir ces recommandations à la lumière des travaux plus récents est discutée. Une revue des différents travaux récents sur le sujet est ensuite réalisée. Le chapitre se termine par les majorations recommandées à appliquer aux courbes IDF et sur la procédure à adopter pour intégrer les impacts des CC dans la conception.

Une application détaillée à un BV de la version mise à jour de la MÉRA est présentée au Chapitre 11. Toutes les étapes de l'application de la MÉRA y sont détaillées et discutées. Le Chapitre 12 dresse le portrait des BV instrumentés et des données colligées au fil des campagnes de mesures. Enfin, le Chapitre 13 présente un sommaire de tous ces travaux et des principaux résultats de cette étude.

Il est important de noter, qu'afin de ne pas alourdir le rapport, les détails méthodologiques et certaines données sont regroupés en annexes dans un document distinct du présent rapport.

Chapitre 2. Méthode rationnelle

La méthode rationnelle (MÉRA) est utilisée couramment depuis plus de 125 ans en Amérique du Nord. Il est donc important de bien comprendre les fondements de cette équation pour bien en saisir les nuances et les limites. Les sections suivantes décrivent la MÉRA et ses différentes composantes. La Section 2.1 explique son origine et dresse la liste des critiques à son égard. La Section 2.2 expose les raisons qui font que le MÉRA est toujours utilisée en 2020. La Section 2.3 présente les hypothèses qui sous-tendent cette approche et discute du bien-fondé de son utilisation en milieu naturel par opposition au milieu urbain. Finalement, la Section 2.4 décrit comment la MÉRA doit être interprétée.

2.1 La méthode rationnelle, 125 ans plus tard

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). Toutefois, une description plus précise de la MÉRA a été présentée pour la première fois par Emil Kuichling (Kuichling, 1889). Cette méthode est encore largement utilisée aujourd'hui pour estimer les débits de pointe dans la conception de différents ouvrages hydrauliques, notamment en raison de sa simplicité, de sa large diffusion et de la littérature abondante à son sujet (Ponce, 1989; Brustsaert, 2005; Dhakal *et al.*, 2013a; Grimaldi et Petroselli, 2015). De plus, la MÉRA a été adaptée un peu partout dans le monde afin de répondre à divers besoins spécifiques. C'est le cas notamment de la méthode de Caquot utilisée en France (Réménieras, 1976; Hingray *et al.*, 2009) et de la méthode rationnelle urbaine *Urban Rational Method* décrite dans Goyen *et al.* (2014).

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

$$Q = C_R \frac{A I}{360} \quad (2.1)$$

où Q est le débit (en m^3/s), I l'intensité de la précipitation (en mm/h), A la superficie du bassin-versant (BV) considéré (en hectares) et C_R est le coefficient de ruissellement (CR, adimensionnel).

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 et le peu d'améliorations apportées (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 des assises scientifiques solides ou par l'absence d'avancées significatives dans les domaines liés à l'hydrologie. En réponse à Yen (1992), Wong (2002) soutient que l'utilisation de la MÉRA est tout à fait justifiée lorsque le CR est interprété dans un sens probabiliste et non volumétrique. Cette interprétation probabiliste de la MÉRA établit une relation entre le débit de pointe de période de retour (PdR) donnée et le produit de l'intensité de la précipitation, de même PdR, et la superficie d'un BV :

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

Il est alors question du coefficient de ruissellement rationnel où CR_{Px} est le coefficient de ruissellement pour une PdR donnée et Q_{Px} est le débit (m^3/sec) et I_{Px} l'intensité de la précipitation (mm/h) de même PdR. 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 de French *et al.* (1974), qui se sont intéressés à des BV en milieu rural (Pilgrim et Cordery, 1993).

Une majorité des critiques à l'égard de la MÉRA concernent d'ailleurs l'approche déterministe où le CR est dit volumétrique et est associé au volume de ruissellement pour une pluie donnée ou encore 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.

2.2 Pourquoi utiliser la méthode rationnelle ?

Tel que mentionné dans la section précédente, la MÉRA est encore largement utilisée en 2020 par les ingénieurs et praticiens. Quatre raisons principales expliquent cette situation : 1) la simplicité d'utilisation et d'application de cette approche, 2) sa longue utilisation et sa large diffusion à travers le monde, 3) l'abondante littérature à son sujet et 4) son adaptation à différents contextes hydrologiques.

Malgré cette large utilisation, il demeure toutefois pertinent de se questionner sur la performance réelle de cette approche. Étonnamment, peu d'études se sont attardées à la validation de la méthode. La longévité et le peu de remise en question de la MÉRA pourrait en partie s'expliquer par le fait que la MÉRA, en général, surestime les débits de conception. À ce sujet, Cleveland *et al.* (2011) affirment que l'assertion selon laquelle la MÉRA surestime les débits de pointe fait presque consensus. À titre d'exemple, Madramootoo (1989) a montré qu'il en était ainsi pour un BV rural de $8.1 km^2$ situé au Québec. Cette surestimation pourrait notamment s'expliquer par le fait que la MÉRA considère l'hypothèse que la précipitation est uniformément distribuée sur l'ensemble du BV (Hoang, 1979; Pilgrim et Cordery, 1993, voir Section 2.3). Il va sans dire que l'inverse, une sous-estimation des débits, aurait très certainement menée à des reconsidérations majeures de la MÉRA au fil du temps.

La comparaison des débits de conception aux débits observés sur plusieurs BV reste toutefois très limitée. A ce chapitre, il est important de rapporter les travaux de French *et al.* (1974) qui ont montré que la MÉRA permettait d'obtenir des résultats satisfaisants pour l'application pratique en comparant les débits de conception aux débits estimés pour différentes PdR (2, 5, 20 et 50 ans). Ces travaux portaient sur 37 BV de moins de $250 km^2$ ayant plus de 10 ans de données de débits. De même, Young et McEnroe (2014)

parviennent à des conclusions similaires considérant cette fois 72 BV ruraux de superficie inférieure à 80 km² où l'on dispose de 21 à 48 années de débits enregistrés.

2.3 Hypothèses de base de la méthode rationnelle

L'équation de la MÉRA repose sur plusieurs hypothèses dont les principales sont énumérées ci-dessous (hypothèses reprises de Transports Québec, 2017). Toutes ces hypothèses et d'autres encore sont discutées dans Rossmiller (1980).

- Lors d'une précipitation d'une intensité constante et uniformément distribuée sur l'ensemble du BV, le taux maximal de ruissellement se produit lorsque la superficie entière du bassin contribue à l'écoulement à l'exutoire;
- Pour une précipitation d'une durée égale au temps de concentration (TC), la PdR du débit de pointe correspond au temps de retour de la précipitation;
- Le taux maximal de ruissellement est une fraction du taux de précipitation. La relation est donc linéaire entre le débit et l'intensité de la précipitation;
- Le CR est le même pour des précipitations de différentes PdR et pour tout événement de précipitation sur un même BV.
- Le TC est une caractéristique intrinsèque d'un BV qui ne dépend que de ces caractéristiques physiographiques et qui correspond au temps caractéristique de la réponse hydrologique du bassin.
- La MÉRA ne tient pas explicitement compte de la rétention et du stockage des eaux en surface (TDT, 2014).

Il est important de mentionner que ces hypothèses sont valides pour des BV fortement imperméabilisés. À ce titre, il faut rappeler que la MÉRA a été développée pour estimer les débits de pointe en milieu urbain (Kuichling, 1889; Ponce, 1989; Dhakal *et al.*, 2012). Lorsque les surfaces imperméables sont importantes, la valeur attribuée au CR est constante d'une pluie à l'autre (French *et al.*, 1974). De plus, le drainage urbain minimise l'emmagasinement des eaux en surface (French *et al.*, 1974). Toutefois, lorsque la MÉRA est appliquée à des milieux plus naturels ou ruraux, certaines hypothèses s'appliquent plus difficilement, notamment celles reliées au CR, à l'équivalence de la période de retour du débit de pointe et de la précipitation et à l'emmagasinement temporaire des eaux en surface (Yen, 1992; Pilgrim et Cordery, 1993). Ainsi dans le cas de milieux comportant des surfaces perméables plus importantes :

- Le CR peut varier en fonction de l'intensité de la pluie et il sera d'autant plus grand que la PdR est élevée, mais également en fonction des conditions antérieures d'humidités et des saisons (voir Section 7.9).
- Les milieux naturels sont souvent caractérisés par la présence de lacs et milieux humides (LMH) qui ont un impact important sur le régime hydrologique d'un BV (voir Section 7.3)
- Il n'existe pas de TC unique pour un BV donné. Le TC peut varier selon les caractéristiques de la précipitation (durée, intensité, répartition spatiale et temporelle, etc.; voir Section 5.4.2).

2.4 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 à 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 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 le temps de montée (TM) est égal au T_C (hypothèse qui sera utilisée pour estimer le T_C ; voir Chapitre 5) et 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 coefficient de ruissellement 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 la montée. Une asymétrie plus importante apparaîtra lorsque le laminage sera plus important, laminage qui aura pour effet de répartir temporellement les apports. Plusieurs facteurs physiographiques peuvent contribuer au plus ou moins grand laminage de l'hydrogramme (occupation du territoire, présence de lac et milieux humides, pente, etc.).

Un examen de l'équation 4 de la Figure 2,1 montre que si un nouveau coefficient de ruissellement est défini comme suit :

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

alors on retrouve l'équation de la MÉRA où le coefficient de ruissellement intègre à la fois les processus d'infiltration et de rétention qui ont un impact sur le volume disponibles pour le ruissellement mais également les processus ayant un impact sur 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 qui est assimilé au TM des hydrogrammes (voir Chapitre 5). 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.

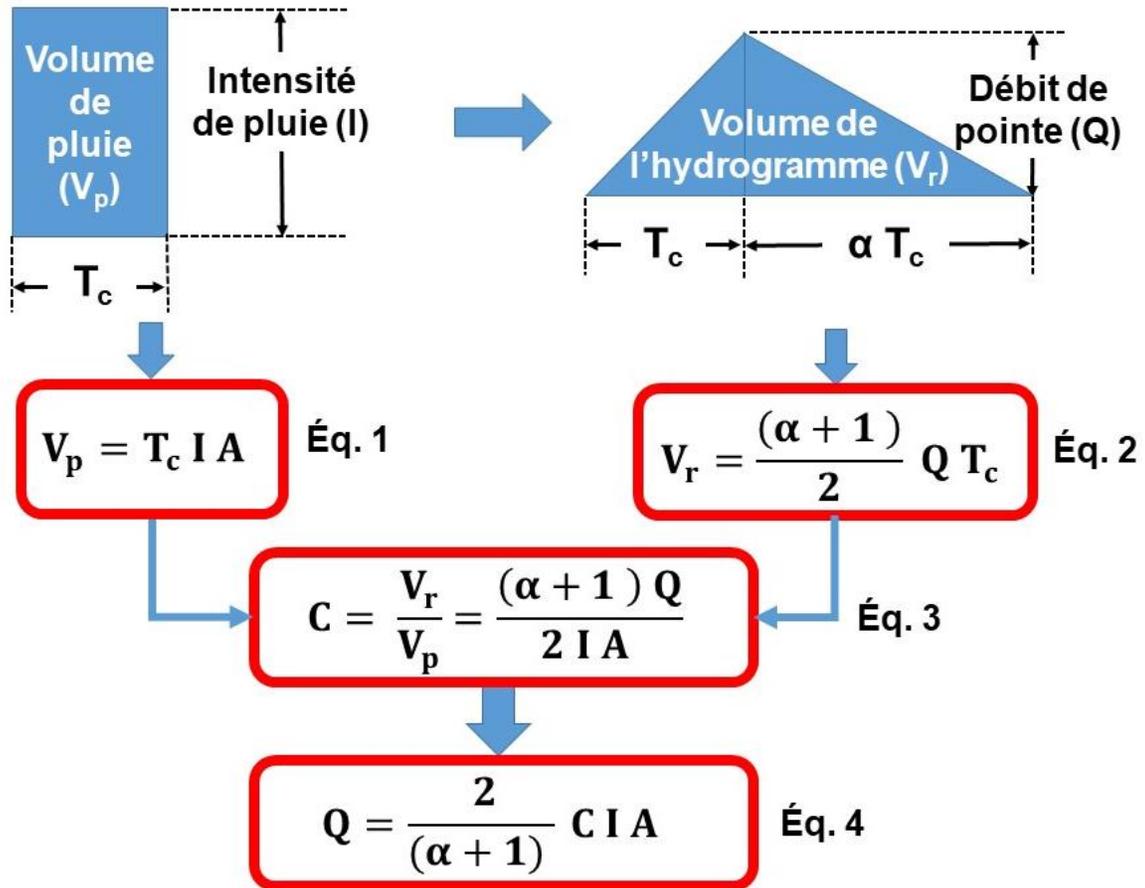


Figure 2.1 Interprétation simple de la méthode rationnelle

Chapitre 3. Bassins-versants (BV) sous étude

Le présent chapitre dresse le portrait des bassins-versants (BV) retenus pour la réalisation des travaux, notamment ceux portant sur le développement d'une méthode d'estimation du temps de concentration (TC) (Chapitres 5 et 6) et sur la mise à jour des valeurs du coefficient de ruissellement (CR) (Chapitre 7). La Section 3.1 aborde la localisation des BV et la provenance des données de débit. La Section 3.2 dresse le portrait des caractéristiques physiographiques considérées dans le cadre de ce projet.

3.1 Sélection et localisation des BV sous étude

Pour la réalisation des travaux, 93 BV de moins de 100 km² situés au Québec, en Ontario et dans certains états du nord-est des États-Unis pour lesquels on dispose de données de débit sous-journalières, souvent aux 15 minutes, ont été identifiés. Au moins dix années valides de débit mesurés, couvrant la période du 1^{er} juin au 31 octobre, sont disponibles à tous ces BV. Une année est valide si la période du 1^{er} juin au 31 octobre compte moins de 20% de données non valides ou manquantes. Cette période a été retenue puisqu'elle correspond à la période d'écoulement en eaux libres selon les critères de la Direction de l'expertise hydrique et atmosphérique (DEH).

Le Tableau 3.1 présente le nombre de BV retenus pour chaque province et état américain alors que la carte de la Figure 3.1 localise la station hydrométrique à l'exutoire de chacun de ces BV. Les Figures A.1, A.2 et A.3 de l'Annexe A présentent une localisation à plus petite échelle des stations hydrométriques des BV retenus alors que le Tableau A.1 dresse la liste complète des stations hydrométriques.

Tableau 3.1 - Localisation des BV sous étude, organisations responsables de la prise des données de débits et nombre de BV provenant de chaque organisation

Province/État	Organisation	Nombre de BV
Québec	DEH ¹	11
	IRDA ²	3
Ontario	ECCC ³	37
Maine	USGS ⁴	4
Massachusetts		5
New York		27
Vermont		6
Total		93

1 - Direction de l'Expertise Hydrique et Atmosphérique du Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques

2 - Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement

3 - Environnement et Changement Climatique Canada

4 - *United States Geological Survey*

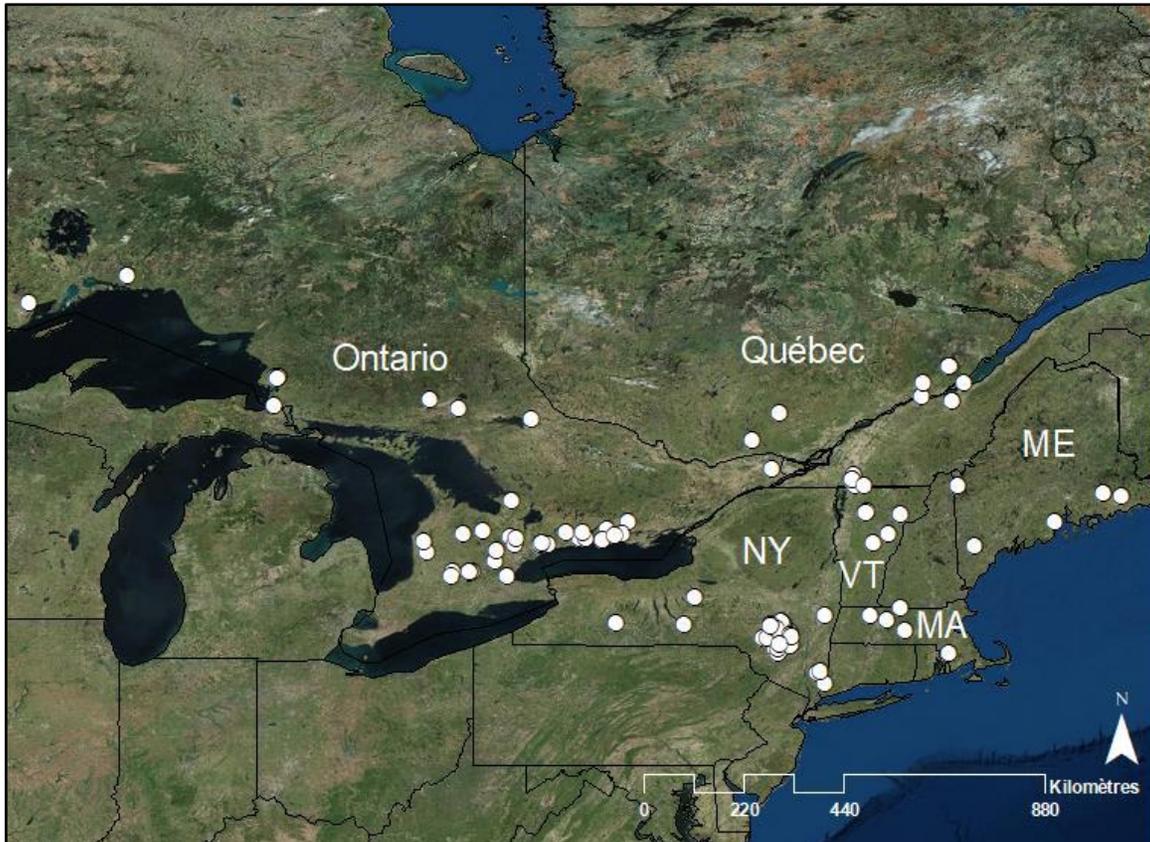


Figure 3.1 - Localisation des stations hydrométriques des BV sous étude (États américains : MA; Massachusetts; ME; Maine; New York; NY; Vermont; VT)

3.2 Caractéristiques physiographiques des BV sous étude

Les caractéristiques physiographiques présentés au Tableau 3.2 ont été estimés pour chacun des 93 BV sous étude. Les BV retenus présentent des caractéristiques physiographiques très variées comme en témoigne la Figure 3.2. Puisque ces BV se trouvent dans des provinces voire des pays différents, plusieurs sources d'information ont été utilisées pour compléter cette caractérisation. Ces sources d'informations sont présentées à l'Annexe B. L'Annexe C présente l'ensemble des caractéristiques physiographiques de chacun des BV sous étude. Enfin, l'Annexe D décrit les procédures utilisées pour l'estimation de chacune de ces caractéristiques.

La superficie des BV varie de 0.3 à 100 km². Bien que la MÉRA soit utilisée par le Ministère des Transports du Québec (MTQ) pour des BV dont la superficie est de 25 km² ou moins, des BV de plus grandes dimensions ont été retenus pour deux raisons. Premièrement, la littérature suggère que la MÉRA peut être appliquée à des BV de superficie allant jusqu'à 80 km² (Young et McEnroe, 2014), 250 (French *et al.*, 1974) voire 320 km² (Dhakai *et al.*, 2012), les auteurs ayant des avis très différents quant à la taille maximale à considérer pour l'application de la MÉRA. Le rapport final de la Phase I du projet peut être consulté à cet effet (Mailhot *et al.* 2018a). Deuxièmement, les analyses réalisées dans le cadre de cette étude, notamment les analyses statistiques, nécessitent le plus grand échantillon

possible ce qui n'aurait pas été possible si seulement les BV de 25 km² ou moins avaient été considérés puisque seulement 30 BV parmi les 93 BV sous étude satisfont ce critère. Ce deuxième point explique également pourquoi plusieurs des BV retenus se trouvent en Ontario et dans les états du nord-est des États-Unis (Maine, Massachussets, New York et Vermont).

Les pentes moyennes des BV varient de très faibles (< 1 %) à très fortes (> 20 %). Tous les BV de pentes supérieures à 15 %, au nombre de onze, se trouvent aux États-Unis. Les pentes les plus fortes pour les BV du Québec et de l'Ontario sont de 13 et 12 % respectivement.

La principale occupation du territoire pour l'ensemble des BV est de type forestier bien que pour 16 BV l'occupation agricole soit supérieure à 60 %. De plus, plusieurs BV présentent une occupation urbaine, toutefois, celle-ci ne dépasse jamais 17 %. Il est important de mentionner que l'un des critères de sélections des BV considéré à la Phase 1 du projet était que l'occupation urbaine devait être inférieure à 20 % (Mailhot *et al.* 2018a). Finalement, l'occupation en LMH peut atteindre jusqu'à 30 % et est supérieure à 10 % pour 30 BV.

Tableau 3.2 - Caractéristiques physiographiques des BV considérées dans le cadre du projet de recherche

Caractéristiques	Description/Abréviation/Symbole	Unité	Annexe ¹
Superficie	A	km ²	D.1
Pente moyenne	S _B	%	D.2
Longueur du cours d'eau principal	L _C	km	D.3
Pente moyenne du cours d'eau	S _C	%	D.4
Longueur du réseau hydrographique	L _{RH}	km	D.5
Densité de drainage	D _D	km	D.6
Forme	W	km	D.7
Occupation du territoire	Forestier (arbre et arbuste)	%	D.8
	Agricole (culture et pâturage)		
	Urbain		
	Lac et milieux humides (LMH)		
Classification hydrologique des sols	Groupe hydrologique A	%	D.9
	Groupe hydrologique B		
	Groupe hydrologique C		
	Groupe hydrologique D		
Connectivité des lacs et milieux humides	C	%	D.10
Séparation du réseau hydrographique	S _{RH}	%	D.11
Position des lacs et milieux humides	N/A	%	D.12

1. Les annexes indiquées décrivent la procédure utilisée pour estimer chacune de ces caractéristiques.

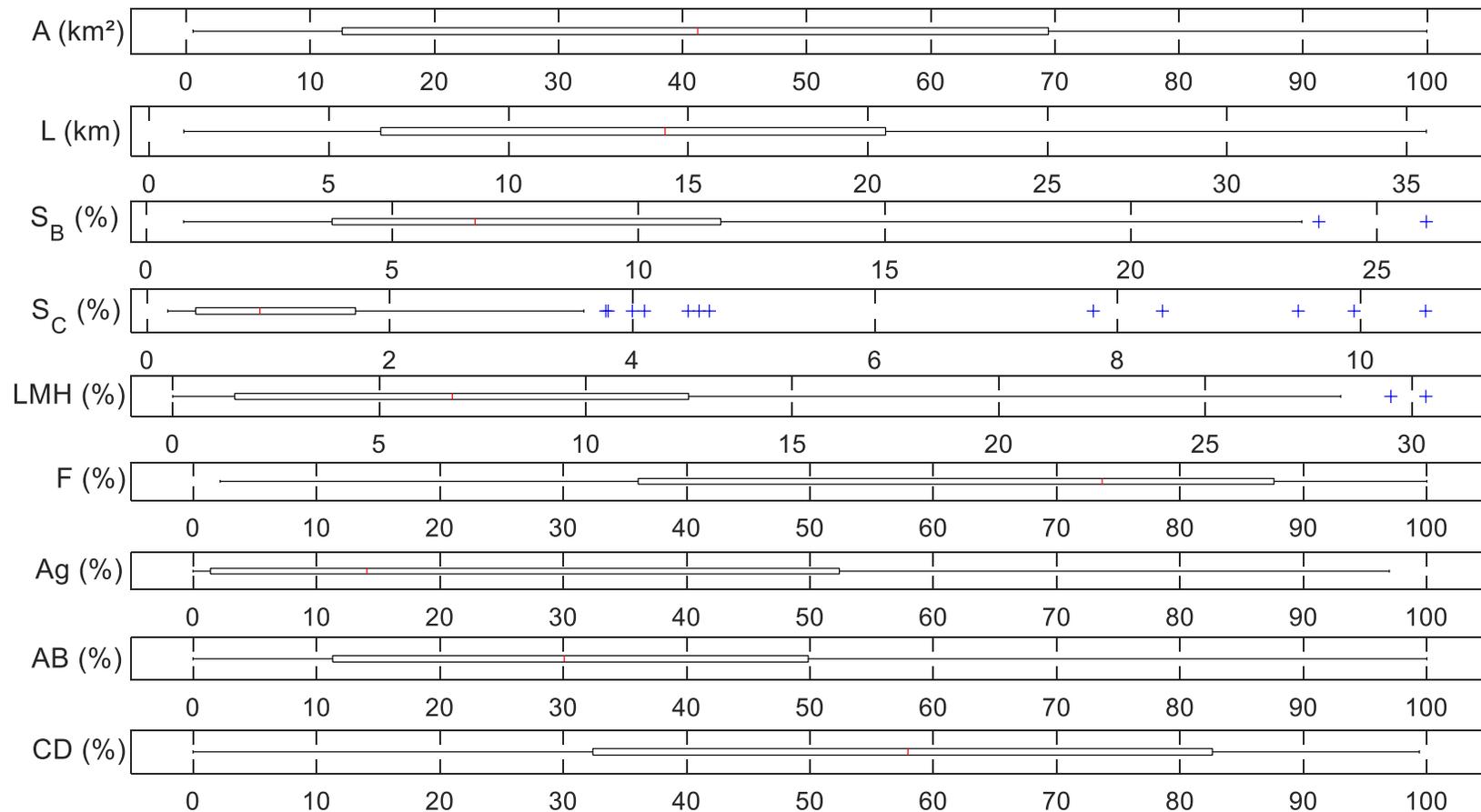


Figure 3.2 – Distributions (box-plots) des caractéristiques physiographiques des BV sous étude (A : aire; L : longueur du cours d'eau; S_B : pente du bassin-versant; S_C : pente du cours d'eau; LMH : occupation en lacs et milieux humides; F : occupation forestière; Ag : occupation agricole; AB : groupe de sol hydrologique AB, CD : groupe de sol hydrologique CD). Les bornes inférieures et supérieures des boîtes représentent le 1^e (Q1) et le 3^e quartile (Q3) alors que la ligne verticale à l'intérieur des boîtes définit la médiane. La longueur des « moustaches » vaut 1,5 fois l'écart interquartile (Q3-Q1).

Chapitre 4. Estimation des débits maxima annuels

Le Chapitre 4 présente l'ensemble des données de débit utilisées pour les analyses présentées dans les chapitres ultérieurs. La Section 4.1 présente les critères ayant servis au contrôle de qualité des données de débit et la Section 4.2 explique comment les débits maxima annuels (DMA) ont été extraits des séries de débits mesurés. La Section 4.3 explique comment les quantiles de débit ont été estimés pour diverses périodes de retour (PdR) et finalement, la Section 4.4 discute des incertitudes associées à l'estimation des quantiles de débit.

4.1 Analyse préliminaire des données brutes de débit

Les séries de débit aux 15 minutes ou 30 minutes des 93 BV présentés au Chapitre 3 possèdent tous au moins 10 ans de données valides, une année valide étant définie comme une année avec moins de 20 % de données manquantes pendant la période du 1^{er} juin au 31 octobre. Le mois de mai n'est pas considéré puisque, pour certains sites, les hydrogrammes montraient un débit de base plus élevé pour ce mois par rapport aux autres mois suggérant une contribution significative due à la fonte de neige. Pour la DEH, cette période (juin à octobre), correspond à la période estivale et désigne la période où l'écoulement est en eaux libres. Un minimum de 10 années valides se justifie considérant les PdR généralement utilisées pour la conception de ponceaux (25, 50 et 100 ans). L'Annexe E présente les caractéristiques des séries disponibles aux 93 BV à l'étude (années d'opération, nombre d'années disponibles et résultats du test de tendance).

4.2 Extraction des débits maxima annuels (DMA) et analyses de tendances

Les DMA ont été extraits des séries de débits disponibles en chaque site pour les années valides. Les DMA correspondent donc aux séries des débits maximums enregistrés pendant la période du 1^{er} juin au 31 octobre de chaque année valide à un site donné. Il convient donc de noter que l'expression débit maxima annuel, ou l'abréviation DMA, qui sera utilisée dans le reste du présent rapport, réfère, à moins d'indication contraire, au débit maxima sur la période du 1^{er} juin au 31 octobre de chaque année.

L'analyse fréquentielle permettant d'estimer les DMA de différentes PdR repose sur l'hypothèse que ces séries des débits sont stationnaires, c'est-à-dire que les moments de la distribution décrivant cette série ne dépendent pas du temps. La vérification de cette condition est essentielle puisque plusieurs facteurs peuvent contribuer à créer des tendances (p. ex. modifications à l'occupation du territoire, modifications de la morphologie du cours d'eau au point de mesure des débits, ruptures dans les séries suite à un changement d'instrumentation ou de courbes de tarage).

Cette condition de stationnarité avait déjà été vérifiée en utilisant le test de Mann-Kendall (pour une description de ce test, voir Meylan *et al.*, 2008). Le test de Mann-Kendall est un test non paramétrique qui permet de détecter la présence de tendance dans les séries. Le test a été appliqué aux séries des DMA disponibles et l'hypothèse de stationnarité

vérifiée en appliquant le test de Mann-Kendall au seuil de confiance 5 %. Le Tableau E.1 de l'Annexe E présente le résultat du test de Mann-Kendall (p-value) pour les 93 sites. Aucune des séries des DMA à ces stations ne présente de tendances significatives au seuil de confiance 5%.

4.3 Estimations des quantiles des DMA de diverses périodes de retour

Les séries des DMA disponibles aux différents BV retenus ont été analysées afin d'estimer les quantiles correspondants pour les PdR 25, 50 et 100 ans qui seront par la suite comparés aux débits estimés à partir de la MÉRA. Le Tableau F.1 de l'Annexe F résume les informations pertinentes sur les séries des DMA disponibles aux différents sites retenus (nombre d'années disponibles, distribution retenue, débits pour les PdR 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans).

Trois distributions ont été considérées pour représenter les séries des DMA : 1) *Generalized Extreme Value* (GEV) ; 2) Gumbel et 3) log-normale. Les deux premières distributions sont couramment utilisées pour la représentation des valeurs extrêmes (Villarini et Smith 2010; Coles, 2001) et la dernière est également souvent utilisée pour représenter les séries de débits maximum (Meylan *et al.*, 2008). La distribution Gumbel est un cas particulier de la distribution GEV où le paramètre de forme est nul. La distribution GEV comporte trois paramètres (paramètres de position, d'échelle et de forme) alors que les distributions Gumbel et Log-normale en comptent deux (paramètres de position et d'échelle). Ces distributions sont présentées en détails dans Coles (2001) et Meylan *et al.* (2008).

L'ajustement des paramètres des distributions pour chacun des sites a été réalisé en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. La distribution qui offre le meilleur ajustement aux séries observées a été sélectionnée sur la base du critère d'Akaike (Burnham et Anderson, 2010). Le Tableau F.1 de l'Annexe F présente pour chacun des sites la distribution sélectionnée, les valeurs de paramètres estimées, les DMA correspondant aux PdR 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans et l'intervalle de confiance (95%).

L'examen du Tableau F.1 montre que la distribution Log-normale a été la plus souvent sélectionnée (75.5 % des sites), suivi des distributions GEV (12.7 %) et Gumbel (11.8 %). À noter que, dans le cas de la distribution GEV, tous les sites sauf un présentent des valeurs négatives du paramètre de forme correspondant, selon la paramétrisation utilisée, à une distribution à queue lourde (*heavy tailed distribution*; Coles 2001).

Les graphiques quantile-quantile (aussi connus sous leur dénomination anglaise *Q-Q plots*) de chacun des 93 BV ont été examinés. Ces graphiques permettent d'apprécier visuellement la qualité de l'ajustement des quantiles empiriques aux quantiles estimés par la distribution sélectionnée et ils ont été jugés adéquats aux fins d'analyses ultérieures. Les quantiles empiriques ont été estimés en utilisant l'estimateur de Cunnane (Meylan *et al.*, 2008).

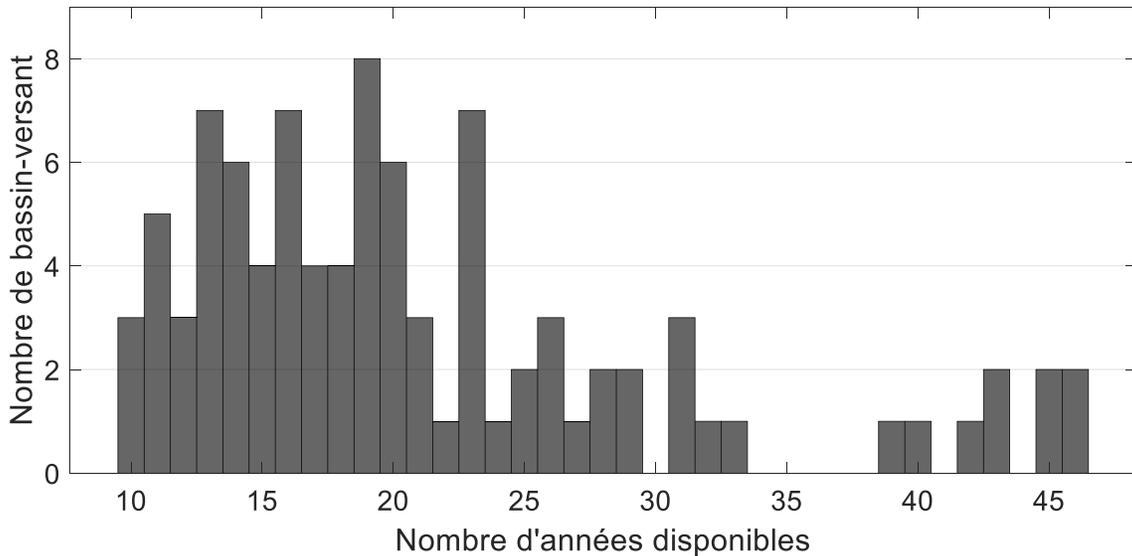


Figure 4.1 – Distribution du nombre d'années disponibles pour l'estimation des quantiles de DMA pour les 93 BV sous étude

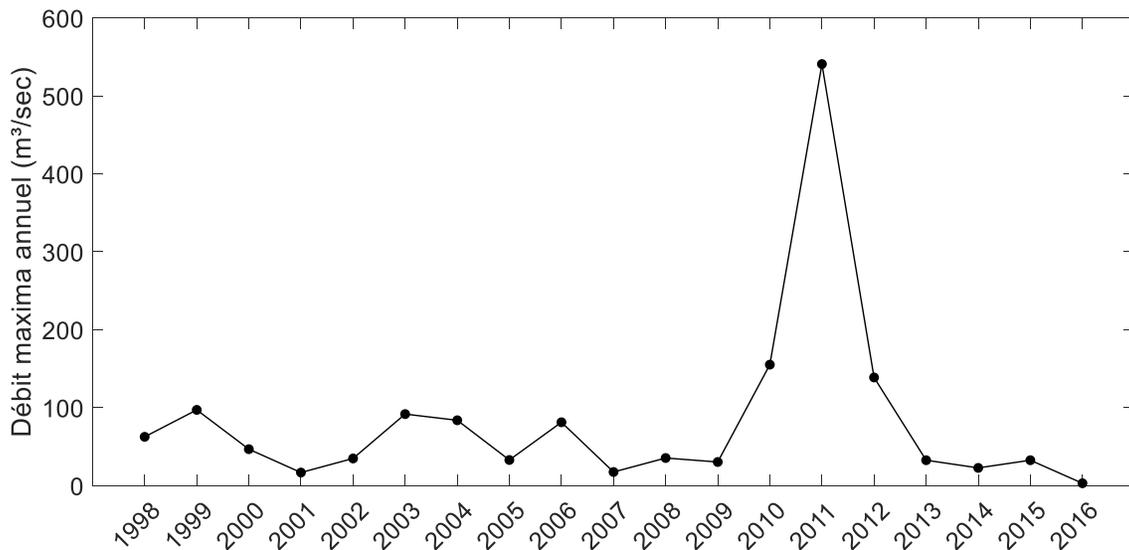


Figure 4.2 – Débits maxima annuels de 1990 à 2016 pour le site 1349810 (États-Unis, 70 km²)

4.4 Incertitudes sur les quantiles DMA estimés

Les incertitudes sur les quantiles de DMA sont importantes et peuvent provenir de différents facteurs. Sur l'ensemble des sites à l'étude, l'intervalle de confiance 95 % correspond en moyenne à une variation relative de 65 % (varient entre 52-82 %) par rapport au quantile estimé pour la PdR 25 ans. Ces incertitudes sont en partie attribuables aux historiques parfois courts pour l'estimation des quantiles, notamment ceux associés

aux périodes de retour 100 ans. La Figure 4.1 montre que pour la grande majorité des BV, le nombre d'années disponibles est inférieur à 25 ans.

De plus, certains sites ont été touché par des événements de pluie extrêmes, par exemple l'Ouragan Irène en 2011. Or, lors de tels événements, les incertitudes sur les débits mesurés peuvent être très importantes. La Figure 4.2 donne un exemple d'une station de jaugeage (1349810, États-Unis) touchée par l'Ouragan Irène et dont le DMA associé à cette année est environ trois fois supérieur aux autres DMA enregistrés à cette station. Compte tenu du caractère exceptionnel de ce débit, on peut raisonnablement penser qu'il dépasse largement les débits utilisés pour la construction de la courbe de tarage en ce site. Ce faisant les incertitudes sur ce débit sont certainement très élevées.

La station du BV 1349810 est d'ailleurs celle où la série des DMA présente le plus grand rapport entre la valeur de l'intervalle de confiance 95% et le quantile estimé (82%). La Figure 4.3 montre les quantiles de PdR 25 ans et les intervalles de confiance à 95 % pour les 10 stations avec les plus grandes variances. Il est intéressant de noter que tous ces BV sont situés aux États-Unis et que pour huit d'entre eux, le DMA le plus élevé a été enregistré suite à l'ouragan Irène. Finalement, la Figure 4.3 rend compte de l'étendu de l'intervalle de valeur 95 % comparativement à la valeur estimée pour ces BV. Ainsi, la comparaison des débits de conception estimés à partir de la MÉRA et des quantiles estimés à partir des DMA doit être réalisée en conservant à l'esprit que l'étendu de valeurs plausibles autour de la valeur estimée est grande (Chapitre 8).

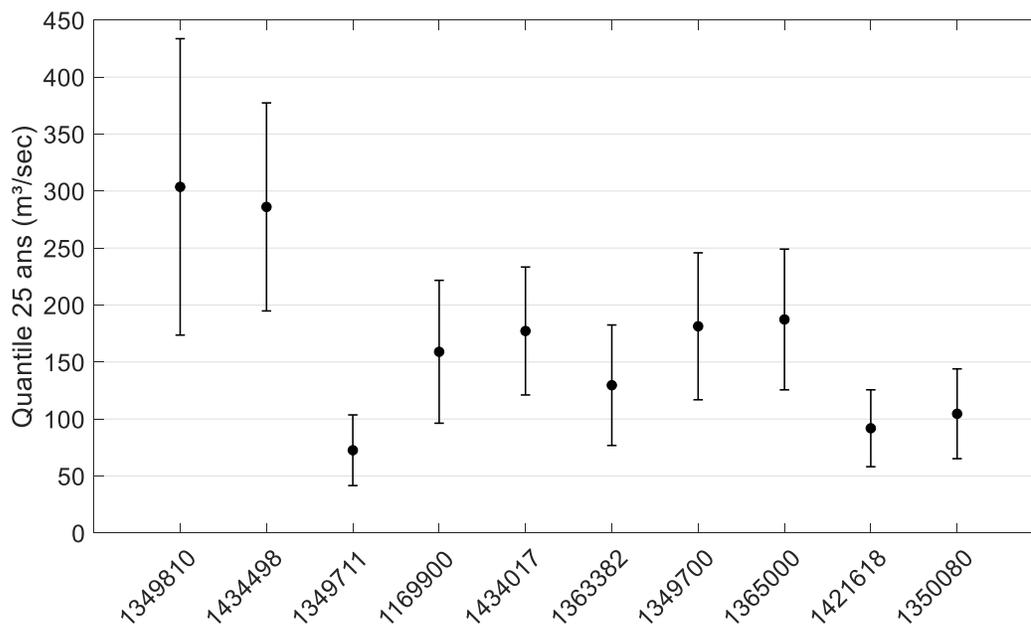


Figure 4.3 – Estimation des quantiles de débit de période de retour 25 ans à partir des débits maxima annuels et l'intervalle de valeur (95 %) correspondant pour les 10 BV présentant les plus grandes variances dans les débits maxima annuels (ordre décroissant)

Chapitre 5. Temps de concentration

Dans le cadre du projet de recherche, l'un des éléments clef est le développement d'une méthode d'estimation du temps de concentration (TC) qui correspond au temps caractéristique de la réponse hydrologique d'un BV. Ce temps de réponse dépend des caractéristiques physiographiques du BV (superficie, pente, occupation, etc.) et la structure spatiale et temporelle des précipitations. Il s'agit d'une étape importante de la MÉRA puisque l'estimation des débits de conception nécessite de déterminer ce TC qui est ensuite utilisé pour déterminer la durée à considérer pour l'estimation des intensités de pluie à partir des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF).

La Section 5.1 explique le concept de TC alors que la Section 5.2 définit le temps de montée (TM) utilisé pour l'estimation du TC. La Section 5.3 présente la méthodologie utilisée pour l'extraction des hydrogrammes qui sont utilisés pour estimer les TM et les TC. La Section 5.4 analyse les TM des hydrogrammes retenus. Les trois sections suivantes portent sur l'analyse visant à estimer le pouvoir prédictif de caractéristiques physiographique (Section 5.5), d'équations empiriques existantes (Section 5.6) et de calibration de formulations courantes (5.7) pour l'estimation du TC. Finalement, la Section 5.8 présente un résumé du Chapitre 5.

5.1 Concept du temps de concentration

Le TC est un concept important en hydrologie. Cependant, l'évaluation de sa valeur pour un bassin donné reste difficile et montre que ce concept demeure, dans une certaine mesure, ambigu (Huber 1987; Efstratiadis *et al.* 2014; Michailidi *et al.* 2018). Plusieurs définitions ont été proposées dont celle, la plus généralement utilisée, qui veut que le TC corresponde au temps entre le début de la pluie et le moment où tout le BV contribue au débit à l'exutoire ou, de façon équivalente, le temps pour que l'eau transite du point le plus en amont du bassin jusqu'à l'exutoire (« *The time necessary for the rain which falls on the most remote portion of the catchment to travel to the outlet* », Mulvany 1851; voir aussi McCuen 2009; Gericke et Smithers 2014). Le TC peut donc être vu comme un temps 'caractéristique' de la réponse hydrologique d'un bassin donné et c'est à ce titre qu'il est utilisé en hydrologie notamment dans le cadre de la MÉRA. L'estimation de ce temps est cependant une étape importante puisqu'une large part des incertitudes dans l'estimation des débits de pointe est associée aux incertitudes sur TC (McCuen 2009; Gericke et Smithers 2014; Gericke et Smithers 2016a,b).

Cette définition 'théorique' demande, pour être utilisable dans un contexte pratique, que lui soit associée une définition 'opérationnelle', c'est-à-dire une quantité 'mesurable' qui puisse être associée au TC et que l'on peut estimer à partir de données mesurées tels que les hydrogrammes et les hyétogrammes. Plusieurs méthodes d'estimations et plusieurs paramètres ont été proposés dans la littérature pour estimer le TC, mais aucune ne fait l'unanimité (pour une revue de ces méthodes voir Singh 1984, 1988; Gericke et Smithers 2014; Mailhot *et al.* 2018a). McCuen (2009) propose d'utiliser la durée entre le temps associé au centroïde (ou centre de masse) de la pluie effective et le centroïde de l'hydrogramme, ou encore le débit maximum, comme définition opérationnelle du TC. Il

est cependant difficile de statuer sur la meilleure méthode d'estimation du TC puisqu'il n'existe pas de définition unique et universellement acceptée de celui-ci.

Des études cherchant à estimer les TC d'un bassin à partir d'hydrogrammes/hyétogrammes mesurés ont montré que les valeurs estimées varient sensiblement d'un événement à l'autre (Rao et Delleur 1974; Michailidi *et al.* 2018). En effet, ces valeurs sont fortement dépendantes de la distribution spatio-temporelle de la pluie, des conditions antérieures d'humidité, de la rétention sur le bassin et des stades végétatifs des plantes. De même, une étude de Kjeldsen *et al.* (2016) a confirmé l'importance des conditions antérieures d'humidité sur les TC (défini dans ce cas par la durée séparant le débit de pointe et le centroïde de la pluie) et montré que les temps estimés sont généralement plus courts lorsque les conditions antérieures sont plus humides. Cette étude a également confirmé que les TC sont inversement proportionnels à l'intensité de la pluie (les TC plus courts étant associées aux pluies plus intenses). Grimaldi *et al.* (2012) ont également montré que des débits de pointe plus élevés étaient associés à des TC plus courts. L'identification d'un TC 'caractéristique' d'un bassin pose donc un défi particulier et amène la question de savoir à quoi correspond exactement ce TC (p. ex. à un temps moyen du parcours de l'eau dans le bassin).

L'estimation d'un TC dans le cas de BV non-jaugé repose sur l'hypothèse qu'il peut être estimé sur la seule base des caractéristiques physiographiques de ce BV. Il s'agit donc, tel que mentionné plus tôt, d'identifier une échelle de temps caractéristique de la réponse hydrologique d'un bassin. De très nombreuses études ont donc cherché à établir de pareilles équations de façon empirique ou à partir de certaines approches analytiques basées sur diverses hypothèses sur les régimes d'écoulement (pour une liste imposante, bien que non-exhaustive, de ces équations, voir le Tableau A1 de Gericke et Smithers 2014). Ces équations ont été développées et ajustées à partir de données observées (hydrogrammes/hyétogrammes ou hydrogrammes) provenant de BV présentant des caractéristiques très différentes, situés dans diverses parties du monde et soumis à différentes conditions climatiques.

Plusieurs organisations, à défaut de disposer de données nécessaires qui leur auraient permis de développer leur propre équation, utilisent l'une ou l'autre de ces équations. Plusieurs études, telle celle de Grimaldi *et al.* (2012), ont comparé les TC estimés à partir de diverses équations empiriques à ceux estimés à partir d'hydrogramme/hyétogramme observés. Ces comparaisons montrent, comme on est en droit de s'y attendre, qu'il n'est pas recommandé d'utiliser ces équations en des sites autres que ceux où elles ont été développées (Grimaldi *et al.* 2012). Une 'recalibration' des valeurs de paramètres de ces équations à partir de données observées permet toutefois d'améliorer sensiblement les performances de ces équations (voir p. ex. Efstratiadis *et al.* 2014).

5.2 Estimation du temps de concentration

Plusieurs approches ont été proposées pour estimer le TC à partir des séries de débits observés, préalablement découpées en hydrogrammes, ou de séries de précipitations observées et des hyétogrammes correspondants. La Figure 5.1 présente six approches

différentes permettant d'estimer des temps de réponse caractéristiques, que l'on assimile au TC, identifiés par les numéros 1 à 6 (McCuen 2009). Il ne s'agit que de quelques-unes des approches proposées dans la littérature puisque 17 méthodes ont été recensées par Singh (1984). Chacune de ces méthodes propose une façon différente d'estimer un temps équivalent au TC à partir des hydrogrammes et des hyétogrammes, chacune résultant en des valeurs différentes.

À titre d'exemple, Sheridan (1994) a développé deux équations pour estimer le TC. La première (Snyder, 1938) est basée sur l'utilisation de la durée entre le temps associé au centre de masse de la pluie nette (t_4 sur la Figure 5.1) et le temps d'occurrence du débit de pointe de l'hydrogramme (t_2 sur la Figure 5.1). La seconde a été développée en utilisant la durée entre le temps associé au centre de masse de la pluie nette (t_4 sur la Figure 5.1) et le temps d'occurrence du point d'inflexion de la relaxation de l'hydrogramme (t_3 sur la Figure 5.1) pour estimer le TC, définition proposée par Rao et Delleur (1974). Ces deux méthodes d'estimation donneront évidemment des résultats différents, la deuxième approche résultant en des valeurs plus longues du TC que la première. Cet exemple montre toute l'importance de la méthode d'estimation utilisée puisqu'elle 'concrétise' et donne une réalité au concept de TC.

De tous les estimateurs du TC présentés à la Figure 5.1, un seul, la définition 6, ne fait intervenir que l'hydrogramme, toutes les autres approches exigeant de disposer à la fois de l'hydrogramme et de l'hyétogramme correspondant. Considérant que seuls les hydrogrammes sont disponibles dans le cadre de la présente étude, le temps caractéristique de la réponse hydrologique, le TC, a été assimilé au temps de montée (TM), défini comme la durée entre le temps marquant le début du ruissellement net (t_1 sur la Figure 5.1) et le temps d'occurrence du débit de pointe (t_2 sur la Figure 5.1).

Cette équivalence trouve son origine dans Mulvany (1851) qui définit le TC de la façon suivante : «*The time which a flood requires to attain its maximum height during the continuance of a uniform rate of fall of rain*». Aujourd'hui, le TM est plus souvent défini comme : «*the time needed for the flow to change from the lowest stage to the highest stage*» et est désigné comme *time of rise* (Espey et al. 1966; Hotchkiss and McCallum 1995) ou *time to peak* (McCuen et al. 1984; Dingman 2008) ce que l'on désignera comme temps de montée. Selon Gericke et Smithers (2014), cette définition serait équivalente à celle du TC de Mulvany (1851). Bien que plusieurs auteurs aient suggéré d'utiliser conjointement les hydrogrammes et les hyétogrammes correspondants pour estimer le TC (p. ex. McCuen 2009), le nombre relativement petit de BV où des données de débits et de précipitations sont simultanément disponibles a conduit à la sélection de la définition basée sur le TM pour laquelle seuls les hydrogrammes sont nécessaires.

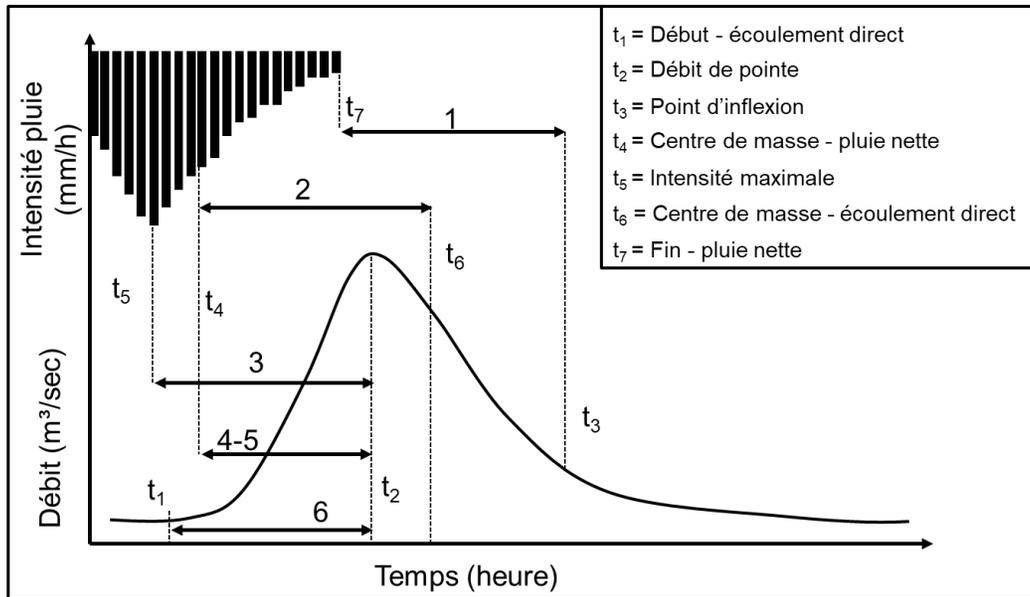


Figure 5.1 - Représentation des variables de temps (t_i) utilisées dans les différentes méthodes d'estimation du temps de concentration recensées par McCuen (2009)

Gericke et Smithers (2017) proposent d'ailleurs d'utiliser une méthode d'estimation basée sur les TM pour les BV de tailles intermédiaires à grandes (le bassin le plus petit considéré par ces auteurs est de 20 km² et le plus grand de 33 278 km²; on peut donc présumer que cette dénomination de taille intermédiaire réfère à des bassins d'environ 20 km²). L'argument de Gericke et Smithers (2017) justifiant l'utilisation de cette approche pour ce type de BV est de deux ordres : hydrologique et pratique. D'un point de vue hydrologique, l'hétérogénéité spatio-temporelle des précipitations sera plus importante pour des bassins de plus grandes tailles générant des conditions plus variables de conditions antérieures d'humidité des sols et de rétention initiale ce qui favorisera la génération d'hydrogrammes avec plusieurs pointes de débits. Ce type d'hydrogramme complique la définition d'un TC basé sur deux temps de références, l'un pour l'hétérogramme et l'autre pour l'hydrogramme. D'un point de vue pratique, ces auteurs mentionnent le faible nombre de stations météorologiques mesurant des précipitations sous-journalières (p. ex. horaire), les courts historiques disponibles et divers problèmes liés à la qualité des données enregistrées. Bien que ces problèmes, particulièrement ceux liés à la disponibilité des données de précipitations, soient présents également pour les BV de petites tailles, ces auteurs estiment que ces arguments militent en faveur de l'utilisation du TM pour l'estimation des TC pour des BV de tailles intermédiaires.

5.3 Extraction, caractérisation et sélection des hydrogrammes

Afin d'estimer les TM, il est d'abord nécessaire d'extraire les hydrogrammes des séries de débits des sites à l'étude. La présente section présente brièvement la procédure utilisée pour extraire les hydrogrammes des séries de débits mesurés (voir l'Annexe G pour plus de détails). Ces hydrogrammes seront ensuite utilisés pour l'estimation du TM. Plusieurs

caractéristiques des hydrogrammes ont par ailleurs été estimées. Ces caractéristiques sont présentées au Tableau 5.1 et schématisées aux Figures 5.2 et 5.3.

Considérant que les données de débit aux 93 sites, totalisant plus de 2 000 années valides, sont utilisées pour analyser la réponse hydrologique des BV, une méthode simple, automatique et éprouvée a été retenue pour extraire les hydrogrammes des séries de débit. Il s'agit de la méthode *Smoothed Minima Baseflow Separation* (SMBS) décrite dans *Institute of Hydrology* (1980).

La méthode SMBS de séparation des hydrogrammes comporte cinq étapes (Nathan et McMahon 1990; Piggott *et al.*, 2005; Fenicia *et al.* 2006) :

1. Partition de la série des débits enregistrés en sous-période (SP) de même durée (5 jours selon la littérature);
2. Identification du débit minimum (Q_m) de chaque SP;
3. Identification des points pivots, les points pivots correspondant aux temps où le ruissellement débute (t_1 sur la Figure 5.2) et se termine (t_3 sur la Figure 5.2); un point pivot est défini par la règle suivante : si $0.9 Q_m < \min(Q_{m-1}, Q_{m+1})$ alors le débit Q_m est identifié comme un point pivot;
4. Estimation du débit de base correspondant au débit interpolé linéairement entre les temps t_1 et t_3 (ligne hachurée de la Figure 5.2);
5. Extraction des hydrogrammes se trouvant entre les temps t_1 et t_3 .

Tableau 5.1 – Caractéristiques des hydrogrammes (voir les Figures 5.2 et 5.3 pour une représentation graphique de ces caractéristiques).

Variable	Définition
t_1	Temps où le débit dépasse le débit de base (Q_B) marquant le début de l'hydrogramme et du temps de montée (T_M)
t_2	Temps d'occurrence du débit de pointe (Q_P) et marquant la fin du temps de montée (T_M) ; dans le cas d'hydrogrammes multiples, le temps t_2 correspond au temps d'occurrence du débit de pointe, c'est-à-dire le plus élevé des débits maximums de l'hydrogramme (voir Figure 5.2).
t_3	Temps où le débit revient au débit de base (Q_B) marquant la fin de l'hydrogramme
T_M	Temps de montée : durée écoulée entre le temps où le débit de base est dépassé (t_1) et le temps d'occurrence du débit de pointe (t_2) ; dans le cas d'hydrogrammes multiples, le temps de montée T_M est défini comme la somme des temps de montée associé à chaque débit de pointe jusqu'au débit de pointe maximal (voir Figure 5.2).
T_T	Temps total de l'hydrogramme : durée écoulée entre le temps où le débit de base est dépassé (t_1) et le temps où le débit revient au débit de base (t_3)
Q_m	Débit minimum associé à chaque groupe de jours lors de l'utilisation de la méthode SMBS
Q_P	Débit de pointe : débit le plus élevé d'un hydrogramme
Q_B	Débit de base : débit associé à l'écoulement subsurfacique et à l'écoulement souterrain.

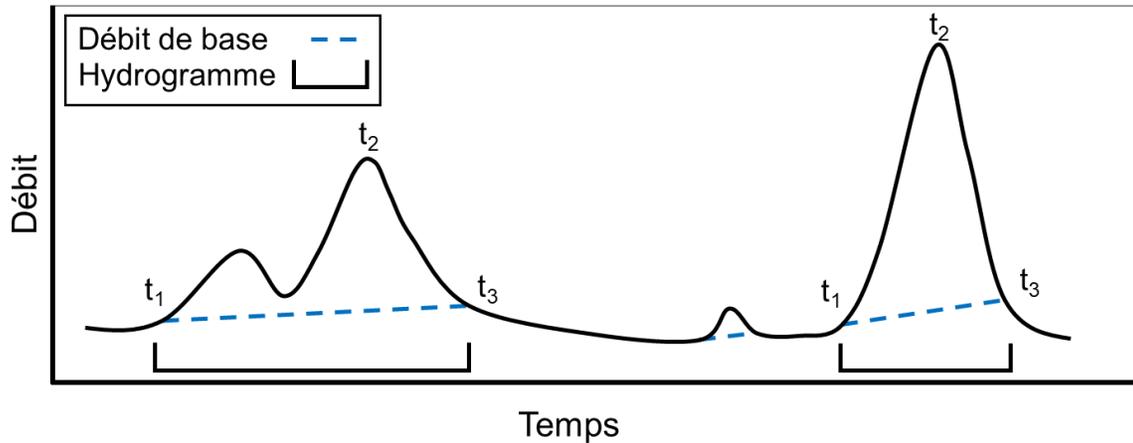


Figure 5.2 – Exemples d'hydrogrammes (t_1 : début de l'hydrogramme et du temps de montée; t_2 : temps d'occurrence du débit de pointe (Q_p) et fin du temps de montée; t_3 : temps marquant la fin de l'hydrogramme)

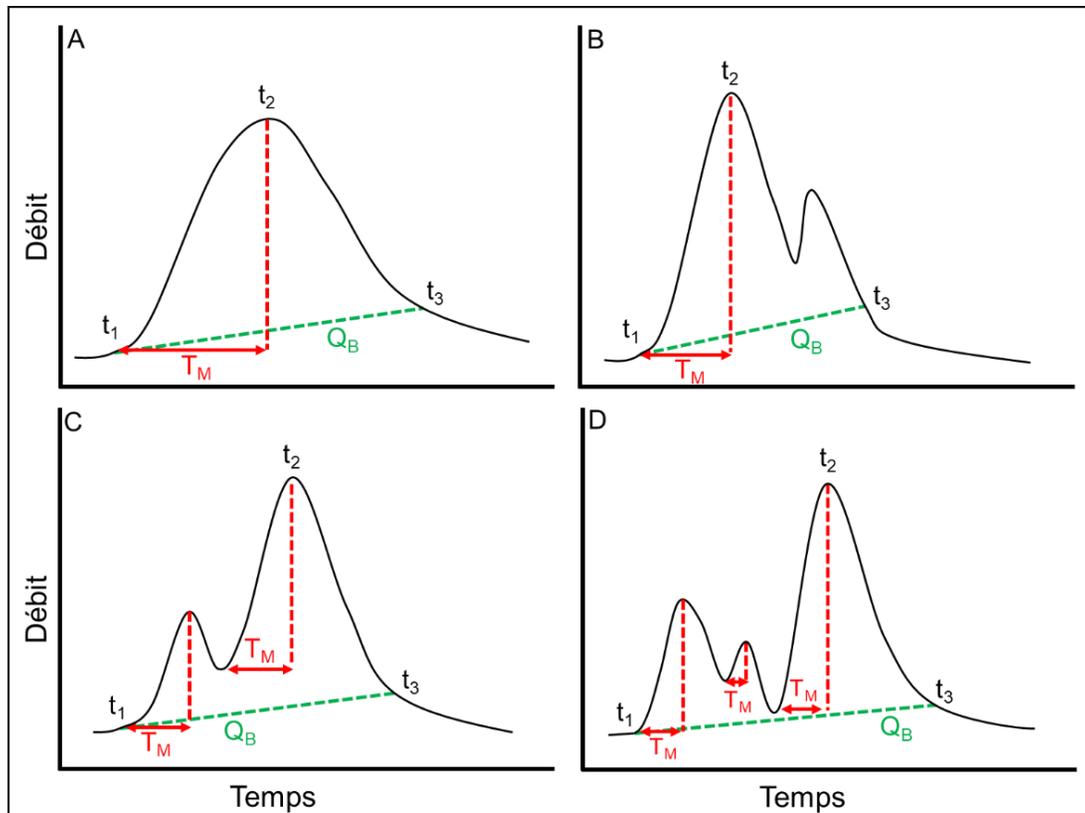


Figure 5.3 - Classification des hydrogrammes selon quatre grands types : A) hydrogramme simple; B) hydrogramme multiple avec débit de pointe maximal au début de l'hydrogramme suivi d'une ou plusieurs pointes de débits de moindres amplitudes; C) hydrogramme multiple avec débit de pointe maximal succédant à une pointe de débit de moindre amplitude; D) hydrogramme multiple avec débit de pointe maximal succédant à plusieurs pointes de débits de moindres amplitudes (voir le Tableau 5.1 pour la définition des caractéristiques des hydrogrammes).

5.4 Analyses des temps de montée des hydrogrammes retenus

L'extraction des hydrogrammes servira à caractériser la réponse hydrologique des BV à partir des caractéristiques physiographiques des BV. Pour réaliser ces analyses, le TM est utilisé pour estimer le TC (voir Section 5.2). Les TM associés aux 2.5 hydrogrammes/an en moyenne dont les débits de pointe sont les plus élevés sont considérés (p. ex. si l'on dispose de 10 années de données, les 25 hydrogrammes avec les débits de pointe les plus élevés sont considérés). De ces hydrogrammes seuls les hydrogrammes de type A et B ont été retenus (Figure 5.3). Le Tableau H.1 de l'Annexe H présente, pour chaque BV, le nombre total d'hydrogrammes retenus ainsi que leur répartition selon le type d'hydrogramme (Figure 5.3) et l'Annexe I présente le nombre d'hydrogrammes de type A et B et les différentes caractéristiques associées aux TM (temps médian, minimal et maximal).

5.4.1 Distributions des temps de montée

La Figure 5.4 présente les distributions des TM pour chacun des BV à l'étude. Les BV sont classés en ordre croissant de superficie. Quatre principaux constats ressortent de l'examen de cette figure : 1) la grande variabilité des TM pour un même BV; 2) l'absence de corrélation entre les TM et la superficie; 3) la diversité de forme des distributions, avec des moyennes et des dispersions des TM très variables selon les BV; et 4) l'asymétrie parfois importante des distributions des TM.

5.4.1.1 Variabilité des temps de montée

La variabilité des TM observée pour un même BV est souvent importante (Figures 5.4 et 5.5). La différence entre les valeurs maximales et minimales des TM observés en un BV est en moyenne de 31 heures pour les 93 BV sous étude. Ce résultat n'est pas nouveau et est largement discuté par Singh (1997) et rapporté par plusieurs auteurs (Grimaldi *et al.* 2012; Mendoza 2013; Gericke et Smithers 2016a).

Cette grande variabilité montre l'influence de facteurs autres que physiographiques sur la réponse hydrologique en temps de pluie. Ainsi, la distribution spatio-temporelle de la précipitation, la vitesse de déplacement du système météorologique et les conditions d'humidité antérieures jouent certainement un rôle majeur dans la réponse hydrologique face à un événement météorologique donné (Singh 1997). L'influence de la distribution spatiale de la précipitation est probablement moins importante toutefois pour les BV sous étude compte tenu de leurs petites tailles.

Cette variabilité des TM d'un événement de pluie à l'autre au sein d'un même BV montre également les limites de l'hypothèse voulant que la durée caractéristique de la réponse hydrologique d'un BV puisse être représentée par une valeur unique fonction des seules caractéristiques physiographiques du BV (Section 2.3). Cependant on note une certaine variabilité inter-BV des TM médians ou moyens plus grande que la variabilité des TM inter-événements au sein de chaque BV. Ceci suggère que les caractéristiques physiographiques, sans déterminer totalement les TM, jouent tout de même un rôle déterminant dans le temps de réponse hydrologique des BV.

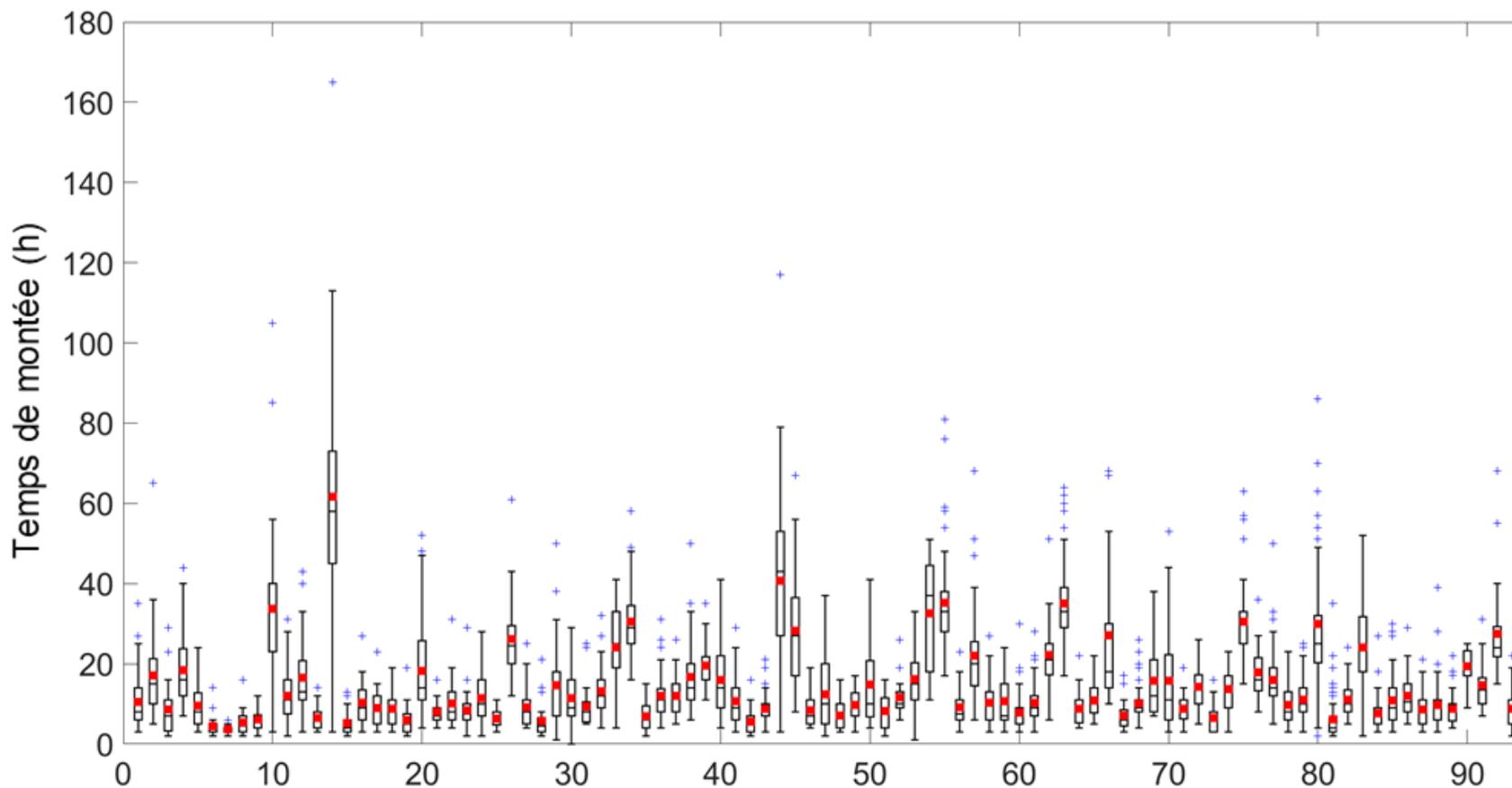


Figure 5.4 - Distribution (boxplots) des temps de montée (en heure) aux 93 BV sous étude classés en ordre croissant de superficie (0.5 à 100 km²). Le trait noir représente la médiane (2^e quartile), les limites des boîtes représentent les 1^{er} et 3^e quartiles, la moustache supérieure correspond au 3^e quartile + 1.5 (3^e quartile - 1^{er} quartile) et la moustache inférieure correspond 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). Le point rouge correspond au TM moyen.

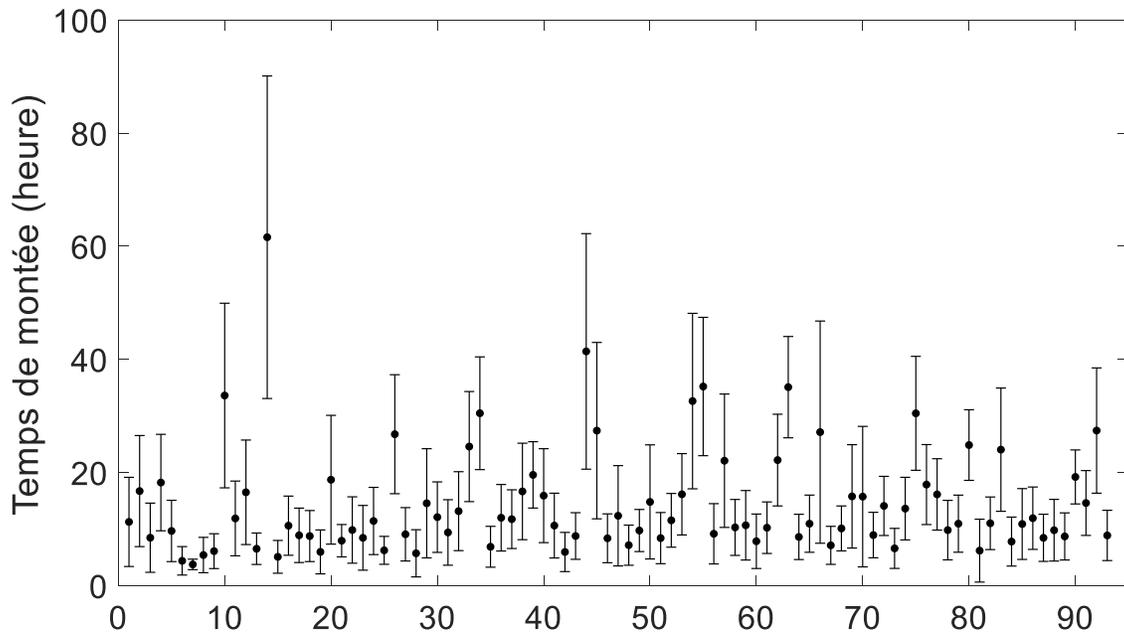


Figure 5.5 – Moyenne et écart-type des temps de montée aux 93 BV sous étude classés en rang croissant de superficie (0.5 à 100 km²)

5.4.1.2 Absence de corrélation entre temps de montée et superficie des BV

La Figure 5.6 confirme le résultat déjà manifeste à la Figure 5.4 à savoir que la superficie, pour la gamme de superficies de BV considérée (1 à 100 km²), n'est pas un facteur déterminant pour le TM. Certains des plus petits BV à l'étude peuvent avoir des TM médians équivalents ou même beaucoup plus élevés que les BV dont les superficies sont près de 100 km². A cet effet, il est intéressant de noter que le BV avec le plus grand TM médian a une superficie de moins de 10 km². Cette observation suggère que, pour des BV de 1 à 100 km², certaines caractéristiques physiographiques, autres que la surface du BV, peuvent avoir une influence majeure sur la réponse hydrologique. Une analyse plus détaillée en fonction des TM de chaque bassin semble donc nécessaire afin d'identifier les caractéristiques physiographiques déterminantes pour la réponse hydrologique.

Il est fort probable qu'une fourchette plus étendue de superficies permettrait d'établir une corrélation significative entre les TM et la superficie des BV. Plusieurs équations empiriques ont d'ailleurs été développées à partir de données provenant de BV couvrant de large gamme de superficies. C'est le cas notamment de Gericke et Smithers (2016b) qui ont utilisé des données de BV de superficies variant de 20 à 35 000 km². Ces auteurs ont développé une équation intégrant à la fois la superficie et d'autres caractéristiques fortement corrélées à la superficie (longueur totale du réseau hydrographique et distance entre le centroïde et l'aval du BV). De plus, il est possible que la prise en compte de BV couvrant une large gamme de superficies diminue l'influence d'autres caractéristiques physiographiques qui pourraient être déterminante pour les TM et les débits de pointe puisque l'impact de la superficie dominera dans ce cas.

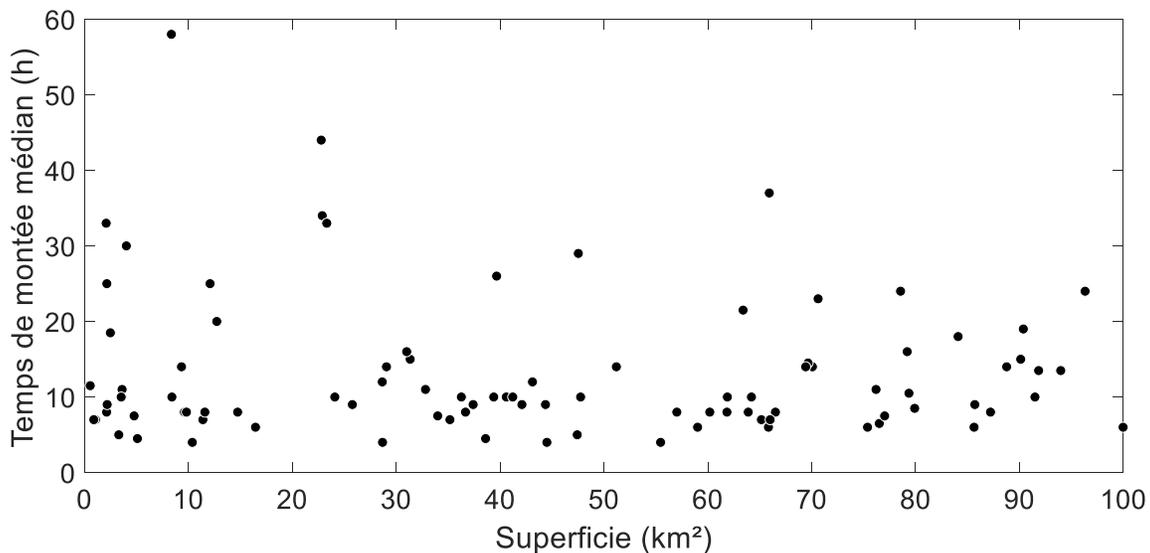


Figure 5.6 – Relation entre la superficie et le temps de montée médian aux 93 BV sous étude

5.4.2 Variabilité des temps de montée médians

La Figure 5.7 présente l'histogramme des TM médians des BV sous étude. Les TM médians se situent entre 4 et 58 heures. L'homogénéité relative des BV conditionne très certainement la possibilité d'identifier des relations statistiquement significatives entre le TM et les caractéristiques physiographiques. Ainsi dans Michaud *et al.* (2014), un coefficient de détermination (R^2) de 0.89 a été obtenu entre les TM moyens et la superficie des 22 BV sous étude dont la superficie varie de 0.07 à 27.3 km². De plus, ces BV se caractérisent par des pentes moyennes ne dépassant pas 3 % pour 16 des 22 sites (0.48 à 9.33 %), la présence de milieux humides dans seulement 5 des 22 sites (0.2 à 2.25 %) et une forte occupation agricole pour la majorité de ceux-ci.

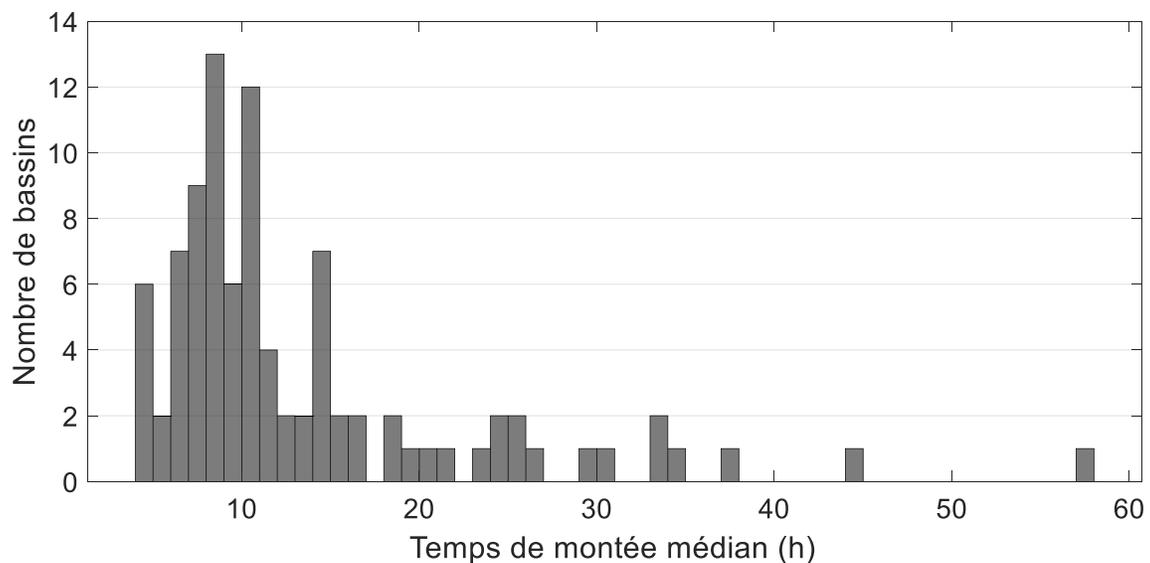


Figure 5.7 – Distribution des temps de montée médians aux 93 BV sous étude

Pour sa part, Sheridan (1994) a obtenu des coefficients de détermination supérieurs à 0.9 entre les TM et la longueur du cours d'eau principal et la superficie du BV, ces deux caractéristiques étant fortement corrélées. Les BV considérés, dont les superficies variaient de 2.6 à 334 km², ont des pentes moyennes et des pentes de cours d'eau inférieures à 1 %, aucun milieu humide et peu de lacs (< 2.5 %) et une densité de drainage similaire en chaque site (1.6 à 2.0 km/km²) et enfin une occupation du territoire assez homogène (pâturages et forêts).

5.4.3 Asymétrie des distributions des temps de montée

La Figure 5.4 montre que les distributions des TM aux BV sont souvent asymétriques avec une fraction importante de TM plus élevés. La Figure 5.8 montre par ailleurs les valeurs médianes et moyennes des TM aux différents BV et confirme donc l'existence de cette asymétrie pour une grande majorité de BV (valeur moyenne plus élevée que la valeur médiane dans la très grande majorité de cas ce qui correspond à un coefficient d'asymétrie positif). En moyenne, l'écart relatif entre ces valeurs est de 13 %, peut atteindre 55 % et peut être de près de neuf heures pour certains BV. Ce constat confirme la pertinence d'utiliser le TM médian, plutôt que le TM moyen, comme temps représentatif de la réponse hydrologique pour les BV sous étude puisque la moyenne est plus sensible aux plus grandes valeurs.

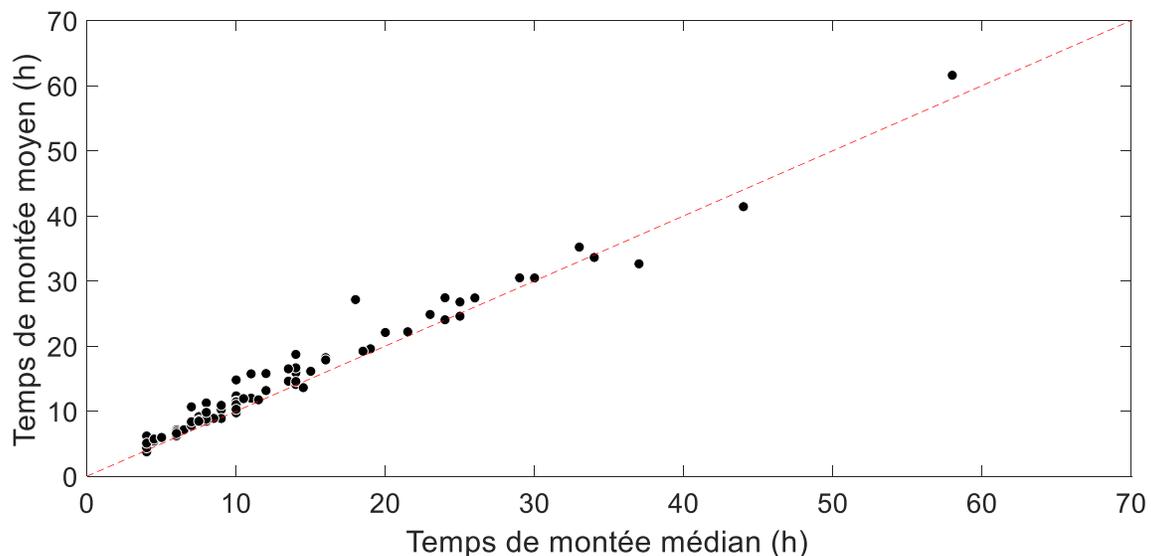


Figure 5.8 – Comparaison des temps de montée médians (en abscisse) et moyens (en ordonnée) aux 93 BV sous étude

5.5 Régression linéaire entre temps de montée et caractéristiques physiographiques

Les caractéristiques physiographiques considérées sont présentées au Tableau 5.2. Les coefficients de détermination (R^2) des régressions linéaires entre TM médians et ces caractéristiques physiographiques sont dans l'ensemble très faibles. La Figure 5.9 présente les régressions avec les caractéristiques physiographiques où le coefficient de

détermination (R^2) est supérieur à 0.005. Il est important de noter que toutes les caractéristiques du Tableau 5.2 ont été considérées. Les LMH ressortent comme le principal facteur influençant la réponse hydrologique des BV à l'étude avec un R^2 de 0.28. Le rapport $L_C/\sqrt{S_C}$, qui s'apparente à temps de parcours de l'écoulement, obtient quant à lui un R^2 de 0.13. Le pouvoir explicatif des autres caractéristiques diminue rapidement.

La Figure 5.10 montre le graphique des TM en fonction de la fraction de LMH. Bien que ces résultats suggèrent une certaine corrélation, c'est-à-dire que les BV avec une forte présence de LMH affichent des TM médians plus longs, on constate une grande dispersion des valeurs. Ainsi, certains BV ayant peu de LMH ont de très longs TM médians et vice-versa. Un constat similaire s'applique au rapport $L_C/\sqrt{S_C}$ où, dans quelques cas, de faibles valeurs de ce rapport, suggérant un temps de parcours plus court, sont associées à de longs TM. Cette figure montre bien que ces deux facteurs déterminent en partie, mais pas uniquement, le TM médian.

5.6 Comparaison des temps de montée médians aux temps de concentration estimés à partir des équations empiriques proposées

Les TM médians ont été comparés, comme cela avait été fait dans le rapport final de la Phase I du projet (Mailhot *et al.* 2018a), aux valeurs estimées à partir de 13 équations empiriques proposées dans la littérature. Ces équations sont présentées en détail à l'Annexe J. Pour plus d'informations sur ces équations, le lecteur peut consulter le rapport final de la Phase I du même projet de recherche (Mailhot *et al.* 2018a, Chapitre 6).

La Figure 5.11 présente un résumé de ces résultats et montre qu'aucune des équations proposées ne permet une estimation adéquate du TM médian aux 93 BV sous étude. En ce qui concerne plus spécifiquement les équations FAA (FAA, 1970) et Williams (Williams, 1922), lesquelles se retrouvent dans le Manuel de conception des ponceaux (MCP, Transports Québec, 2017), la Figure 5.12 montre que dans les deux cas, ces équations sous-estiment quasi-systématiquement, et parfois de façon importante, les TM médians aux BV.

Ces résultats ne sauraient surprendre puisque ces équations ont été développées à partir de données provenant d'un plus ou moins grand nombre de BV dont les caractéristiques physiographiques peuvent être très différentes des BV du Québec et soumis à des conditions climatiques elles aussi très différentes. La transposabilité de ces équations empiriques à d'autres BV que ceux pour lesquels elles ont été développées reste très discutable et peut s'avérer problématique.

Tableau 5.2 - Caractéristiques physiographiques des bassins-versants considérées dans le cadre de la présente étude

Caractéristiques	Description/Abréviation/Symbole	Unité	Annexe ¹
Superficie	A	km ²	D.1
Pente moyenne du BV	S _B	%	D.2
Longueur du cours d'eau principal	L _C	km	D.3
Pente moyenne du cours d'eau	S _C	%	D.4
Longueur du réseau hydrographique	L _{RH}	km	D.5
Densité de drainage	D _D	km	D.6
Forme du bassin-versant	W	km	D.7
Occupation du territoire	Forestier (Arbre et arbuste)	%	D.8
	Agricole (culture et pâturage)		
	Urbain		
	Lac et milieux humides (LMH)		
Classification hydrologique des sols	Groupe hydrologique A et B (GH-AB)	%	D.9
	Groupe hydrologique C et D (GH-CD)		
Connectivité des lacs et milieux humides	C	%	D.10
Séparation du réseau hydrographique	S _{RH}	%	D.11
Position des lacs et milieux humides	N/A	%	D.12

1. Cette colonne indique l'annexe à consulter pour une définition de la caractéristique et la procédure utilisée pour son estimation.

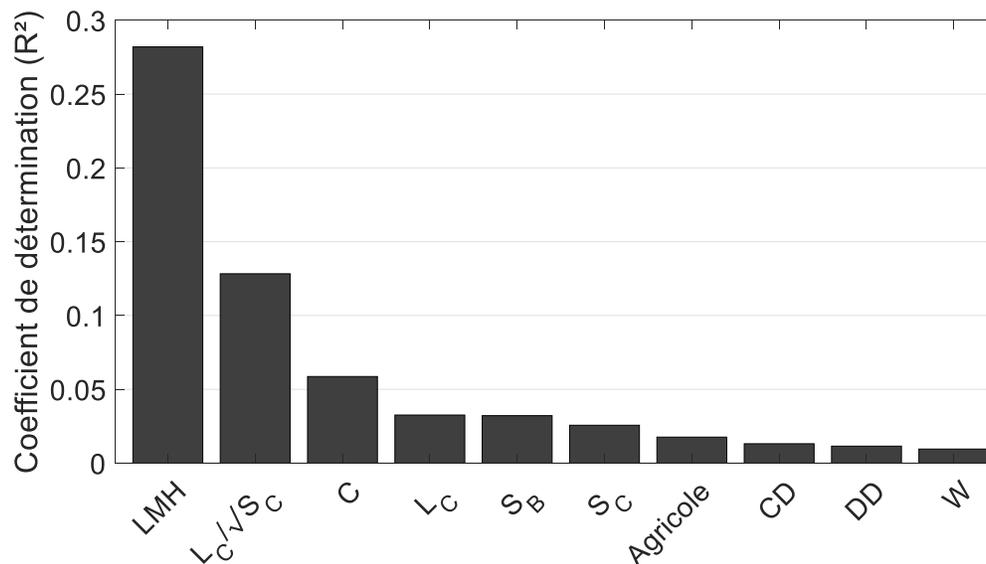


Figure 5.9 – Coefficient de détermination (R²) des régressions linéaires entre les temps de montée médians et diverses caractéristiques physiographiques (voir Tableau 5.2). Seules les caractéristiques avec des corrélations supérieures à 0.005 sont présentées.

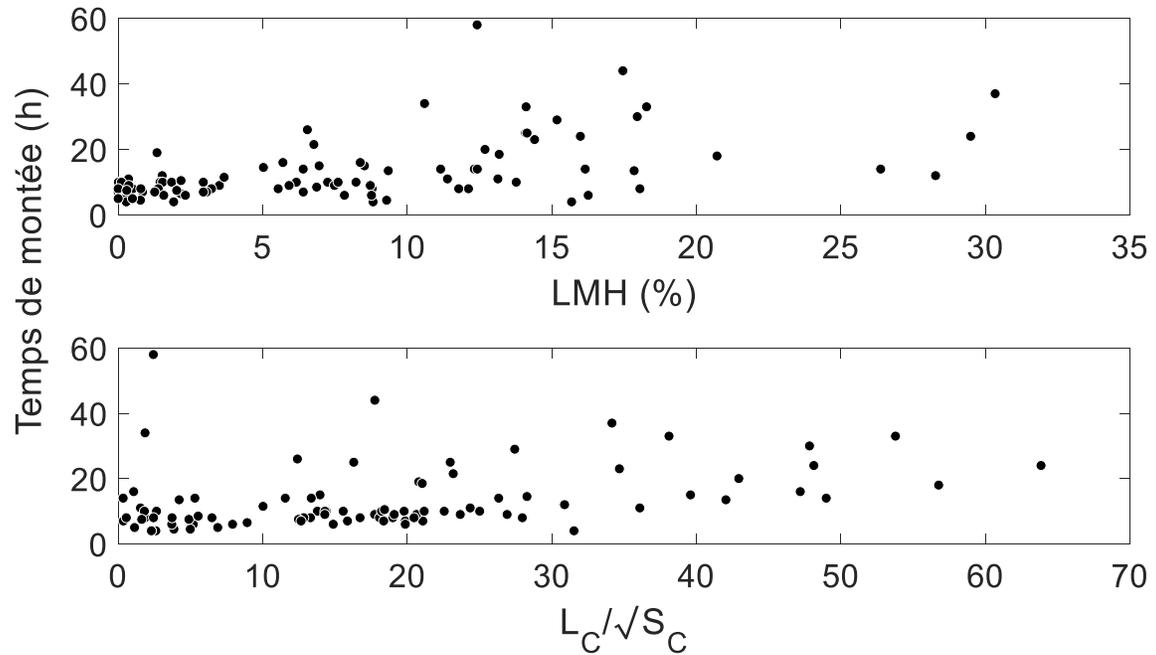


Figure 5.10– Relation entre temps de montée médians de chaque BV à l'étude et l'occupation en lacs et milieux humides (LMH; en %) et le rapport entre la longueur du cours d'eau (L_C) et la pente du cours d'eau (S_C)

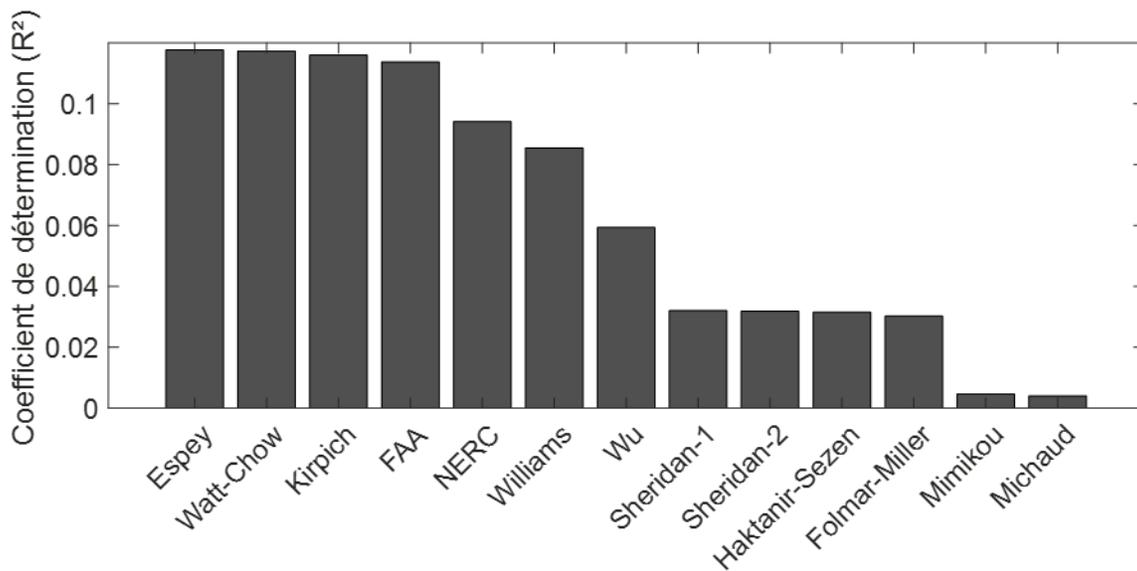


Figure 5.11 – Coefficient de détermination (R^2) entre les temps de montée médians et les temps de concentration estimés selon différentes équations empiriques de la littérature (voir Tableau J.1 de l'Annexe J pour les références).

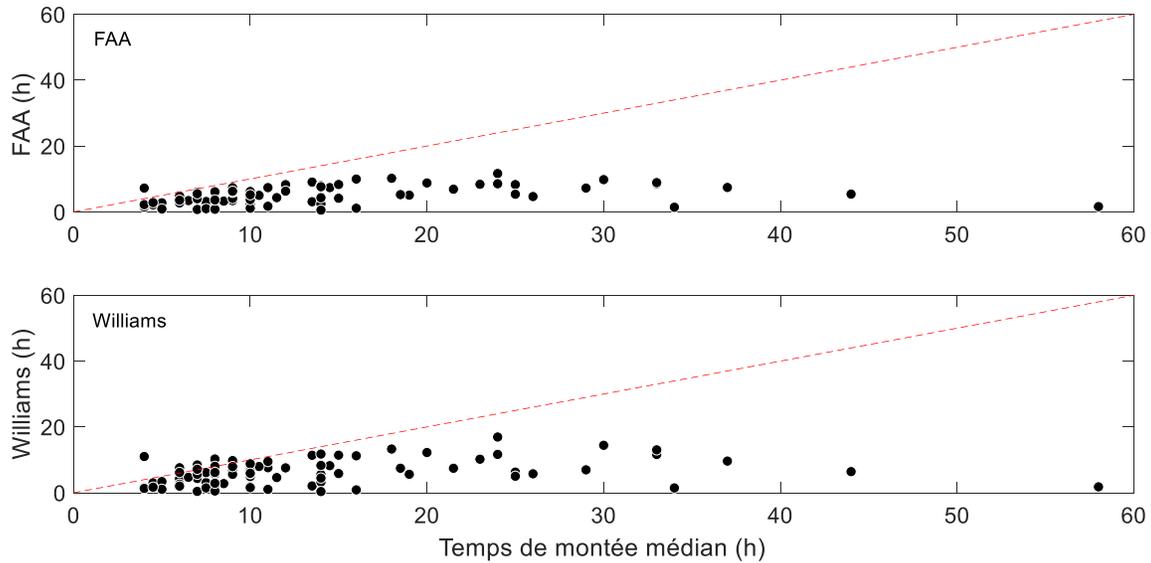


Figure 5.12 - Comparaison des temps de montée médians et des temps de concentration estimés à partir des équations empiriques FAA (1970) et Williams (1922)

Tableau 5.3 - Équations considérées, valeurs des paramètres de régression et coefficient de détermination (R^2) selon différentes formulations liant temps de concentration et certaines caractéristiques physiographiques des BV sous étude (voir le Tableau 5.2 pour une description de ces variables et de leurs unités). Le temps de concentration est exprimé en heure et les paramètres à ajuster représentés par a , α , β , et γ .

Équation	Référence	Paramètres	R^2
$TC = a \left(\frac{L_C^\alpha}{S_C^\beta} \right)$	Espey et al. (1966)	$a = 10.77$ $\alpha = 0.05$ $\beta = 0,18$	0.15
$TC = a \left(\frac{L_C}{\sqrt{S_C}} \right)^\alpha$	Kirpich (1940) NERC (1975) Watt et Chow (1985)	$a = 8.30$ $\alpha = 0.16$	0.12
$TC = a \frac{L_C}{(S_C^2 A)^\alpha}$	Williams (1922)	$a = 1.57$ $\alpha = 0.11$	0.05
$TC = a \frac{A^\alpha}{S_C^\beta L_C^\gamma}$	Wu (1963a,b)	$a = 9.29$ $\alpha = -0.32$ $\beta = 0.14$ $\gamma = -0.55$	0.18

5.7 Développement d'une équation empirique du temps de concentration

Les équations empiriques du TC les plus couramment utilisées ont été reprises et les paramètres de ces équations ajustés aux TM médians des BV sous étude. Le Tableau 5.3 rend compte des résultats obtenus. Ce tableau montre très clairement que même après ajustement des paramètres de ces équations aux BV sous étude, aucune ne donne de résultats satisfaisants et ne permet d'estimer adéquatement les TM médians estimés à ces BV. Il convient de noter qu'aucune de ces équations ne comptent comme variable explicative la fraction de LMH qui, selon les analyses présentées précédemment, serait le facteur dominant pour expliquer les TC des BV sous étude.

5.8 Résumé et conclusion

Les analyses précédentes des TM aux BV sous étude (Section 5.4) conduisent aux constats suivants :

- La variabilité des TM associés aux hydrogrammes d'un BV donné montre l'impact important de facteurs autres que les seules caractéristiques physiographiques tels la variabilité spatio-temporelle des précipitations et des conditions antérieures d'humidité. Cette variabilité montre que le temps de concentration, que l'on assimile ici au TM, est une caractéristique difficile à estimer et qu'elle doit être associée à une statistique des distributions des TM, dans le cas présent la médiane. C'est ce qui explique que le TM médian d'un BV a été choisi comme le temps représentatif du TC de ce BV.
- Les très faibles corrélations entre la superficie des BV à l'étude et les TM indique que la réponse hydrologique est conditionnée par d'autres facteurs que la superficie des BV. Ce résultat est confirmé par l'examen de certains BV spécifiques où la réponse hydrologique est très nettement conditionnée par certaines caractéristiques physiographiques. Ce résultat montre la difficulté d'identifier un ou quelques facteurs physiographiques qui pourraient expliquer à eux seuls les TM pour l'ensemble des BV sous étude. La diversité et l'hétérogénéité physiographique des BV sous étude (pente, milieux humides, occupation du territoire, etc.), représentative des BV du Québec méridional, montre qu'une multiplicité de facteurs peuvent jouer et conditionner dans une plus ou moins grande mesure le temps de réponse et dès lors le TC.
- Bien que tous les BV soient de petite superficies, les TM médians varient considérablement d'un BV à l'autre montrant, encore une fois, que plusieurs caractéristiques physiographiques sont déterminantes sur les TM.

Les analyses visant à utiliser les équations empiriques rapportées dans la littérature pour estimer les TC aux BV sous étude (Sections 5.5 à 5.7) conduisent aux constats suivants :

- La présence de LMH est la caractéristique qui explique le mieux la réponse hydrologique des BV sous étude avec un R^2 de 0.28.
- La comparaison entre les TM médians et les TC obtenus à partir des équations empiriques les plus couramment utilisées montre qu'aucune d'entre elles n'est en mesure d'estimer adéquatement les TM médians.

- Les équations empiriques FAA et Williams, utilisées dans le Manuel de conception des ponceaux (Transports Québec, 2017) sous-estiment quasi- systématiquement les TM médians et parfois de manière importante.
- L'ajustement des équations les plus couramment utilisées pour l'estimation des TC aux données disponibles aux BV sous étude, bien qu'il améliore la situation par rapport à une utilisation de l'équation dans sa version originelle, ne permet pas d'obtenir des TC reproduisant adéquatement les TM médians observés.

En conclusion, il est donc nécessaire de développer une approche permettant d'estimer les TC pour les BV du Québec qui tienne compte des spécificités de ces derniers et assure une utilisation optimale des données locales colligées dans le cadre de cette étude.

Chapitre 6. Estimation des temps de concentration par la méthode des arbres de régression

La méthode par arbre de classification ou par arbre de régression (*classification and regression trees*; Loh, 2011) est proposée pour identifier les facteurs clés à considérer pour l'estimation des temps de concentration (TC). Ce type de méthode est utilisé dans le but de construire un modèle de prédiction à partir de différents jeux de données et donc des principales catégories ou caractéristiques physiographiques à considérer pour l'estimation des TC.

Les méthodes dites de partitionnement récursif ou de segmentation datent des années 1960. Elles consistent à déterminer un ensemble de conditions logiques de partition du type Si/Alors afin de prévoir aussi précisément que possible les valeurs ou classifications prévues des observations. Breiman *et al.* (1984) les ont formalisées dans un cadre générique de sélection de modèle sous l'acronyme de CART (*Classification and Regression Tree*). Ce dernier correspond à deux situations bien distinctes selon que la variable à expliquer, modéliser ou prévoir est qualitative (classification) ou quantitative (régression). L'Annexe K présente une description plus technique de l'approche par arbre de régression.

L'intérêt d'utiliser une telle approche est qu'elle permet une classification systématique et hiérarchique des facteurs explicatifs clefs. Dans le cas présent, comme le montrera les sections suivantes, l'application de cette approche permet de construire une arborescence où chaque niveau identifie le facteur dominant. La simplicité de mise en place de ce type de démarche (les codes des algorithmes sont disponibles et faciles à utiliser) de même que la reproductibilité des résultats sont également à considérer. Finalement, il convient de souligner la simplicité d'utilisation de l'arbre final et la facilité avec laquelle il peut être mis à jour lorsque de nouvelles données sont disponibles.

6.1 Arbres de régression obtenus

L'application de l'approche par arbre de régression aux 93 BV sous étude résulte en une première division selon la plus ou moins grande fraction de lacs et milieux humides (LMH) (Figure 6.1, partie D-1). Cette division sépare d'un côté une majorité de BV dont les LMH occupent moins de 10 % de la superficie et de l'autre côté les BV dont l'occupation en LMH est supérieure à 10 %. À elle seule, cette division permet d'obtenir un R^2 de 0.28 lorsqu'elle est comparée aux temps de montée (TM) médians observés. Ces résultats vont de paires avec ceux présentés à la Section 5.5 où les LMH apparaissaient comme étant la caractéristique expliquant le mieux la réponse hydrologique des BV sous étude.

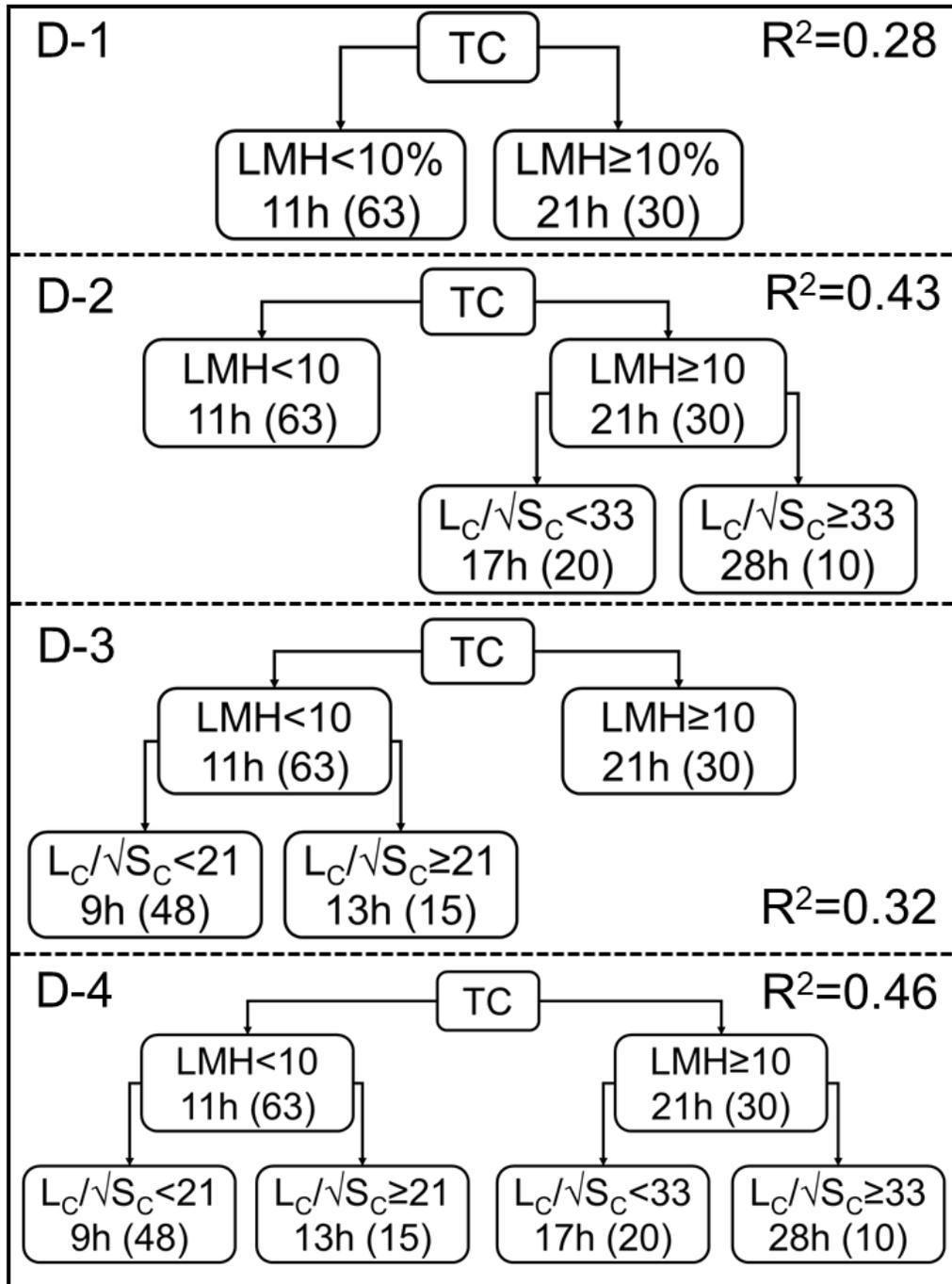


Figure 6.1 – Division initiale (D-1), intermédiaires (D-2 et D-3) et finale (D-4) en fonction de la fraction de lacs et milieux humides (LMH) et de la valeur de $L_c/\sqrt{S_c}$ (L_c : longueur du cours d'eau principal; S_c : pente moyenne du cours d'eau) obtenues après application de la méthode des arbres de régression. Le nombre de BV dans chaque groupe est indiqué entre parenthèses et le TC de chaque groupe en bas à gauche.

Les deuxième et troisième divisions (D-2 et D-3) conduisent à une subdivision des deux premiers groupes en fonction du rapport $L_C/\sqrt{S_C}$, couramment utilisé dans les équations empiriques du TC (Kirpich, 1940; NERC, 1975; Watt et Chow, 1985, voir Section 5.7). La seule subdivision du groupe $LMH \geq 10\%$ en fonction du rapport $L_C/\sqrt{S_C}$ résulte en un R^2 de 0.43 et de celle du groupe $LMH < 10\%$ en un R^2 de 0.32. Un R^2 de 0.46 est obtenu lorsque le rapport $L_C/\sqrt{S_C}$ est considéré dans les deux groupes issus de la première division (Figure 6.1, partie D-4).

Ce dernier arbre permet d'obtenir des résultats satisfaisants si on le compare aux résultats obtenus suite à l'application de méthodes existantes d'estimation du TC (Section 5.6) et le développement d'une équation empirique du TC (Section 5.7). Le Tableau I.1 de l'Annexe I présente les TC estimés à partir de l'arbre D-4 aux 93 BV sous étude.

La division suivante proposée par la méthode par arbre de régression concerne le groupe de 20 BV pour lequel $LMH \geq 10\%$ et $L_C/\sqrt{S_C} < 33$. Toutefois, cette division ne permet pas d'obtenir deux groupes incluant au moins chacun 10 BV qui est le nombre minimal de BV fixé pour qu'une division soit acceptable.

Une autre division proposée concerne le groupe de 48 BV satisfaisant aux critères $LMH < 10\%$ et $L_C/\sqrt{S_C} < 21$ (Figure 6.2). Deux sous-groupes sont ainsi définis en fonction du pourcentage d'occupation agricole des BV (Agr), un premier de 27 BV où l'occupation agricole est supérieure à 8 % et un second de 21 BV où l'occupation agricole est inférieure à 8 %. Toutefois, l'ajout de ce niveau supplémentaire ne permet pas d'améliorer le R^2 de manière significative (0.46 versus 0.47) et n'a donc pas été retenu.

La Figure 6.3 présente les écarts absolus entre les TM médians à chaque BV sous étude et, d'une part, les TC estimés partir des équations empiriques du TC telles que proposées dans le Manuel de conception des ponceaux (MCP, équations FAA et Williams; Transports Québec, 2017) et, d'autre part, les TC estimés selon les quatre arbres de la Figure 6.1. Ces résultats confirment les sous-estimations quasi-systématiques des TC par les équations empiriques dont il a déjà été question à la Section 5.6. Ces sous-estimations pourront se traduire, dans le cadre de la MÉRA, par des surestimations plus ou moins importantes des débits de conception.

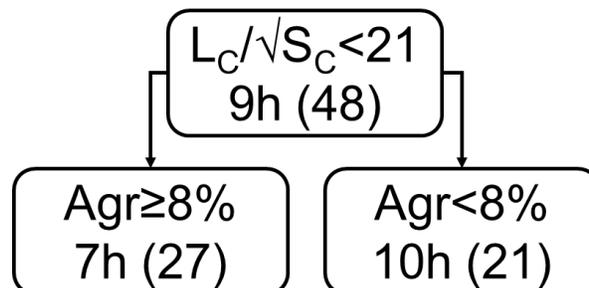


Figure 6.2 – Division supplémentaire de l'arbre D-4 du groupe de 48 BV ($LMH < 10\%$ et $L_C/\sqrt{S_C} < 21$ km)

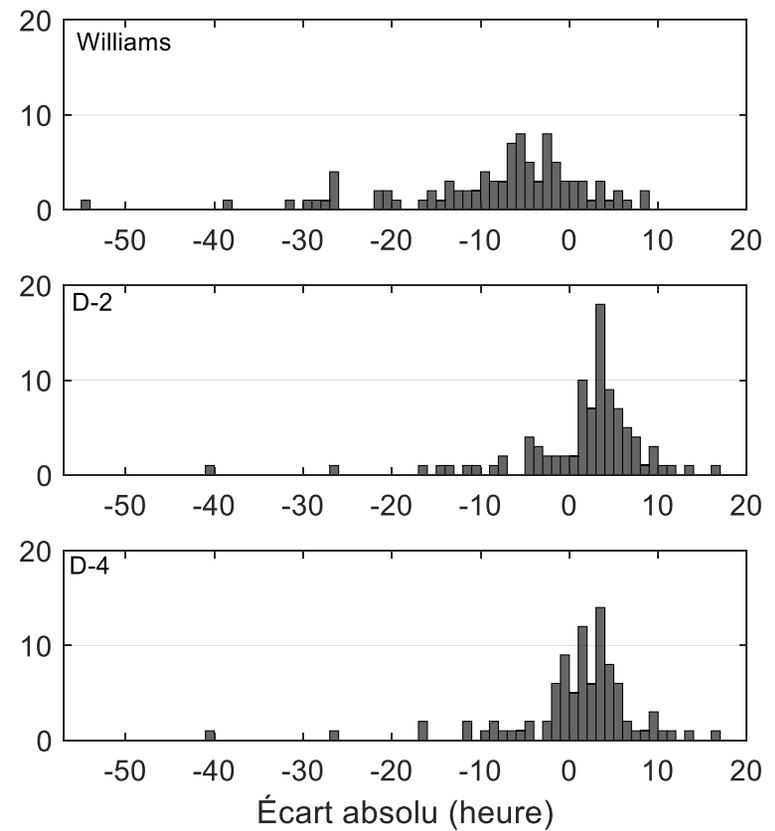
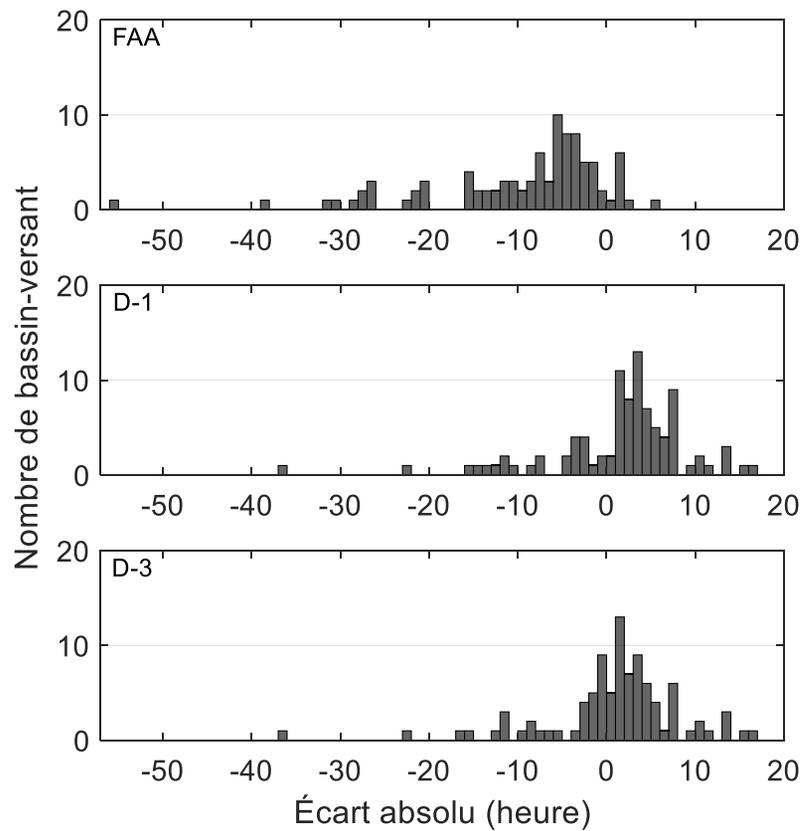


Figure 6.3 – Histogrammes des écarts absolus (heure) (estimé – observé) entre les TM médians des BV sous étude et les TC estimés à partir des équations FAA et Williams proposées dans le Manuel de conception des ponceaux (première ligne) et par les arbres D-1, D-2, D-3 et D-4 de la Figure 6.1 (deuxième et troisième lignes)

Les écarts associés aux différents arbres de la Figure 6.1, et notamment de l'arbre D-4, réduisent les écarts moyens mais résultent en des surestimations des TM médians sur plusieurs BV. De telles surestimations pourraient conduire à des sous-estimations des débits de conception par la MÉRA. Cet aspect sera discuté plus en détail au Chapitre 8.

6.2 Analyse de l'arbre de régression retenu

L'arbre retenu, correspondant à l'arbre D-4 de la Figure 6.1, comprend quatre groupes, désignés dans ce qui suit par G-1, G-2, G-3 et G-4 (voir Tableau 6.1). La Figure 6.4 montre les distributions des TM des BV de chaque groupe et la valeur de TC correspondante. Les valeurs de TC sont croissantes du groupe G-1 au groupe G-4. Le groupe G-1 correspond aux BV avec peu de LMH et un temps de parcours plus courts, ces deux facteurs favorisant des TC courts. À l'autre bout du spectre, le groupe G-4 comprend beaucoup de LMH et les temps de parcours sont plus longs, résultant en des TC très longs. Les groupes G-2 et G-3 sont intermédiaires avec, pour le groupe G-2 peu de LMH mais de longs temps de parcours et, pour le groupe G-3 beaucoup de LMH mais des temps de parcours courts. La Figure 6.4 permet de constater que les TC attribués à chaque groupe recourent les TM de BV se trouvant dans les autres groupes compte tenu des incertitudes d'estimation des TC.

La Figure 6.5 montre par ailleurs les écarts absolus entre les TM médians et les TC estimés à partir de cet arbre pour chacun de ces groupes. On remarque que pour le G-1, les écarts absolus sont majoritairement centrés entre -1 et +5 heures bien que ce soit le groupe avec le plus de BV (48). Cela peut expliquer qu'une division supplémentaire de ce groupe ne se traduise pas par une amélioration significative du R^2 tel que discuté à la section précédente. Pour le groupe 2 (G-2), les résultats sont similaires avec des écarts absolus se situant majoritairement entre -3 et +6 heures.

Le groupe 3 (G-3) est celui pour lequel les écarts sont les plus grands. Globalement, les écarts se situent dans la fourchette ± 10 heures sauf dans quelques cas où les TC sont largement sous-estimés. La situation est relativement semblable pour le groupe 4 (G-4) excepté que le nombre de sous-estimations majeures des TC est plus faible. Il convient enfin de noter que le groupe G-4 est celui où l'on compte le plus petit nombre de BV.

Les principaux cas de sous-estimations et de surestimations des TC estimés par l'arbre D-4 par rapport aux TM médians calculés aux BV sous étude sont analysés et discutés à l'Annexe L. Il est important de noter toutefois qu'aucune modification de la méthode d'estimation des TC n'est proposée suite à ces analyses. L'Annexe L vise plutôt à montrer que plusieurs caractéristiques et facteurs spécifiques peuvent expliquer ces différences et qu'un examen attentif des BV est nécessaire lorsque l'arbre D-4 est utilisé pour estimer le TC d'un BV quelconque. Les analyses de l'Annexe L donnent des pistes en ce sens et aide le praticien à identifier les cas possiblement problématiques. Par principe de précaution, il pourra alors corriger de façon *ad hoc* le TC estimé par l'arbre D-4 de sorte à limiter d'éventuelles sur- ou sous-estimations du TC et en arriver à des valeurs plus réalistes. Cette évaluation devra s'appuyer sur des considérations locales et les conséquences d'un possible sous-dimensionnement de l'ouvrage.

Tableau 6.1 – Description des quatre groupes de l'arbre D-4 (Figure 6.1)

Groupe	Caractéristiques physiographiques		Temps de concentration moyen (h)	Nombre de BV
G-1	LMH < 10%	$L_C/\sqrt{S_C} < 21$	9	48
G-2		$L_C/\sqrt{S_C} \geq 21$	13	15
G-3	LMH \geq 10%	$L_C/\sqrt{S_C} < 33$	17	20
G-4		$L_C/\sqrt{S_C} \geq 33$	28	10

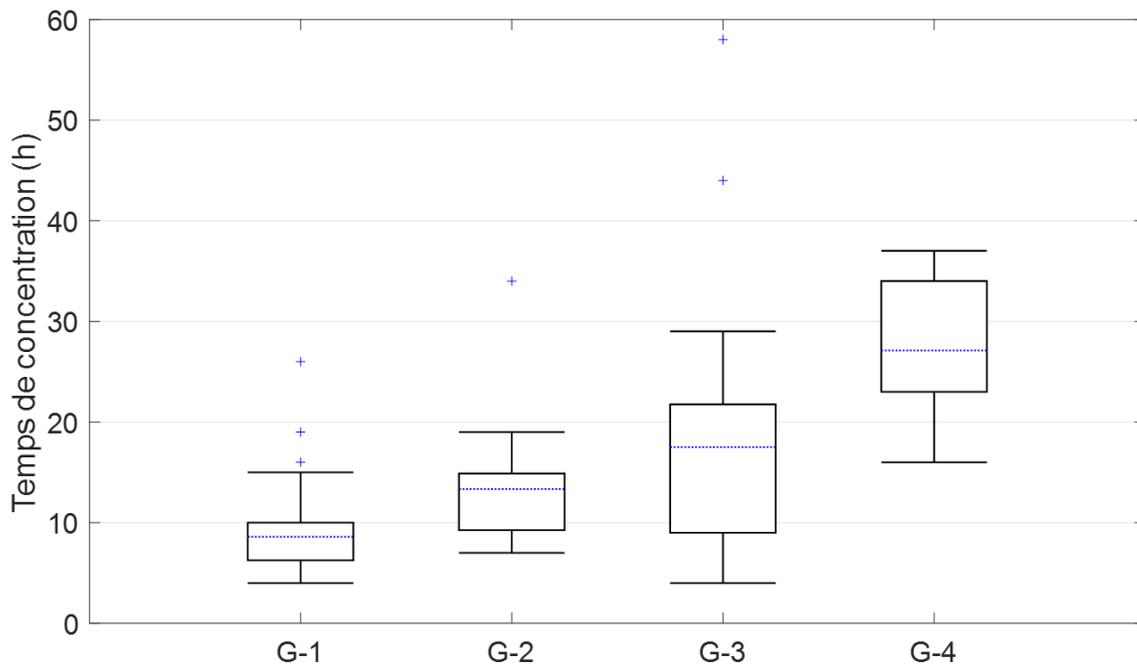


Figure 6.4 - Distributions des TM médians des BV classés dans les quatre groupes G-1 à G-4 selon l'arbre D-4. Les lignes horizontales bleues en pontillées correspondent aux valeurs de TC attribuées à chaque groupe.

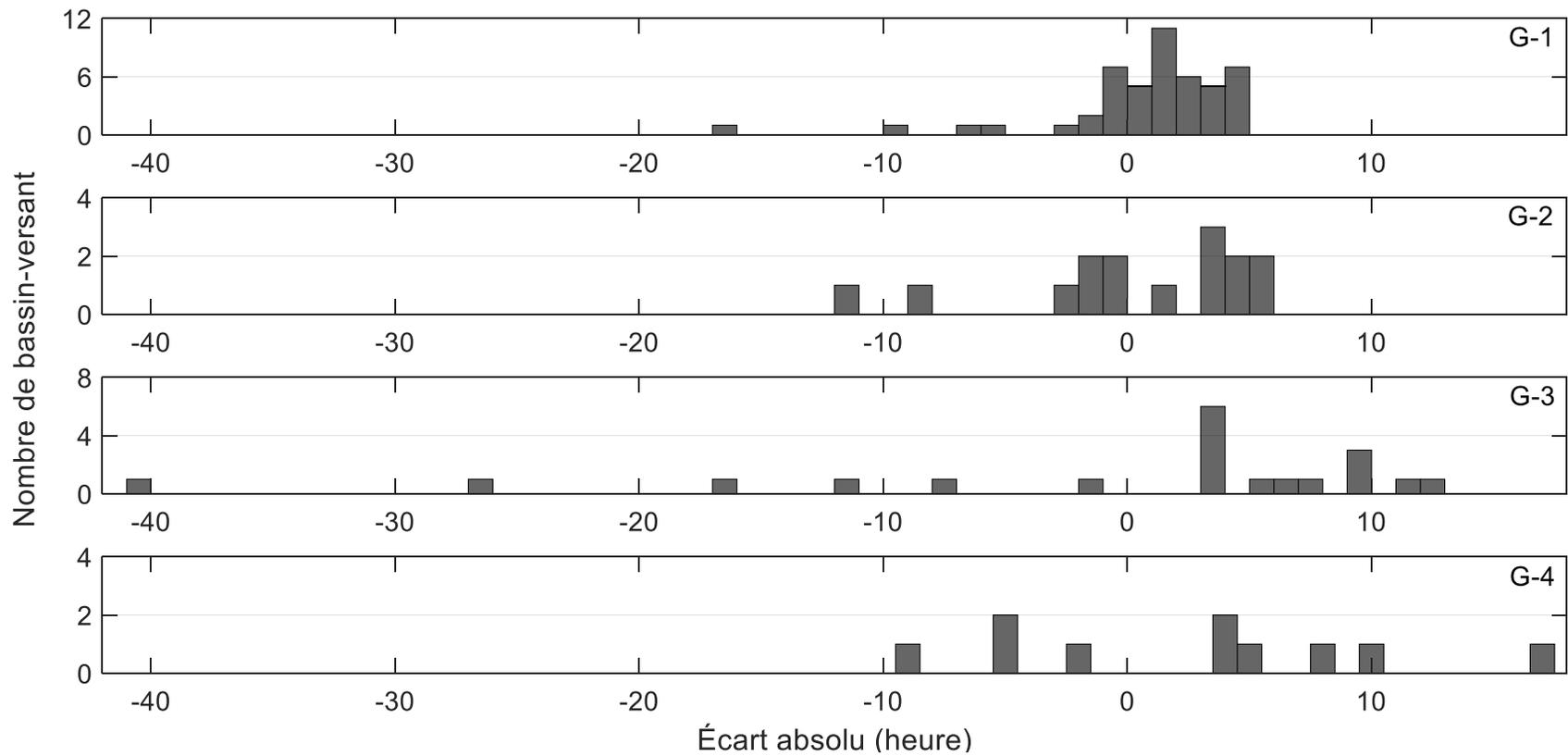


Figure 6.5 - Écarts absolus (heure) (estimé – observé) entre les TM médians des BV sous étude et les TC estimés à partir de l'arbre D-4 pour chacun des groupes G-1 à G-4 (voir Figure 6.1 et Tableau 6.1)

6.3 Résumé et conclusion

En conclusion, l'arbre D-4 de la Figure 6.1 est recommandé pour l'estimation des TC aux BV du Québec dont :

- Superficies comprise entre 1 et 100 km² (cet aspect est discuté plus en détail à la Section 8.2);
- Pente moyenne du BV inférieure à 25%;
- Occupation urbaine inférieure à 20%;
- Fraction de LMH inférieure à 30%.

Selon les données colligées aux 93 BV sous étude, il intègre les caractéristiques physiographiques les plus importantes, la fraction de LMH et le temps de parcours ($L_C/\sqrt{S_C}$) à considérer pour l'estimation du TC.

Advenant qu'un BV présente des caractéristiques très différentes de celles des BV considérés dans le cadre de la présente étude, un examen critique de ce BV est essentiel de même qu'une évaluation de la vraisemblance de la valeur du TC proposée par l'arbre de régression. L'utilisateur doit être conscient que les BV utilisés pour construire l'arbre D-4 ne couvrent pas toute la gamme des BV possibles et qu'un BV donné avec des caractéristiques très différentes de celles des BV sous étude pourra avoir un TC sensiblement différent de celui proposé par l'arbre de régression. L'utilisateur devra donc examiner de façon critique la valeur proposée et déterminer s'il ne devrait pas de façon *ad hoc* modifier cette valeur en fonction des conditions locales. Ainsi, advenant une présence importante de zones urbaines, il pourra juger opportun de réduire le TC ou en présence d'une fraction très importante de LMH d'augmenter cette valeur. Aucune règle générale ne peut être émise sur les augmentations ou diminutions à appliquer. L'utilisateur devra donc s'appuyer sur son expérience, son expertise et son jugement.

L'utilisation d'une approche par arbre de régression offre un certain nombre d'avantages par rapport aux méthodes conventionnelles de types équations empiriques :

- Elle permet d'identifier de façon systématique et ordonnée les caractéristiques physiographiques qui expliquent le mieux les TM médians observés aux BV;
- Une mise à jour de l'arbre se fait rapidement et simplement lorsque de nouvelles données sont disponibles;
- L'arbre proposée est d'application simple;
- Les valeurs de TC attribuées à chaque groupe de l'arbre sont discrètes contrairement à une équation empirique où les valeurs sont continues; ce caractère 'catégoriel' permet de mieux apprécier les incertitudes relativement importantes des TC estimés;
- La méthode met très clairement en lumière les valeurs limites proposées contrairement à une approche de type équation empirique; ainsi, dans le cas de l'arbre D-4 les TC minimal et maximal sont de 9 heures et 28 heures, la méthode ne permet donc pas 'd'extrapolation' au-delà de ces valeurs contrairement à une équation empirique où la variable dépendante peut être calculée, en principe, pour

toute valeur de la variable indépendante, même si cette valeur peut se trouver à l'extérieur des valeurs de l'échantillon ayant servi à établir cette équation.

Certaines mises en garde sont toutefois nécessaires lors de l'application d'une approche par arbre de régression et plus spécifiquement de l'arbre D-4 :

- La méthode pouvant générer des arbres très ramifiés, il est donc essentiel de s'assurer que le niveau de ramification a un sens en terme statistique par exemple en s'assurant qu'un nombre minimal de BV est inclus dans chaque groupe créé (dans le cas présent un minimum de 10 BV devait faire partie de chaque groupe);
- À titre d'approche de type 'boîte noire', il est crucial de s'assurer de la 'vraisemblance hydrologique' de l'arbre créé; tout résultat contre-intuitif doit être examiné avec circonspection et éliminé s'il est jugé non hydrologiquement fondé; dans le cas présent, une analyse sommaire (voir section précédente) confirme la plausibilité de l'arbre D-4;
- Il est très important lors de l'application de l'arbre D-4 de s'assurer que les TC estimés ne sont pas attribués à des BV qui se distinguent de façon marquée des 93 BV utilisés pour construire l'arbre D-4. Une analyse préliminaire du BV où l'arbre D-4, et de façon plus générale la MÉRA, est appliqué est essentielle.

Chapitre 7. Révision des coefficients de ruissellement (CR)

L'interprétation que l'on peut donner du coefficient de ruissellement (CR) varie selon les auteurs. L'approche traditionnelle ou déterministe veut que le CR exprime la relation entre le volume de ruissellement et le volume de pluie pour chaque événement de pluie (on parle alors de CR volumétrique; Wong 2002; Dhakal *et al.*, 2012). Une seconde interprétation, dite probabiliste, consiste à dire que cette valeur correspond au rapport du débit de pointe spécifique et de l'intensité maximale de pluie de durée égale au temps de concentration (TC) du BV de même période de retour (PdR) tel que défini par l'équation de la MÉRA et on parlera alors de coefficient de ruissellement rationnel (Dhakal *et al.*, 2012).

Le CR ainsi défini établit un lien entre le débit maximal annuel (DMA) de PdR donnée et l'intensité de pluie de même PdR. Tel que discuté à la Section 2.4, ce CR intègre à la fois les impacts hydrologiques de l'infiltration et de la rétention (réduction des volumes disponibles pour le ruissellement) et les impacts du laminage (apports distribués dans le temps). L'expression 'coefficient de ruissellement' est donc, dans une certaine mesure, réductrice et inappropriée. Elle sera toutefois conservée dans la suite de ce document.

L'attribution d'une valeur de CR à un BV donné exige donc de considérer toutes les caractéristiques physiographiques susceptibles d'avoir un impact sur les volumes de ruissellement et le laminage des débits. Des tables de valeurs ont ainsi été proposées pour différentes occupations du territoire (milieux urbains, naturels, lacs et milieux humides) ou encore en fonction de la capacité d'infiltration des sols et les groupes hydrologiques. La section 7.1 présente une revue critique de ces valeurs (l'Annexe H regroupe plusieurs tableaux de valeurs proposées dans la littérature).

Le Tableau 7.1 reproduit le tableau du Manuel de conception des ponceaux (MCP) utilisé pour estimer les CR en milieu rural. Les principales caractéristiques physiographiques considérées dans ce cas sont : la pente du BV (plat, vallonné, montagneux), l'occupation du territoire (culture, pâturage, boisé, lac et marécage) et les classes hydrologiques (A, AB, B, BC, C, CD). Le Tableau 7.2 présente quant à elle le tableau du MCP utilisé pour l'estimation des CR en milieu urbain. Pour ce tableau, les valeurs proviennent de l'*American Society of Civil Engineers* et de la *Water Pollution Control Federation* (ASCE et WPCF, 1969).

Tableau 7.1 – Valeurs de coefficients de ruissellement du Manuel de conception des ponceaux (Tableau 3.4.1a de Transports Québec, 2017)

COEFFICIENTS DE RUISSÈLEMENT « C _p »							
ZONE RURALE							
VÉGÉTATION	PENTE S _b	CLASSIFICATION HYDROLOGIQUE					
		A	AB	B	BC	C	CD
CULTURE							
PLAT	< 3%	0.22	0.30	0.36	0.41	0.47	0.51
VALLONNÉ	3 à 8%	0.25	0.34	0.43	0.51	0.59	0.67
MONTAGNEUX	> 8%	0.32	0.43	0.51	0.61	0.67	0.73
PÂTURAGE							
PLAT	< 3%	0.08	0.12	0.17	0.25	0.34	0.43
VALLONNÉ	3 à 8%	0.10	0.17	0.25	0.33	0.43	0.51
MONTAGNEUX	> 8%	0.20	0.29	0.39	0.47	0.56	0.64
BOISÉ							
PLAT	< 3%	0.04	0.09	0.15	0.21	0.29	0.37
VALLONNÉ	3 à 8%	0.07	0.12	0.19	0.26	0.34	0.43
MONTAGNEUX	> 8%	0.11	0.18	0.26	0.34	0.43	0.51
LAC ET MARÉCAGE		0.05					

Tableau 7.2 - Valeurs de coefficients de ruissellement du Manuel de conception des ponceaux pour l'utilisation en milieu urbain (ASCE et WPCF, 1969, Tableau 3.4.1b de Transports Québec, 2017)

Occupation du sol		Coefficient de ruissellement	
		Min	Max
Commercial	Centre-Ville	0.70	0.95
	Banlieue	0.50	0.70
Résidentiel	Unifamilial	0.30	0.50
	Jumelé et duplex	0.40	0.60
	Maison en rangée et condo	0.60	0.75
	Banlieue	0.25	0.40
Appartement		0.50	0.70
Industriel	Faible densité	0.50	0.80
	Haute densité	0.60	0.90
Parc et cimetière		0.10	0.25
Terrain de jeu		0.20	0.35
Gare de triage		0.20	0.35
Terrain vague		0.10	0.30
Pavé	Asphalte et béton	0.70	0.95
	Bloc de béton. brique	0.70	0.85
Toits		0.75	0.95
Gazon et sol sableux	Plat 2%	0.05	0.10
	Vallonné 2 à 7%	0.10	0.15
	Montagneux 7%	0.15	0.20
Gazon et sol argileux	Plat 2%	0.13	0.17
	Vallonné 2 à 7%	0.18	0.22
	Montagneux 7%	0.25	0.35

Le présent chapitre passe en revue les travaux et les recommandations sur la révision des procédures d'estimation des CR du MCP. Il est structuré comme suit. La Section 7.1 présente une revue des valeurs proposées dans la littérature. La Section 7.2 présente les CR estimés pour les 93 BV à l'étude alors que la Section 7.3 discute de l'impact de la période de retour PdR sur le CR. La Section 7.4 présente les corrélations entre les CR et différentes caractéristiques physiographiques des BV alors que la Section 7.5 propose et décrit de nouvelles approches d'estimation du CR. Finalement, la Section 7.6 discute des avantages et désavantages de chacune des approches proposées et la Section 7.7 reprend les principaux points du Chapitre 7.

7.1 Coefficients de ruissellement proposés dans la littérature

Plusieurs valeurs de CR ont été proposées dans la littérature pour différents types de territoire et en fonction de différentes caractéristiques du territoire (végétation, pente et classification hydrologique; Chow *et al.*, 1988; Pilgrim et Cordery, 1993; Viessman et Lewis, 2003). Ces valeurs sont souvent arbitraires puisqu'aucune référence n'est citée. D'autres auteurs (p. ex. Law, 1956 ; Institute of Hydrology, 1976 ; McDonnell, 1990 ; Mulholland, 1990) ont proposées des valeurs suite à l'analyse de données observées. Le nombre d'études de ce type reste cependant modeste. Les paragraphes suivants présentent un résumé de quelques-unes d'entre elles.

Schaake *et al.* (1967) ont été parmi les premiers à estimer des CR à partir de données de débits et de précipitations. Ils ont ainsi évalué les CR de 20 petits BV urbains (< 0.6 km²) situés à Baltimore (É.U.). Suite à leurs analyses, ces auteurs ont rapporté des valeurs comprises entre 0.29 et 1.01. Selon Young et McEnroe (2014), il est tout à fait possible d'obtenir une valeur du CR supérieure à un.

French *et al.* (1974) ont pour leur part estimé des CR pour 37 BV de moins de 250 km² situés à Sydney en Australie. Pour la PdR 10 ans, ces auteurs ont trouvé des valeurs variant entre 0.1 dans l'ouest de Sydney et 1.0 dans le sud de Sydney, démontrant ainsi que le CR dépend de façon importante des conditions locales.

Hotchkiss et Provaznik (1995), pour leur part, ont évalué des valeurs se situant entre 0.20 et 0.82 pour la PdR 10 ans sur 24 petits BV agricoles du Nebraska (E.U.). Ces auteurs mentionnent que les valeurs moyennes du CR qu'ils ont estimées sont généralement plus élevées que celles suggérées dans les différents guides d'hydrologie générale.

Young *et al.* (2009) arrivent aux mêmes conclusions que Schaake *et al.* (1967) et Hotchkiss et Provaznik (1995). D'abord, ils remarquent que les CR évalués à partir de données observées, dans leur cas 72 BV du Kansas (E.U.) de moins de 78 km², varient grandement avec des valeurs allant de 0.11 et 0.32 pour la PdR 2 ans et de 0.59 à 0.97 pour la PdR 100 ans. De plus, leurs travaux montrent que les valeurs obtenues suite à cette analyse sont plus élevées que les valeurs proposées dans ASCE et WPCF (1969), exceptées pour la PdR deux ans.

Plus récemment, Dhakal *et al.* (2013b) ont obtenu des résultats similaires à ceux de Young *et al.* (2009) pour 20 BV ruraux et 16 BV urbains situés au Texas (E.U.) dont les superficies

varient entre 2.3 et 320 km². Ces auteurs ont obtenu des CR de 0.08 à 0.39 pour la PdR 2 ans et de 0.34 à 1.44 pour la PdR 100 ans.

Il est toutefois étonnant de constater que les résultats de ces études (Schaake *et al.*, 1967; French *et al.*, 1974; Hotchkiss et Provaznik 1995; Young *et al.*, 2009, Dhakal *et al.*, 2013b), n'ont pas été utilisés pour mettre à jour les tables de valeurs de CR les plus couramment citées. L'utilisateur est alors contraint d'utiliser encore aujourd'hui ces tables sachant qu'elles ne résultent pas d'analyse de données observées. Ce constat peut s'expliquer par le fait que les caractéristiques physiographiques d'où proviennent ces estimations du CR ne sont pas fournies dans les documents. Dans Schaake et al, (1967), les informations disponibles sont la superficie, l'imperméabilisation, la longueur et la pente du chenal des BV. French *et al.* (1974) ne donnent que la superficie des BV, même chose pour Hotchkiss et Provaznik (1995) qui ajoutent une brève description du territoire où se trouvent les BV : « *All are located in the relatively flat terrain of the loess plains* ». Dans Young *et al.* (2009), ainsi que Dhakal *et al.* (2013b), seules les occupations principales du territoire sont spécifiées. Ce peu d'information fait en sorte qu'il demeure difficile d'établir exactement dans quelle mesure les valeurs rapportées peuvent être appliquées à d'autres bassins de caractéristiques données.

Cette revue de littérature montre la difficulté d'estimer des valeurs de CR et explique pourquoi il n'existe pas de valeurs de référence des CR, particulièrement en zones rurales, unanimement acceptées. Ce point a été d'ailleurs souligné à plusieurs reprises (p. ex. Young *et al.*, 2009; Dhakal *et al.*, 2013b). Les études réalisées à ce sujet ne permettent pas de fixer des valeurs qui tiennent compte de la grande diversité des occupations du territoire et des caractéristiques physiographiques. Dans ce contexte, il est tout-à-fait justifié d'estimer de nouvelles valeurs de CR ou de mettre à jour les valeurs présentées dans le Tableau 3.4.1a (Tableau 7.1 du présent rapport) du MCP (Transports Québec, 2017).

Les sections suivantes passent rapidement en revue les valeurs généralement proposées pour les milieux urbains (Section 7.1.1), les milieux naturels (Section 7.1.2), les LMH (Section 7.1.3) et enfin en fonction des différents types de sols (Section 7.1.4). L'Annexe M regroupe les valeurs généralement proposées dans la littérature pour ces différents types de milieux.

7.1.1 Milieu urbain

Les valeurs du CR couramment utilisées en milieu urbain sont tirées du document de l'*American Society of Civil Engineers* et de la *Water Pollution Control Federation* (ASCE et WPCF, 1969; Tableau 7.2). Ces valeurs se retrouvent dans le MCP (Transports Québec, 2017) au Tableau 3.4.1b. Elles proviennent d'une large étude (réalisée antérieurement à la date de publication du document sans précision cependant de l'année exacte) prenant la forme d'un questionnaire auquel 71 organismes privés et publics des États-Unis ont répondu (Dhakal *et al.*, 2012). Selon Dhakal *et al.* (2013a), ces valeurs ne reposent sur aucune analyse utilisant des données mesurées de précipitations et de débits. Elles représentent plutôt des avis d'experts développés au fil des diverses applications de la MÉRA. Il est d'ailleurs précisé dans ASCE et WPCF (1969) que les

décennies d'expériences pratiques avec la MÉRA ont permis d'identifier des fourchettes de valeurs du CR généralement acceptées.

Les CR rapportés par ASCE et WPCF (1969) n'ont jamais été mis à jour et demeurent toujours les valeurs les plus utilisées en zones urbaines. Toutefois, il est pertinent de se questionner sur la nécessité d'utiliser un tableau de valeurs si élaboré dans le cadre de l'utilisation de la MÉRA. En effet, ce tableau propose des valeurs pour les parcs et cimetières, les terrains de jeux et les terrains vagues, mais suggère au bout du compte des CR très similaires pour toute ces occupations. Il est important de garder en tête que l'un des intérêts de la MÉRA est sa simplicité et qu'elle permet d'estimer rapidement un débit de conception. Dès lors, il apparaît inutile de procéder à une division très précise du territoire urbain en sous-unités auxquelles sont attribuées des valeurs différentes de CR.

Dans le cadre de la présente étude, l'occupation urbaine a été divisé en trois classes :

1. Faible densité : comprend tout ce qui se trouve en milieu rural, maisons très éloignées les unes des autres et autres surfaces imperméables associées aux rues et aux toits des autres bâtiments (p. ex. les granges et les hangars).
2. Densité moyenne : inclut tout ce qui se trouve en milieu résidentiel et ne fait pas de distinction entre les zones unifamiliales, les maisons en rangées, les jumelés et les duplex, contrairement au Tableau 7.2.
3. Forte densité : englobe toutes les zones commerciales et industrielles caractérisées par des toits et des stationnements couvrant de grandes surfaces.

7.1.2 Milieu naturel

Différentes valeurs du CR ont été proposées pour les zones moins imperméabilisées, p. ex. les milieux ruraux et forestiers (Tableaux M.1, M.2 et M.3 de l'Annexe M). Les valeurs proposées dans les ouvrages Schwab (1957), Dunne et Leopold (1978) et Schwab et Frévert (1985) semblent arbitraires puisqu'aucune référence n'est citée par ces auteurs. Seules les valeurs proposées par Law (1956), *Institute of Hydrology* (1976), McDonnell (1990) et Mulholland (1990) proviennent d'analyses de données observées. Ces valeurs empiriques sont donc spécifiques aux sites où elles ont été développées. La question de la transposabilité de ces valeurs à d'autres sites se pose donc.

7.1.3 Lacs et milieux humides

Si peu d'étude ont tenté d'évaluer des CR à partir de données observées en milieu urbain et rural, la situation est encore plus problématique lorsqu'il est question de bassin comportant des LMH. À ce sujet, il est important de rappeler que la MÉRA ne tient pas compte de l'emménagement temporaire des eaux dans un BV et qu'elle ne devrait pas, en principe, être appliquée lorsque la capacité d'emménagement et de rétention sont non négligeables (Yen, 1992; Pilgrim et Cordery, 1993).

Ce manque de connaissances sur les valeurs de CR à appliquer pour les BV avec des LMH peut s'expliquer en partie par la grande complexité de la réponse hydrologique de ce type de bassins. Cette complexité est très bien documentée dans une revue de littérature réalisée par André P. Plamondon et Sylvains Jutras du Laboratoire d'hydrologie forestière de l'Université Laval (Plamondon et Jutras, 2020). Le lecteur est invité à

consulter ce document pour plus d'information sur l'effet hydrologique des milieux humides sur les débits de pointe.

Les études semblent montrer que lorsque la capacité de rétention d'un milieu humide est grande, et ce peu importe le type de milieux humides, celui-ci aura une forte incidence sur les débits de crue en favorisant un laminage important. Toutefois, lorsque les capacités de rétention sont faibles, par exemple au printemps ou à l'automne où les nappes phréatiques sont élevées, les précipitations sont importantes et l'évapotranspiration faible, les débits de crue seront égaux à ceux d'un BV de même superficie n'ayant pas de milieux humides.

La seule source recensée abordant la question du CR des LMH est Dhakal *et al.* (2012) qui attribuent un CR de 1.0 à tous les BV de leur étude (90 BV), suggérant que les LMH ont un impact nul sur les volumes de ruissellement.

7.1.4 Affleurement rocheux

Actuellement, des classes hydrologiques variant entre BC et CD sont données aux affleurements rocheux (identifiés comme dépôts rocheux dans le MCP, Transports Québec, 2017). La variation dépend essentiellement de la localisation de l'affleurement. S'ils se trouvent dans les Appalaches ou dans les basses-terres du Saint-Laurent, il est question de roches sédimentaires et les classes hydrologiques sont BC ou C selon qu'il soit question de roches sédimentaires avec ruissellement modéré et faible. Si les affleurements rocheux se trouvent dans le Bouclier canadien, il est question de roches cristallines et la classe hydrologique correspondante est CD.

Dans le cadre de ce projet, aucune information n'a été trouvée pouvant justifier l'utilisation de valeurs différentes selon les types d'affleurements rocheux. Dès lors, il ne semble pas justifié de faire une distinction entre les affleurements rocheux des Appalaches et du Bouclier canadien. De plus, l'étendue des valeurs de CR possibles pour les affleurements rocheux varie entre 0.21 et 0.73 (Tableau 3.4.1a de Transports Québec, 2017) et il apparaît difficile d'expliquer, d'un point de vue hydrologique, une si large fourchette de valeurs. Ainsi, il est suggéré d'utiliser une seule valeur de CR pour les affleurements rocheux et de retenir une valeur se situant dans la partie supérieure de la fourchette (0.75).

7.2 Estimation des coefficients de ruissellement aux BV sous étude

Dans le but de revoir et de mettre à jour les valeurs de CR du Tableau 3.4.1 du MCP (Transports Québec, 2017; Tableau 7.1), la première étape a été d'estimer les CR pour les PdR 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans à partir de l'équation suivante basée sur l'équation de la MÉRA :

$$CR = 360 \frac{Q_T}{A I_T} \quad (7.1)$$

où A est la superficie du BV (ha), I_T est l'intensité de la pluie de durée TC et de PdR T donnée (mm/h) et Q_T est le débit maximal annuel (DMA) de PdR T (m^3/sec , voir Chapitre 4). Cette équation sera utilisée pour estimer le CR pour chacun des BV sous étude.

L'estimation du CR associé à une PdR donnée nécessite de préciser la valeur du DMA (Chapitre 4) et du TC (Chapitre 6) qui servira à calculer l'intensité de pluie de durée égale au TC et de PdR T. L'Annexe O explique la procédure d'estimation des intensités de pluie aux différents sites. Une fois ces informations colligées, les CR de chaque BV ont été estimés à partir de l'équation 7.1. L'Annexe N présente l'ensemble de ces valeurs.

Les distributions des CR estimés pour les différentes PdR sont présentées à la Figure 7.1 avec la distribution correspondante des CR estimés à partir du MCP. Trois constats importants découlent de l'examen de la Figure 7.1.

Premièrement, on constate que les valeurs de CR augmentent avec la PdR. Cet aspect sera discuté plus en détail à la Section 7.3. Deuxièmement, la dispersion des valeurs de CR obtenus à partir des tables du MCP est beaucoup moins étendue que celle des valeurs estimées aux BV sous étude et ce peu importe la PdR considérée. Ce résultat justifie une révision des valeurs des CR du MCP. La Section 7.4 aborde cette question.

Trois BV présentent des valeurs de CR supérieures à 1 pour la PdR 25 ans. Des résultats similaires ont été rapportés dans le cadre d'autres études (Schaake *et al.* 1967; Dhakal *et al.*, 2013b; voir Section 7.1). Certains auteurs expliquent que l'utilisation de l'approche statistique peut mener à des valeurs de CR supérieures à 1 (Young et McEnroe, 2014). Ces BV ne présentent aucune caractéristique commune qui pourrait expliquer ces valeurs de CR > 1. Deux sont situés aux É-U et n'ont pratiquement pas de LMH alors que le dernier est au nord de l'Ontario et à une occupation en lac de 12%. Il est important de rappeler que le terme coefficient de ruissellement utilisé pour décrire cette constante est quelque peu réducteur. En effet, le CR intègre à la fois des considérations sur la relation entre le volume de ruissellement et le volume de précipitation, comme son nom le suggère, mais intègre tout processus susceptible de lier le débit de pointe aux extrêmes de précipitation incluant les effets de laminage des hydrogrammes (voir Section 2.4). Considérant que l'hydrologie d'un BV est très complexe, le CR doit être vu comme un paramètre d'ajustement qui intègre donc tout un ensemble de processus, connus ou méconnus, susceptibles d'influencer la réponse hydrologique d'un BV. Il est dès lors envisageable que cette valeur puisse être supérieure à 1.

7.3 Coefficient de ruissellement et période de retour

La Figure 7.1 suggère une augmentation des CR considérant des plus grandes PdR. La Section 7.8 du rapport final de la Phase I du projet (Mailhot *et al.* 2018a) inclut une revue de littérature sur l'impact de la PdR sur les CR. Les plages de valeurs des facteurs à appliquer aux CR en milieu naturel de PdR 10 ans pour estimer les CR de PdR 2, 5, 25, 50 et 100 ans proposées dans la littérature apparaissent au Tableau 7.3 de même que les valeurs estimées dans le cadre de la présente étude. La Figure 7.2 montre les valeurs de CR de PdR 25, 50 et 100 ans en fonction des valeurs correspondante de PdR 10 ans pour l'ensemble des BV sous étude. On constate que, dans la plupart des cas, les CR augmentent faiblement lorsque la PdR augmente mais que certains BV présentent des augmentations beaucoup plus importantes.

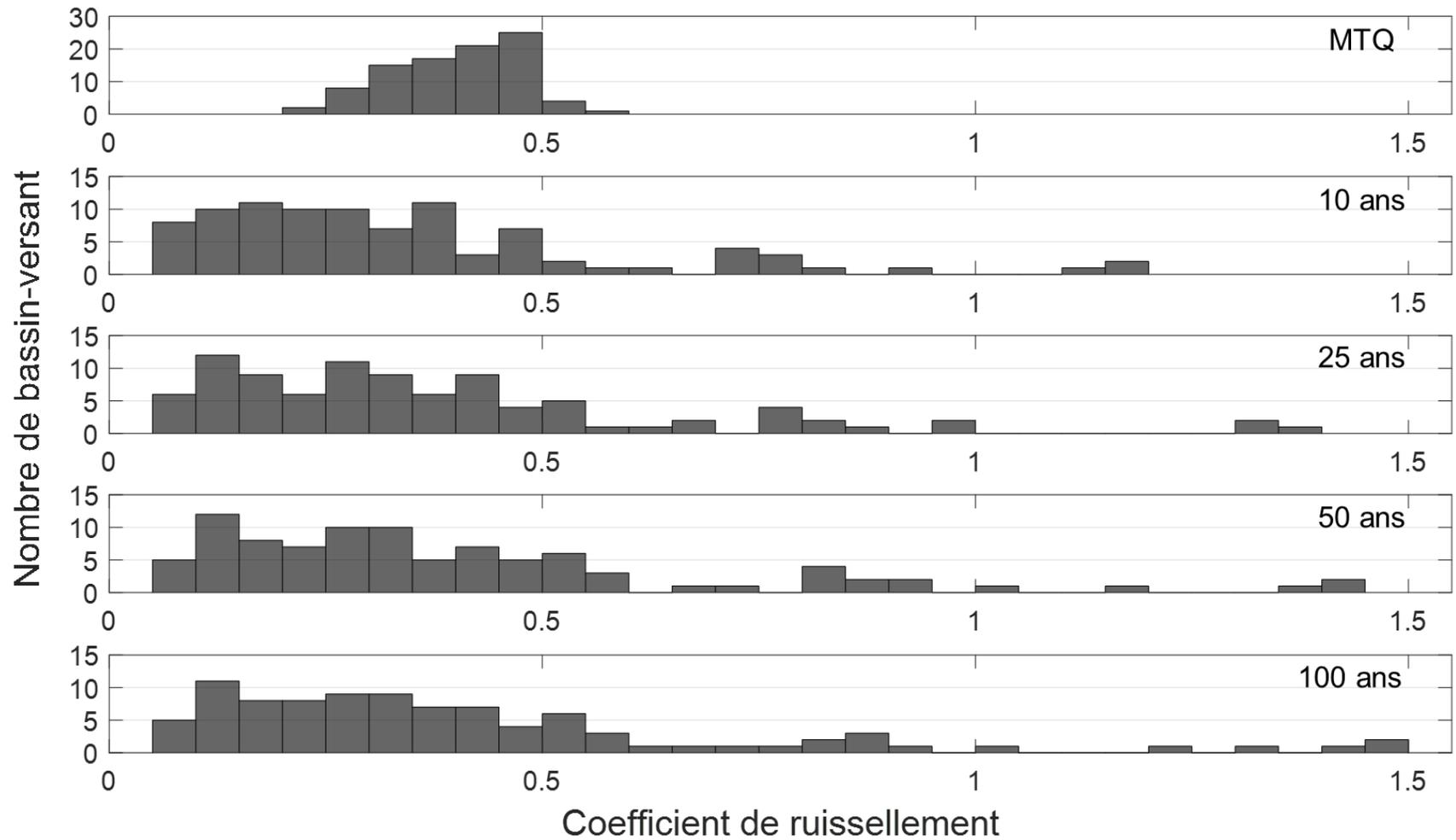


Figure 7.1 – Distributions des CR estimés aux BV sous étude pour les périodes de retour 10, 25, 50 et 100 ans et à partir de la table des CR du Manuel de conception des ponceaux (Tableau 3.4.1a de Transports Québec, 2017)

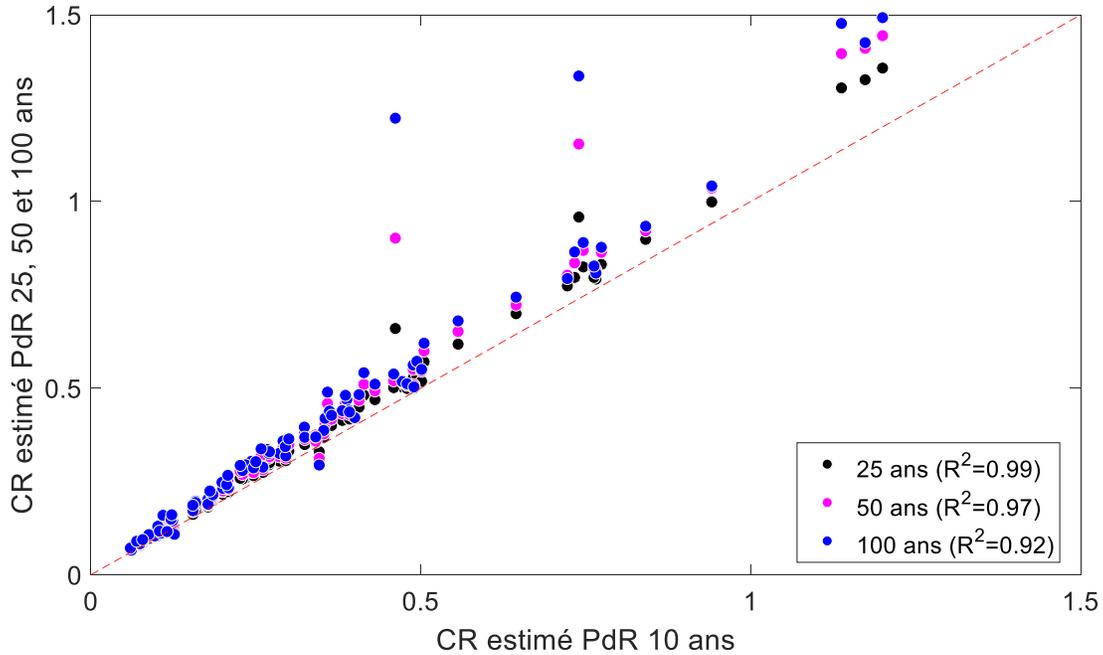


Figure 7.2 – Coefficient de ruissellement (CR) de période de retour (PdR) 25, 50 et 100 ans en fonction du CR de PdR 10 ans pour l'ensemble des BV sous étude

Tableau 7.3 - Facteurs de correction proposés dans la littérature et estimés dans le cadre de la présente étude à appliquer aux valeurs de CR en milieu naturel de PdR 10 ans pour estimer les CR de PdR 2, 5, 25, 50 et 100 ans

Période de retour	Facteur de correction	
	Revue de littérature	Valeurs estimées
2	0.4-0.5	0.5
5	0.7-0.8	0.9
10	1.0	1.0
25	1.2 -1.4	1.1
50	1.4 – 1.7	1.2
100	1.6 – 1.8	1.3

Tableau 7.4 – Quantité de précipitations pour les périodes de retour 10, 25, 50 et 100 ans et les durées 1, 2, 6, 12 et 24 heures provenant des courbes intensité-durée-fréquence de la station météorologique Saint-Sébastien (7027725, voir Annexe O pour plus de détails sur cette station)

Durée (h)	Période de retour			
	10	25	50	100
1	31.7	36.8	40.6	44.4
2	37.1	42.4	46.3	50.2
6	50.5	56.9	61.7	66.4
12	63.0	71.7	78.2	84.6
24	72.1	81.4	88.4	95.3

On constate que les facteurs obtenus sont moins élevés que ceux de la littérature pour les grandes PdR. Toutefois, ces valeurs semblent réalistes puisque les précipitations associées à une PdR de 10 ans génèrent déjà un volume important de ruissellement suite à la saturation des sols (Tableau 7.4). Dès lors, il apparaît vraisemblable que ces valeurs n'augmentent pas de manière très marquée lorsque la PdR augmente. De plus, l'application d'un facteur de 1.18 (PdR 50 ans, Tableau 7.3) aux CR de PdR 10 ans pour estimer le CR de PdR 50 ans conduit à des CR supérieurs à un pour un seul BV supplémentaire par rapport à la PdR 10 ans, pour un total de quatre BV avec $CR > 1$. L'utilisation d'un facteur de 1.5 (valeur se trouvant dans la fourchette considérant une PdR 50 ans) résulte en 12 BV avec des $CR > 1$ à 12 BV. Les valeurs de la présente étude apparaissant dans la colonne de droite au Tableau 7.3 seront utilisées pour estimer les débits de crue de PdR 50 et 100 ans (Section 8.3).

Puisque dans la cadre de ce projet, la PdR de référence est 25 ans, les facteurs de correction à appliquer pour estimer les CR de PdR 2, 5, 10, 50 et 100 ans sont 0.5, 0.8, 0.9, 1.1 et 1.2 respectivement. Ces facteurs seront utilisés lors de l'application et de la validation de la MÉRA pour l'estimation des DMA de PdR 50 et 100 ans (Chapitre 8).

7.4 Corrélations entre les caractéristiques physiographiques et les CR

Les corrélations entre les CR estimés à partir de l'équation 7.1 considérant la PdR 25 ans et les diverses caractéristiques physiographiques sont présentées à la Figure 7.3 alors que le Tableau 7.5 donnent une description de ces caractéristiques.

Ces résultats montrent que la pente moyenne du BV (S_B) est la caractéristique qui explique le mieux le CR avec un coefficient de détermination de 0.40. La Figure 7.4 montre la relation entre ces deux variables. Ainsi un BV de plus forte pente aura un CR plus élevé ce qui semble logique d'un point de vue hydrologique.

Les deux autres variables affichant des R^2 plus élevés sont la pente du cours d'eau principal (S_C) et l'occupation forestière (Figure 7.5). Ces deux variables sont toutefois assez fortement corrélées avec la pente du BV. Pour l'occupation forestière, on pourrait raisonnablement s'attendre à ce qu'un BV plus forestier ait un CR plus faible (infiltration, rétention et laminage plus important). Ce résultat apparemment contre-intuitif pourrait s'expliquer par les corrélations importantes entre les pentes du BV et le couvert forestier. En effet un BV avec de fortes pentes sera plus souvent forestier (Figure 7.5). Cette corrélation pourrait expliquer ce résultat selon quoi les BV plus forestiers présentent des CR plus grands.

Tableau 7.5 - Caractéristiques physiographiques considérées pour l'estimation des coefficients de ruissellement (voir Figure 7.3)

Caractéristiques	Description/Abréviation/Symbole	Unité	Annexe ¹
Superficie	A	km ²	D.1
Pente moyenne du BV	S _B	%	D.2
Longueur du cours d'eau principal	L _C	km	D.3
Pente moyenne du cours d'eau	S _C	%	D.4
Longueur du réseau hydrographique	L _{RH}	km	D.5
Densité de drainage	D _D	km	D.6
Forme du bassin-versant	W	km	D.7
Occupation du territoire	Forestier (Arbre et arbuste)	%	D.8
	Agricole (culture et pâturage)		
	Urbain		
	Lac et milieux humides (LMH)		
Classification hydrologique des sols	Groupe hydrologique A et B (GH-AB)	%	D.9
	Groupe hydrologique C et D (GH-CD)		
Connectivité des lacs et milieux humides	C	%	D.10
Séparation du réseau hydrographique	S _{RH}	%	D.11
Position des lacs et milieux humides	N/A	%	D.12

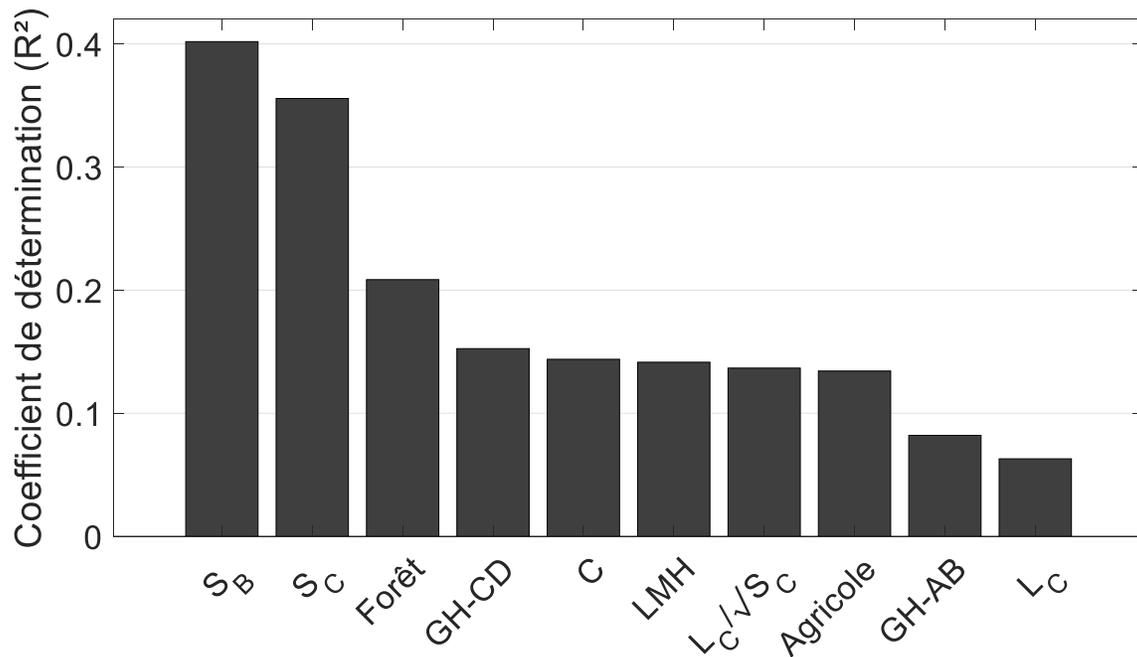


Figure 7.3 – Coefficient de détermination (R²) en ordre décroissant entre diverses caractéristiques physiographiques et les coefficients de ruissellement estimés avec l'équation 7.1 considérant la période de retour 25 ans. Seules les caractéristiques avec des corrélations supérieures à 0.05 sont présentées.

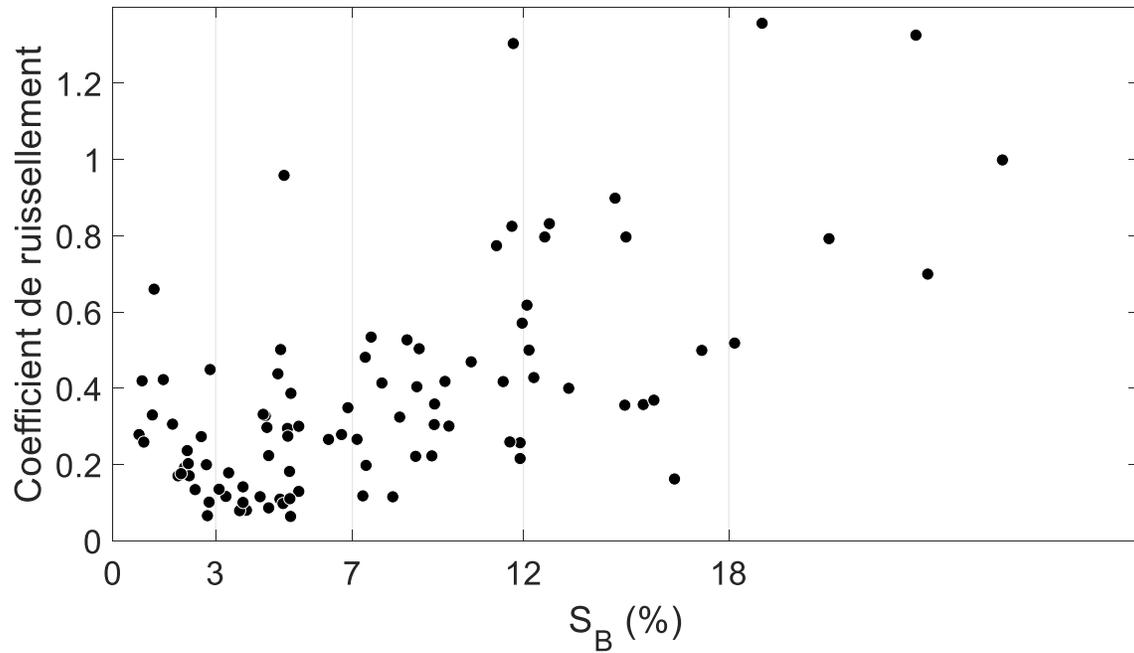


Figure 7.4 – Coefficient de ruissellement estimé à partir de l'équation 7.1 pour la période de retour 25 ans aux 93 BV sous étude en fonction de la pente moyenne du BV (S_B). Les lignes verticales correspondent aux classes de pente définies pour l'estimation des CR (voir Section 7.5.2 et Tableau 7.6).

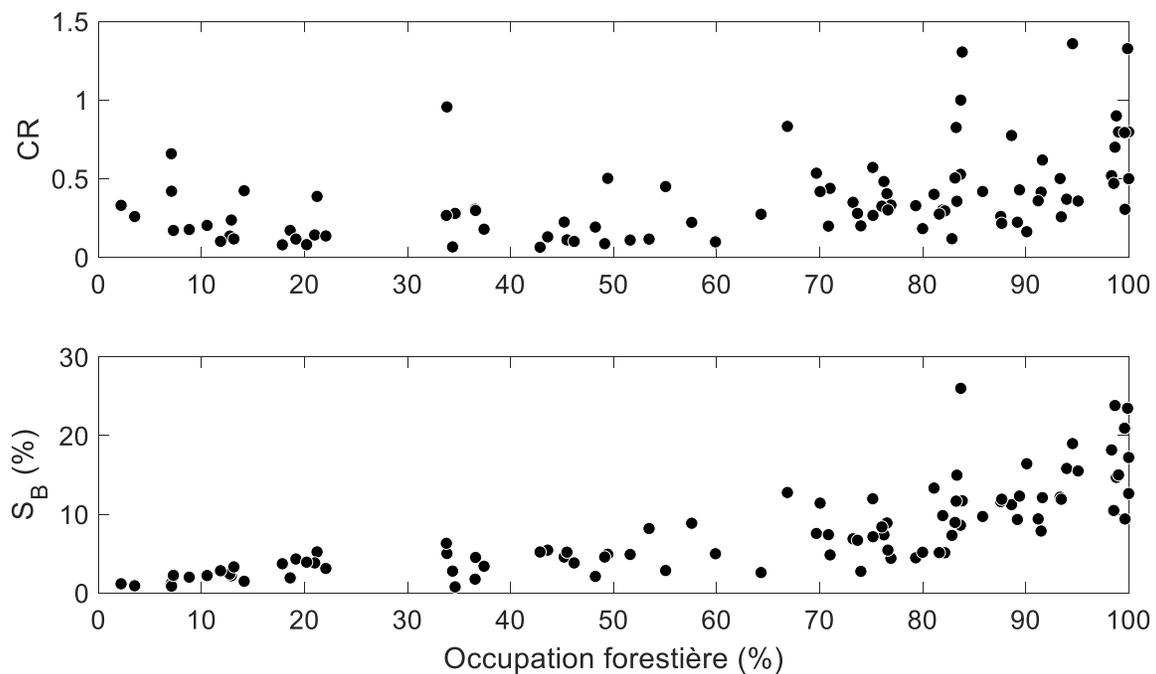


Figure 7.5 – Coefficient de ruissellement (CR) estimé à partir de l'équation 7.1 pour la période de retour 25 ans aux 93 BV sous étude (graphique du haut) et pente moyenne du BV (S_B ; graphique du bas) en fonction de l'occupation forestière (%).

7.5 Révision de la table des CR en milieux ruraux

Le Tableau 7.1 présente la table permettant d'estimer les CR en milieux ruraux qui se trouve actuellement dans le MCP (Transports Québec, 2017). En excluant les CR associés aux LMH et aux affleurements rocheux, cette table compte 54 valeurs réparties selon six groupes hydrologiques (A, AB, B, BC, C et CD), trois occupations du territoire différentes (Boisé, Pâturage et Culture) et trois classes de pente (0-3 %[, [3-8 %[, et >8 %]).

Les prochaines sections proposent trois approches afin d'estimer les CR pour les BV ruraux basées sur les résultats des analyses aux 93 BV sous étude. Ces approches sont décrites dans les trois sections suivantes. La première approche ne considère que la pente du BV comme variable physiographique et utilise une équation de régression pour estimer le CR (Section 7.5.1). La deuxième propose une table similaire à celle du MCP où les valeurs de CR dépendent de l'effet combiné de la pente du BV et de l'occupation du territoire (agricole et forestier) et de la présence de milieux urbains et des LMH (Section 7.5.2). Enfin la troisième approche (Section 7.5.3) est une version plus élaborée de la seconde approche où sont également considérés les groupes hydrologiques des sols (AB et CD). Enfin, la Section 7.5.4 compare la performance de ces méthodes pour l'estimation des CR aux 93 BV sous étude.

7.5.1 Approche S-1 : Estimation du CR à partir de la pente du bassin-versant

La première méthode simplifiée envisagée (S-1) dans le cadre de ce projet est celle où le CR est estimé à partir de la pente moyenne du BV seulement (S_B) puisqu'il s'agit de la caractéristique physiographique ayant le plus d'influence sur le CR (Figure 7.3). Pour estimer le CR de PdR 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans, les équations linéaires suivantes ont été développées :

$$CR_2 = 0.018 S_B + 0.06 \quad (R^2 = 0.54) \quad (7.2)$$

$$CR_5 = 0.028 S_B + 0.08 \quad (R^2 = 0.53) \quad (7.3)$$

$$CR_{10} = 0.031 S_B + 0.09 \quad (R^2 = 0.44) \quad (7.4)$$

$$CR_{25} = 0.033 S_B + 0.10 \quad (R^2 = 0.40) \quad (7.5)$$

$$CR_{50} = 0.035 S_B + 0.11 \quad (R^2 = 0.36) \quad (7.6)$$

$$CR_{100} = 0.035 S_B + 0.12 \quad (R^2 = 0.31) \quad (7.7)$$

où CR_x est le CR associé à la PdR x ans, et S_B la pente du BV en %. Ces équations ont été obtenues en minimisant l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error*, RMSE) entre les CR estimés à partir de ces régressions et les valeurs estimées aux 93 BV sous étude à partir de l'équation 7.1 et ce pour toutes les PdR. Rappelons que l'erreur quadratique moyenne mesure l'écart moyen entre valeurs estimées et mesurées, une valeur nulle correspondant à une égalité stricte entre valeurs mesurées et estimées. La Figure 7.6 présente ces régressions et les valeurs aux 93 BV sous étude.

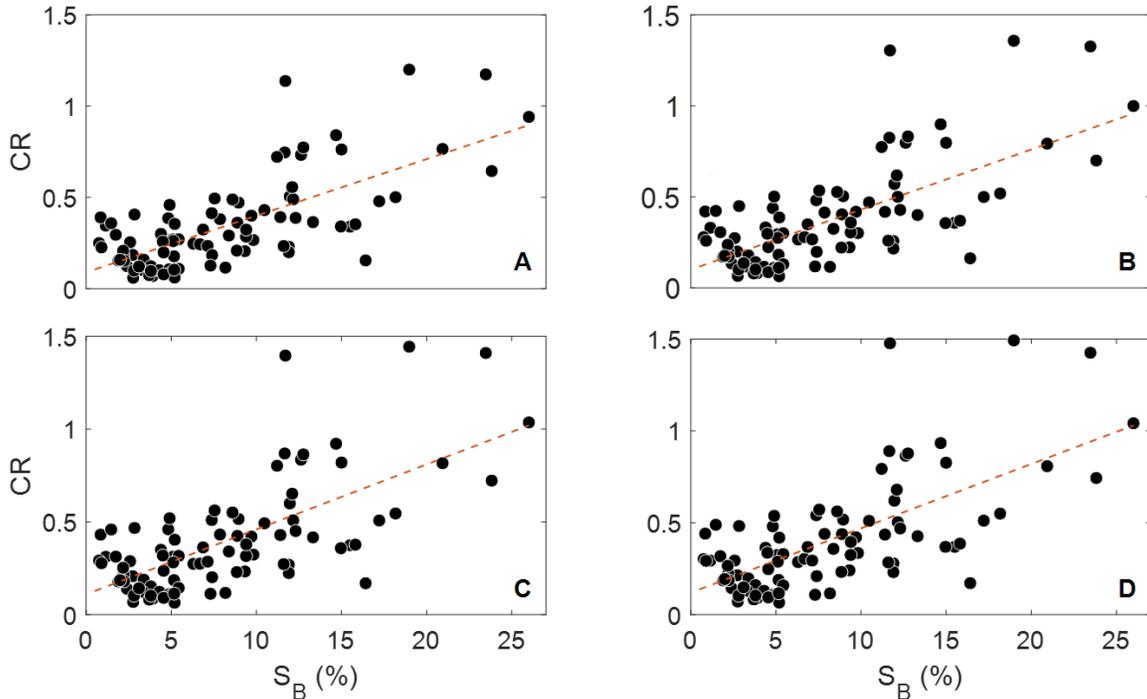


Figure 7.6 – Coefficient de ruissellement (CR) estimé à partir de l'équation 7.1 aux 93 BV sous étude en fonction de la pente moyenne du bassin-versant (S_B) pour la période de retour : A) 10 ans; B) 25 ans; C) 50 ans ; D) 100 ans. Les régressions obtenues sont représentées par les courbes en tiret (voir équations 7.4 à 7.7).

7.5.2 Approche S-2 : Première table simplifiée des valeurs de CR

La seconde version (S-2) consiste à ne pas considérer les groupes hydrologiques de sols et à fusionner les occupations Pâturage et Culture du Tableau 7.1 en une seule occupation (Agricole). Toutefois, deux classes de pentes ont été ajoutées afin de mieux représenter les BV au relief plus prononcé.

L'élimination des groupes hydrologiques s'explique par les faibles R^2 entre les CR estimés et ces caractéristiques. Ainsi pour les groupes AB et CD les coefficients de détermination sont de 0.08 et 0.15 respectivement (voir Figure 7.2). L'utilisation d'une occupation dite agricole, comprenant les pâturages et les terres en cultures, se justifie sur la base des discussions du comité de suivi du projet où plusieurs membres ont exprimé l'avis qu'il était irréaliste de faire une distinction entre ces deux occupations, notamment parce qu'une même parcelle peut passer de l'une à l'autre de ces occupations.

L'ajout de deux classes de pente s'explique par le fait que de nombreux BV sous étude (39) ont des pentes moyennes supérieures à 8 % (borne inférieure de la classe de pente supérieure de la table actuelle du MCP) et que la Figure 7.4 montre clairement que les valeurs de CR continuent d'augmenter au-delà de cette valeur de 8%. L'approche par arbre de régression présentée au Chapitre 6 a été utilisée afin d'identifier les classes de pente les plus représentatives considérant les CR estimés et les pentes des BV (S_B) comme seule variable explicative. Le Tableau 7.6 présente les classes retenues et le

nombre de BV dans chaque classe et la Figure 7.4 montre ces classes de pente. On peut voir que les deux premières classes sont à toute fin utile similaires à celles de la table actuel du MCP (0-3 %[et [3-8 %]).

Tableau 7.6 – Classes de pente des BV retenues pour l'estimation des CR et nombre de BV appartenant à chaque classe (voir Figure 7.4).

Classe de pente (%)	Nombre de BV
0-3[19
[3-7[29
[7-12[26
[12-18[13
> 18	6

L'estimation des valeurs de CR pour ces différentes classes de pente (Tableau 7.6) et d'occupation du territoire a été réalisée selon les étapes suivantes. Une première optimisation visant à minimiser les erreurs quadratiques moyennes entre les débits de conception MÉRA (en utilisant l'arbre D-4 pour l'estimation des TC; Figure 6.1) et les DMA correspondants aux BV sous étude estimés à partir des débits mesurés (Chapitre 4) pour une PdR donnée a été appliquée.

Les valeurs de CR associés aux affleurements rocheux et à l'occupation urbaine ont été fixées d'entrée de jeu. Pour les affleurements rocheux, une valeur de 0.75 a été attribuée alors que des valeurs de 0.2, 0.5 et 0.9 ont été données aux occupations urbaines de faible densité, de densité moyenne et de forte densité respectivement (voir Section 7.1.1 pour plus de détails sur les CR en milieux urbains). Ce choix d'attribuer à priori des valeurs de CR à ce type d'occupation se justifie par la très faible représentation de ce type d'occupation dans les 93 BV sous étude. En effet, aucun BV ne présente une occupation urbaine supérieure à 17% et celle-ci est inférieure à 5% pour 69 des 93 BV sous étude (Tableau C.2, Annexe C). Toutes les autres valeurs du Tableau 7.7 ont par la suite été estimées.

La première optimisation a permis d'estimer les CR pour les lacs et les milieux humides (0.80 et 0.15 respectivement, valeurs arrondies par bonds de 0.05). Ces deux valeurs ont par la suite été fixées pour la seconde optimisation.

La seconde optimisation concerne les cinq classes de pente et les deux occupations du sol. Cette fois-ci, l'optimisation vise à réduire les erreurs quadratiques moyennes entre les débits de conception et les débits observés associé à une même PdR (25 ans), tout en assurant un biais moyen positif. Le biais permet de voir si les valeurs estimées tendent globalement à surestimer ou sous-estimer les valeurs observées. Une valeur positive implique une surestimation globale sur l'ensemble des BV.

Deux contraintes supplémentaires ont été considérées lors de l'optimisation :

1. Pour une même classe de pente, l'occupation agricole doit avoir un CR égal ou supérieur à l'occupation forestière (ruissellement plus important pour la classe agricole que la classe forestière);

2. Pour une même occupation de territoire, le CR associé à une classe de pente doit être égal ou supérieur à la classe de pente précédente (CR augmente avec la pente).

Finalement, les valeurs ont été arrondies par bond de 0.05 et une troisième optimisation, manuelle cette fois-ci, a été réalisée pour chaque classe de pente de manière à assurer encore une fois un biais moyen positif considérant des modifications des CR obtenus aux cours de la seconde optimisation. Au cours de cette optimisation manuelle, les CR étaient modifiés par bonds de ± 0.05 par rapport à la valeur préalablement arrondie. Les deux contraintes énumérées précédemment étaient conservées. Le Tableau 7.8 présente la table de valeurs de CR ainsi obtenues pour la méthode simplifiée S-2.

Le Tableau 7.5 montre que les CR sont les mêmes pour les deux occupations du territoire agricole et forestière pour les classes de pente ([7-12],]12-18] et > 18). Cela suggère que lorsque les pentes sont fortes, ce facteur domine et l'occupation du territoire a peu d'influence sur le CR. Ce tableau montre également que pour des classes de plus faible pente, les CR sont identiques pour une occupation du territoire donnée (p. ex. forestier [0-3] et]3-7] avec un CR = 0.20). Ces résultats suggèrent que dans le cas de faibles pentes, l'occupation joue un rôle déterminant et non la pente. Ces deux constats conduisent à une simplification de la table des CR présentée au Tableau 7.6 et qui totalise 11 valeurs différentes de CR.

Tableau 7.7 – Table des valeurs de CR obtenues pour l'approche simplifiée S-2. En rouge : valeurs fixes pour la première optimisation, En orange : Valeurs fixes suite à la première optimisation.

Pente (%)	Forestier	Agricole
[0-3]	0.20	0.30
]3-7]	0.20	0.30
]7-12]	0.45	0.45
]12-18]	0.60	0.60
≥ 18	0.90	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

Tableau 7.8 – Table finale des valeurs des CR selon 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

7.5.3 Approche S-3 : Deuxième table simplifié de valeurs de CR

La troisième approche (S-3) reprend en partie les résultats de la seconde approche (S-2, Tableau 7.6) auxquels on ajoute des sous-classes prenant en compte les groupes hydrologiques des sols (AB et CD). Cette nouvelle table s’inspire donc de celle du MCP où les valeurs de CR en milieu naturel sont déterminées en fonction de l’effet combiné de la pente, de l’occupation du territoire (agricole ou forestier) et du groupe hydrologique (AB et CD).

Par ailleurs, les valeurs de CR des trois classes de pente de BV supérieures ([7%-12%], [12%-18%] et >18%) sont reprises de la table S-2 et n’ont pas été réévaluées. Ce choix se base sur l’hypothèse que lorsque la pente d’un BV est forte, elle seule a une incidence sur les CR alors que les autres caractéristiques physiographiques ont peu d’influence. De même, les valeurs pour les lacs et les milieux humides et des occupations de type urbain sont repris de la table S-2.

L’estimation des autres valeurs de la table S-3 a été effectuée en minimisant les erreurs quadratiques moyennes entre les débits de conception de la MÉRA (TC estimé à partir de l’arbre D-4; Figure 6.1) et les DMA estimés des séries de débits observés de même PdR (25 ans), tout en assurant biais moyen positif. Trois contraintes supplémentaires ont été considérées lors de l’optimisation :

1. Les CR des groupes hydrologiques CD doivent être égaux ou supérieurs aux CR des groupes hydrologiques AB considérant une même classe de pente (ruissellement plus important pour la classe hydrologique CD que la classe AB);
2. Pour un même groupe hydrologique, le CR associé à une occupation agricole doit être égal ou supérieur à une occupation forestière (ruissellement plus important pour la classe agricole que forestière);
3. Pour une même occupation de territoire, le CR associé à une classe de pente doit être égal ou supérieur à la classe de pente précédente (CR augmente avec la pente).

Finalement, les valeurs ont été arrondies par bond de 0.05 et une deuxième optimisation, manuelle cette fois-ci, a été réalisée pour chaque classe de pente de manière à assurer

biais moyen positif considérant les CR obtenus aux cours de l'optimisation précédente. Au cours de cette optimisation manuelle, les CR étaient modifiés par bonds de ± 0.05 par rapport à la valeur préalablement arrondie. Les trois contraintes énumérées précédemment étaient maintenues. Le Tableau 7.9 présente la table S-3 des valeurs de CR obtenues.

L'analyse du Tableau 7.9 montre que les CR des classes hydrologiques CD sont plus importants que les valeurs correspondantes des classes hydrologiques AB tant pour l'occupation forestières qu'agricole. Cependant, les valeurs de CR pour la classe hydrologique CD (sols où le ruissellement est plus important) ne dépendent pas de l'occupation du territoire CR = 0.30).

Encore une fois, les résultats suggèrent que la pente a peu d'influence sur les CR pour les classes de faibles pentes [0-3%] et]3%-7%]. Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'approche S-2 (voir Tableau 7.8). Une version simplifiée de cette table est présentée au Tableau 7.10, totalisant 13 valeurs différentes de CR.

Tableau 7.9 – Table des valeurs de CR obtenues pour l'approche simplifiée S-3. En rouge : valeurs fixes pour l'optimisation.

Pente (%)	Forestier		Agricole	
	AB	CD	AB	CD
[0-3]	0.15	0.30	0.20	0.30
]3-7]	0.15	0.30	0.20	0.30
]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	

Tableau 7.10 - Table finale des valeurs des CR selon l'approche S-3

Pente (%)	Forestier	Agricole	Forestier	Agricole
	AB	AB	CD	CD
[0-3]	0.15	0.20	0.30	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	

7.5.4 Comparaison des approches d'estimation des CR proposées

Le Tableau 7.11 montre les coefficients de détermination (R^2) entre les CR estimés à partir du MCP (Tableau 7.1), des approches S-1, S-2 et S3 et du CR estimés à partir des données observées (Équation 7.2) considérant la PdR 25 ans et les TC estimés à l'aide de l'arbre D-4 (Figure 6.1).

Ces résultats montrent d'abord que l'utilisation de la table du MCP pour l'estimation des CR ne permet pas d'obtenir des valeurs représentatives de celles estimées à partir des données observées (R^2 de 0.06). Déjà, la Figure 7.1 montrait que la fourchette de valeurs obtenues en utilisant la table du MCP était très restreinte et que les CR étaient beaucoup plus petits que ceux généralement observés. La comparaison de l'approche MTQ aux valeurs observées (Figure 7.7) confirme cette faible variabilité de même que les surestimations importantes pour les valeurs de CR plus faibles et les grandes sous-estimations pour les valeurs de CR plus élevées.

Tableau 7.11 – Coefficient de détermination (R^2) entre les CR estimés pour la période de retour 25 ans (Équation 7.2), à partir des valeurs du Tableau 7.1 du MCP et avec les approches S-1, S-2 et S-3 d'estimation du CR

Coefficient de ruissellement	25 ans	MCP	S-1	S-2	S-3
25 ans	1	0.06	0.40	0.42	0.43
MTQ		1	0.13	0.12	0.16
S-1			1	0.88	0.90
S-2				1	0.98
S-3					1

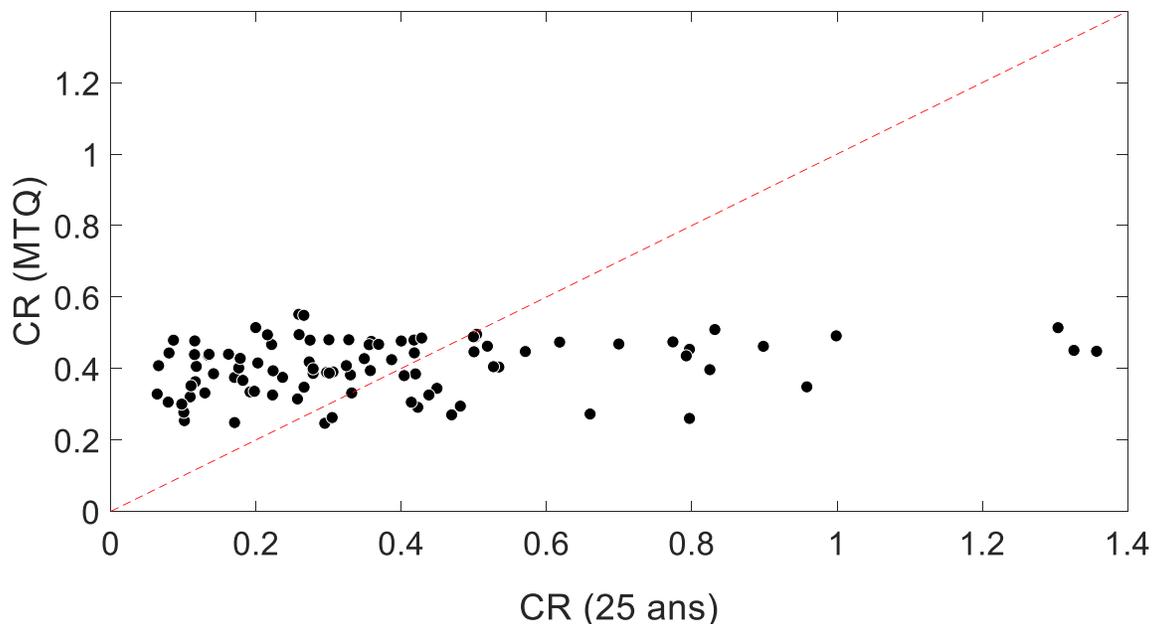


Figure 7.7 – Comparaison des CR estimés à partir des valeurs suggérées dans le Manuel de conception des pontons (CR MTQ en ordonnée; Tableau 7.1) et à partir des données observées (CR 25 ans en abscisse; Équation 7.1)

Le deuxième constat est que les approches proposées permettent d'augmenter de manière substantielle les R^2 (0.40 à 0.43). La Figure 7.8 compare les CR estimés à partir de la méthode simplifiée S-1 (équation basée sur la pente du BV, Équation 7.3) et à partir des données observées (Équation 7.1). On observe que l'approche S-1 tend à surestimer les CR plus petits et à sous-estimer les CR plus élevés. Pour toute la gamme de CR située entre 0.2 et 0.8, les valeurs sont en général bien reproduites par la table S-1.

Le dernier constat est que les différentes approches proposées donnent des résultats très semblables comme en témoignent les R^2 du Tableau 7.11 et de la Figure 7.9 qui compare les CR provenant des approches S-1 et S-3. Cette figure permet de remarquer que l'attribution de valeurs de CR par classe de pente réduit la disparité des valeurs pour l'ensemble des BV à l'étude.

Les valeurs de CR obtenues en chaque BV à partir des quatre approches présentées au Tableau 7.11 seront utilisées au Chapitre 8 pour l'application de la MÉRA afin de comparer les débits de conception ainsi estimés aux DMA estimés à partir des séries de débits observés.

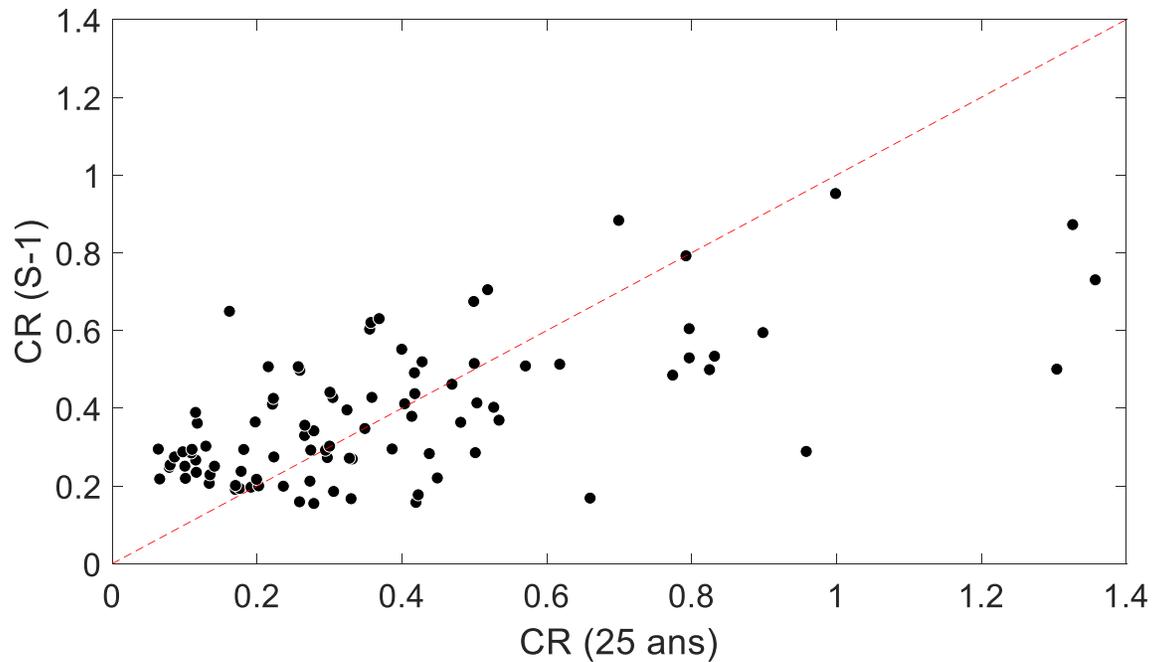


Figure 7.8 - Comparaison des CR estimés à partir de l'approche S-1 (CR S-1) et à partir des données observées (CR 25 ans; Équation 7.2)

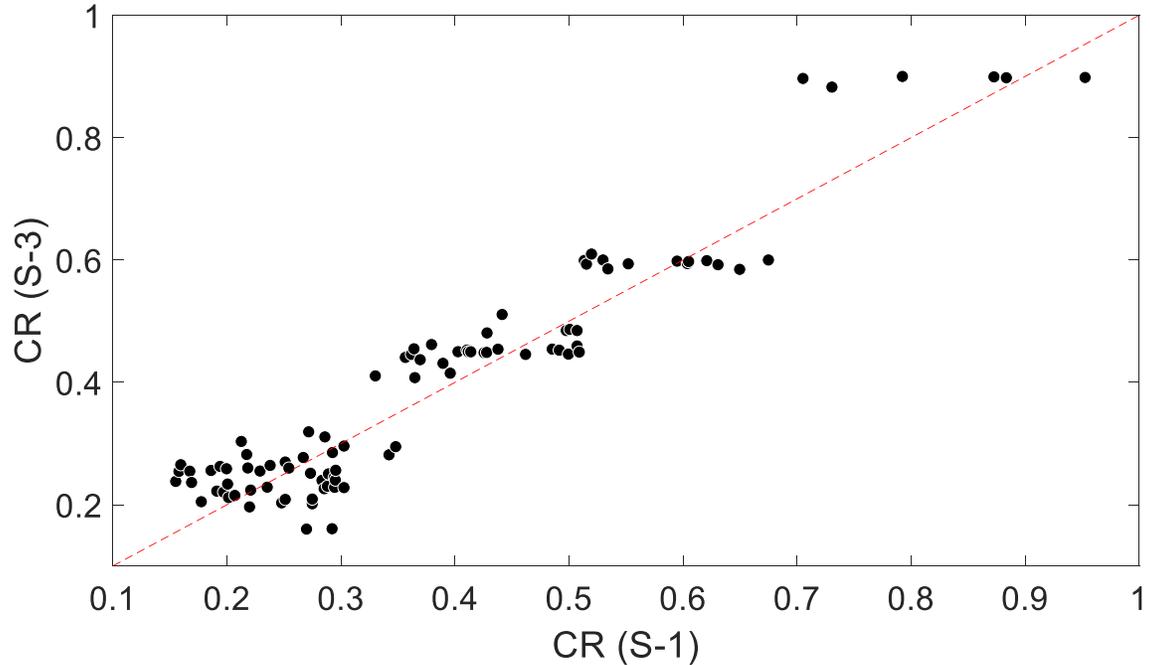


Figure 7.9 - Comparaison des CR estimés à partir de l'approche S-3 (CR S-3, en ordonnée) et S-1 (CR S-1, en abscisse)

7.6 Avantages et désavantages des approches d'estimation des CR proposées

Cette section vise à décrire les avantages et désavantages des approches d'estimation du CR proposées afin de faciliter la sélection d'une seule d'entre elles pour l'application de la MÉRA.

7.6.1 Approche S-1

Le principal avantage de l'approche S-1 est sa simplicité puisqu'elle ne requiert que la pente moyenne du BV pour estimer le CR. Considérant l'accessibilité grandissante aux modèles numériques de terrain (MNT, modèle d'élévation, Lidar, etc.) et les outils permettant d'estimer rapidement les pentes moyennes des BV (voir Section D.2 de l'Annexe 2), la complexité d'estimation du CR s'en trouve considérablement réduite.

L'importance de la pente comme facteur explicatif du CR s'explique en partie par les corrélations importantes entre cette caractéristique et plusieurs autres caractéristiques physiographiques, notamment l'occupation agricole et forestière, l'occupation en LMH et les groupes hydrologiques des sols (voir Section 3.2). Ainsi, la Figure 7.10 montre que plus la pente moyenne des BV est élevée, plus l'occupation forestière est importante au détriment de l'occupation agricole qui elle diminue avec l'augmentation de la pente. Pour les groupes hydrologiques, on remarque que les groupes hydrologiques CD, favorable au ruissellement sont très majoritaires pour les BV avec les pentes les plus fortes (supérieure à 12%). En ce qui concerne les LMH, ceux-ci sont pratiquement inexistantes lorsque les pentes des BV atteignent les 12 %. Finalement, l'occupation urbaine est plus importante

pour les BV ayant de faibles pentes et diminue de manière constante avec l'augmentation de la pente.

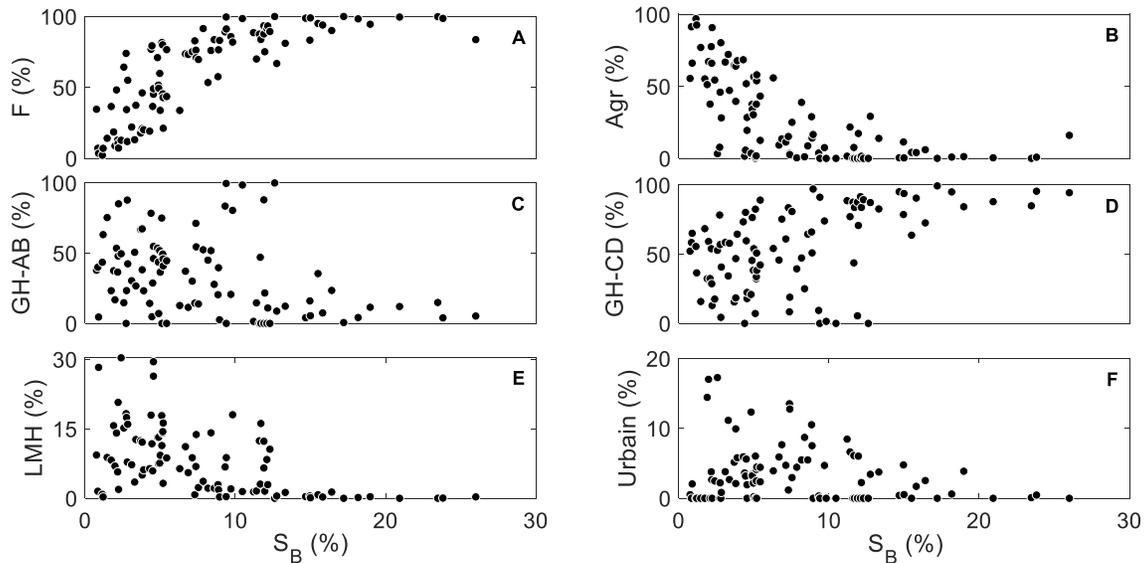


Figure 7.10 – Relation entre la pente moyenne des bassins-versants (S_B , %) et l'occupation forestière (A), agricole (B), la représentativité des groupes hydrologiques AB (C) et CD (D), l'occupation en lacs et milieux humides (E) et urbaine (F)

Ces résultats sont tout à fait logiques et cohérents et expliquent pourquoi la pente du BV agit comme un 'substitut' de plusieurs caractéristiques physiographiques. Ainsi, les équations développées à partir de la régressions linaires entre la pente moyenne des BV et les CR intègrent d'une certaine façon toutes ces caractéristiques physiographies. Dès lors, les CR les plus élevés provenant de l'utilisation des équations 7.2 à 7.7 sont caractérisés certes par une forte pente, mais correspondent également à des occupations forestières importantes, une faible présence de LMH et de zones urbaines et par des sols favorisant le ruissellement. L'inverse est également vrai, à savoir que les plus petits CR estimés avec les équations 7.2 à 7.7 concernent des BV avec de faibles pentes, une occupation forestière et agricole mieux partagée, des sols plus diversifiés et une occupation en LMH et en zones urbaines plus importante.

D'un autre côté, les relations entre les pentes moyennes des BV et d'autres caractéristiques physiographiques impliquent certaines limites quant à l'utilisation de cette approche simplifiée. En effet, advenant un BV dont les caractéristiques physiographiques ne se situent pas dans les fourchettes de valeurs des caractéristiques des BV à l'étude (voir Figure 3.2), les équations 7.2 à 7.7 pourraient s'avérer inexactes et inadéquates. Ce serait le cas, par exemple, pour un BV dont l'occupation urbaine serait supérieure à 20 % (limite imposée dans le cadre de ce projet) ou encore si un BV présentait des caractéristiques physiographiques absentes des 93 BV sous étude (p. ex pente forte et occupation agricole importante, pente forte et présence importante de LMH dans les vallées). Ce désavantage ne peut cependant pas être attribué aux méthodes de

simplifications S-2 et S-3 où les CR sont attribués au prorata de des différentes occupations du territoire.

7.6.2 Approche S-2

À l'instar de la première approche, la méthode S-2 peut être appliquée à des BV présentant des caractéristiques différentes de celles à l'étude puisque le CR est estimé au prorata des différentes occupations du tableau de valeurs (Tableau 7.8). Ainsi, un BV dont l'occupation urbaine est plus importante que ceux à l'étude (> 20%) aura très probablement un CR global plus élevé en raison des valeurs de CR attribuées aux zones urbaines de moyenne densité (0.50) et de forte densité (0.90).

Bien que cette méthode soit plus complexe que la méthode S-1, sa mise en application est plus rapide que la méthode actuelle du MCP et que la méthode S-3 puisqu'elle n'inclut pas les groupes hydrologiques. Cet aspect présente deux avantages.

1. En retirant les groupes hydrologiques des sols dans l'estimation du CR, les incohérences entre les couches d'informations géographiques associées aux occupations du territoire et aux type des sols sont évitées. En effet, il est fréquent que les deux sources d'informations utilisées ne concordent pas en ce qui concerne par exemple la superficie associée aux LMH. Dès lors, l'utilisateur doit établir laquelle des deux sources est la plus fiable et apporter des corrections pour uniformiser les informations de ces deux sources.
2. L'utilisation des groupes hydrologiques implique des incertitudes supplémentaires associées entre autres à l'identification des types de sols. Les dépôts de surface, par exemple, permettent de distinguer les grandes catégories de dépôts et proviennent de l'interprétation de photographies aériennes et parfois de points de contrôle sur le terrain. Les incertitudes peuvent également provenir de l'attribution des groupes hydrologiques aux différents types de sols. Que ce soit pour les dépôts de surface ou les cartes pédologiques, l'attribution de groupes hydrologiques repose sur de nombreuses hypothèses (voir Mailhot *et al.* 2018a, Section 7.3.1 pour les dépôts de surface et Gagné *et al.* 2013, Section 2.2 pour les sols pédologiques).

Il est toutefois important que toute application de la MÉRA à un BV donné soit précédée d'une caractérisation complète des sols afin de s'assurer qu'il ne se distingue pas de façon significative des 93 BV considérés dans la présente étude. En effet, tel que le montre le BV 02DB007 (voir Annexe L, Section L.2.1), la nature des sols peut jouer un rôle prépondérant dans la réponse hydrologique d'un BV. Dans le cas du BV 02DB007, la présence d'importants affleurements rocheux modifie sensiblement l'hydrologie de ce BV.

7.6.3 Approche S-3

La méthode S-3 s'apparente à celle du MCP en ce qui concerne les caractéristiques physiographiques retenues pour l'estimation du CR (pente moyenne du BV, occupation du territoire et groupes hydrologiques des sols). La méthode S-3 propose toutefois une fusion des occupations 'pâturage' et 'culture' en une classe 'agricole' et des fusions entre

les groupes hydrologiques A et B, d'une part, et des groupes C et D d'autre part, ce qui permet d'obtenir une table moins complexe comportant 13 valeurs différentes de CR.

L'avantage de la méthode S-3 par rapport aux deux autres (S-1 et S-2) est qu'elle fait intervenir les groupes hydrologiques et que, dans certains cas, cette caractéristique pourrait jouer un rôle important dans l'estimation du CR de certains BV. Par exemple, l'hydrologie d'un BV situé dans les basses-terres du Saint-Laurent et caractérisé par une présence importante d'argile et de limon pourrait être différente de celle d'un BV situé dans les Cantons de l'Est souvent caractérisé par des sols de types loams et loams sableux (voir la carte des grands groupes de sols dominant du Québec méridional¹). Il est important de rappeler que dans le cadre de ce projet, le nombre de BV situés au Québec (14) reste limité et ne permet vraisemblablement pas d'explorer pleinement l'impact hydrologique de ces différences de types de sols.

7.7 Résumé et conclusion

Les principaux résultats et les principales conclusions du Chapitre 7 sont :

- Plusieurs des valeurs de CR proposées dans le MCP sont des valeurs reprises de différentes publications et ne reposent, selon toute vraisemblance, sur aucune étude scientifique. La plupart de ces valeurs ont été fixées de façon *ad hoc* et arbitraire.
- Le nombre de classe pour le milieu urbain et les valeurs associées de CR provenant de ASCE et WPCF (1969) et suggérées dans la MCP présentent un niveau de précision et de détail beaucoup trop élevé compte tenu des incertitudes importantes associées à ces valeurs. Ainsi, il est proposé de ne considérer que trois classes pour le milieu urbain : 1) faible densité (CR = 0.20); 2) moyenne densité (CR = 0.50); 3) densité élevée (CR = 0.90).
- Les valeurs de CR en milieu naturel ne peuvent être mises à jour ou révisées sur la base d'études antérieures où elles auraient été estimées pour différents types de BV puisque, d'une part, très peu d'études de ce genre existent et, d'autre part, les informations disponibles ne permettent pas d'établir un lien entre les CR et les caractéristiques physiographiques des BV.
- Bien qu'il soit généralement admis que les LMH peuvent avoir une incidence sur la réponse hydrologique d'un BV, aucune étude tentant de faire le lien entre les CR et la présence de LMH n'a été répertoriée.
- Les valeurs de CR associées aux affleurement rocheux dans le MCP pourraient être remplacées par une valeur unique indiquant que ce type de dépôt favorise grandement le ruissellement (CR = 0.75).

¹ Cartes des grands groupes de sols dominants du Québec méridional : <https://www.irda.qc.ca/fr/services/protection-ressources/sante-sols/information-sols/cartes-thematiques/>

- La caractéristique physiographique la mieux corrélée au CR est la pente moyenne du BV (S_B) suivi de la pente du cours d'eau (S_C) et, dans une moindre mesure, l'occupation de type forestière. Les autres caractéristiques physiographiques semblent avoir peu d'influence sur les valeurs de CR. Le pouvoir explicatif de la pente du BV s'explique en partie par le fait que plusieurs autres caractéristiques physiographiques sont corrélées à la pente du BV. Ainsi, les BV avec de fortes pentes sont généralement forestiers, avec peu de LMH et de zones urbaines et caractérisés par des sols favorisant le ruissellement.
- Trois approches, de complexité croissante, sont proposées dans une optique de mise à jour de la procédure d'estimation des CR du MCP. Elles ont été développées sur la base des valeurs des CR estimés aux 93 BV sous étude.
- La première approche (S-1) utilise uniquement la pente moyenne du BV pour estimer le CR et prend la forme d'une équation de régression entre le CR et la pente du BV.
- La seconde approche (S-2) prend la forme d'une table de valeurs (similaire à la table actuelle du MCP) où les CR sont fonctions de l'occupation du territoire (forestier et agricole) et de cinq classes de pente. Des valeurs de CR sont également attribuées aux milieux urbains (trois classes), aux LMH et aux affleurement rocheux.
- La troisième approche (S-3) se présente également sous la forme d'une table de valeurs similaires à la table S-2 mais qui prend également en compte les groupes hydrologiques AB et CD.
- Une comparaison des valeurs de CR obtenues à partir de chacune de ces approches et de la table du MCP aux valeurs estimées aux 93 BV sous étude montre que : 1) la table de la MCP sous-estime la variabilité des valeurs observées; 2) les trois approches présentent des performances très similaires (R^2 de 0.40 à 0.43).
- L'approche S-1 présente un net avantage puisqu'elle est plus simple et rapide à mettre en place et qu'elle ne nécessite que la détermination de la pente du BV. De plus, les outils et les sources d'informations actuels permettent d'estimer la pente moyenne d'un BV de façon rapide et avec une bonne précision. Finalement, plusieurs caractéristiques physiographiques sont corrélées à la pente moyenne du BV (occupation du territoire, présence de LMH, etc.) ce qui explique son pouvoir explicatif. Le principal désavantage de cette approche est qu'elle doit être utilisée pour des BV ayant des caractéristiques physiographiques se trouvant dans les fourchettes de valeurs des BV à l'étude.
- L'approche S-2 présente l'avantage par rapport à l'approche S-1 d'intégrer l'occupation du territoire (ce qui peut être plus satisfaisant d'un point de vue hydrologique) alors qu'elle est plus simple que l'approche S-3 qui intègre les groupes hydrologiques. Ainsi, les problèmes et incertitudes associés à l'identification des dépôts de surface ou de la pédologie des sols et à l'attribution des groupes hydrologiques ne se présentent pas. De plus, il n'est pas nécessaire d'apporter des modifications afin d'assurer une cohérence entre les couches d'informations

associées à l'occupation de territoire et type de sols comme il est souvent nécessaire de le faire.

- L'avantage de l'approche S-3 est qu'elle tient compte des types de sols et qu'elle peut permettre de distinguer un BV dont les sols seraient essentiellement des argiles et des limons versus un BV caractérisé par la présence de loams et de loams sableux.
- L'estimation des CR à partir de données observées en chaque site à l'étude suggère une légère augmentation des CR avec la PdR, mais moins importante que ce qui est généralement rapportée dans la littérature.
- Différentes équations de régression ont été développées pour les PdR 25, 50 et 100 ans pour l'approche S-1.
- Des facteurs de 0.5, 0.8, 0.9, 1.1 et 1.2 doivent être appliqués aux CR de PdR 25 ans pour estimer les CR de PdR 2, 5, 10, 50 et 100 ans respectivement pour les approches S-2 et S-3.

Chapitre 8. Application de la méthode rationnelle (MÉRA) et comparaison avec les quantiles de débits observés

Quatre versions de la MÉRA ont été considérées dans ce qui suit :

1. La première version (Williams-MTQ) utilise les TC estimés à partir de l'équation de Williams, l'une des deux équations du Manuel de conception des ponceaux (MCP). Les deux équations (Williams et FAA) se trouvant dans le MCP donnent des résultats très similaires (Figure 5.12). Dès lors, seulement l'une d'entre elle a été retenue. L'équation de Williams a été favorisée puisqu'elle n'intègre pas le CR une seconde fois dans l'application de MÉRA. Les CR sont estimés à partir des valeurs se trouvant dans le Tableau 7.1 et qui se trouve dans le Manuel de conception des ponceaux (Transports Québec, 2017). Il est important de noter qu'un facteur de laminage a été appliqué aux débits de conception de l'approche Williams-MTQ afin de tenir compte des LMH. Ce facteur de laminage est basé sur la Figure 3.6 du MCP (Transports Québec, 2017) et a été ajouté aux caractéristiques des BV présentés à l'Annexe C.
2. La seconde version (D-4/S-1) repose quant à elle sur l'estimation des TC à partir de l'arbre D-4 présentée à la Figure 6.1 et sur l'estimation des CR utilisant l'approche S-1 (Section 7.5.1) basée sur l'équation de la régression linéaire obtenue avec la pente des BV.
3. La troisième version (D-4/S-2) utilise le CR estimé à partir de l'approche S-2 présentée à la Section 7.5.2 et le TC estimé à partir de l'arbre D-4.
4. La quatrième version (D-4/S-3) utilise également l'arbre D-4 pour l'estimation du TC et les CR sont estimés en utilisant l'approche S-3 (Section 7.5.3).

Ces différentes versions de la MÉRA seront désignées dans ce qui suit par Williams-MTQ, D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3.

8.1 Comparaison des performances des différentes versions de la MÉRA

Les débits de conception obtenus à partir de ces quatre versions (Williams-MTQ, D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3) ont été comparés aux quantiles des débits maximums annuels (DMA) obtenus à partir des séries observées (Chapitre 4). La Figure 8.1 met en relation ces deux ensembles de valeurs pour les quatre versions de la MÉRA. La Figure 8.2 présente les performances respectives de ces différentes versions de la MÉRA selon le coefficient de détermination (R^2), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le biais moyen.

Les Figures 8.1 et 8.2 montrent que les versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3 conduisent à une amélioration appréciable des estimations des DMA par rapport à la version Williams-MTQ. En effet, les R^2 sont plus élevés et les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) et biais plus petits pour les versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3.

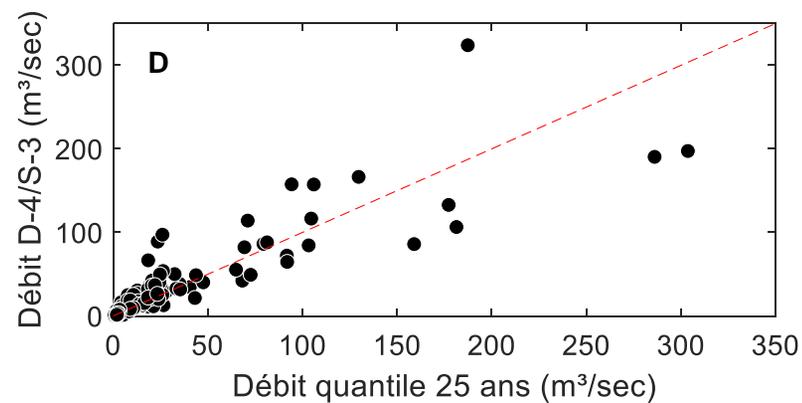
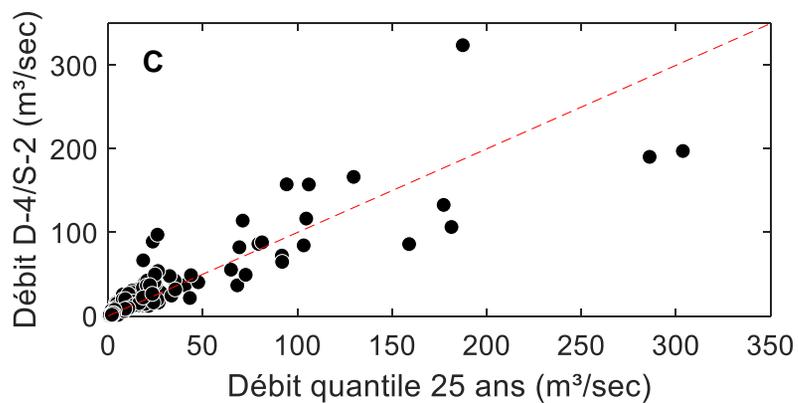
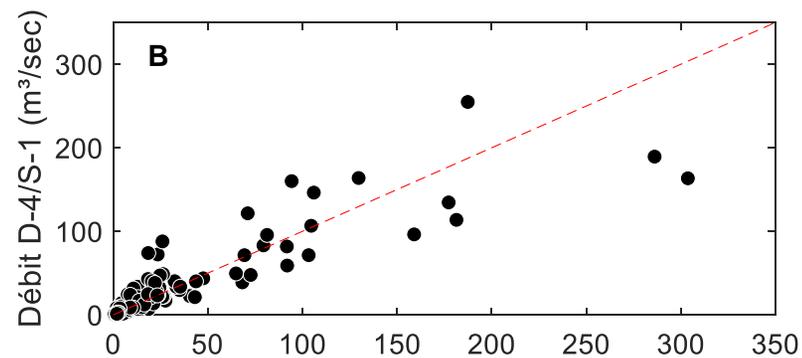
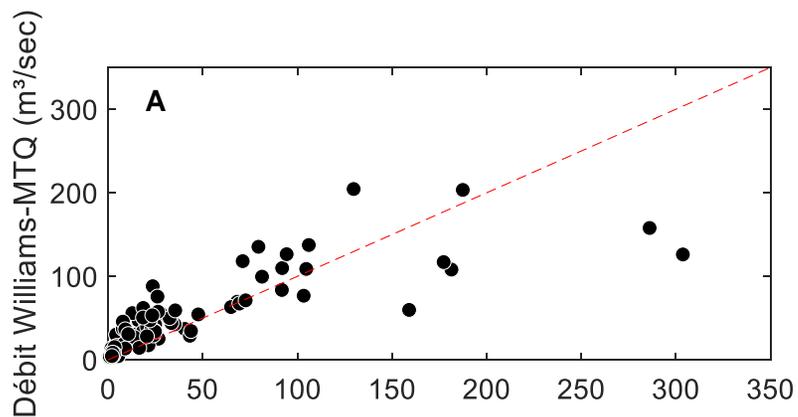


Figure 8.1 – Comparaison des quantiles de débit de PdR 25 ans estimés à partir des séries observés aux débits de conception estimés selon les quatre versions de la MÉRA :A) MTQ-Williams; B) D-4/S-1; C) D-4/S-2; D) D-4/S-3.

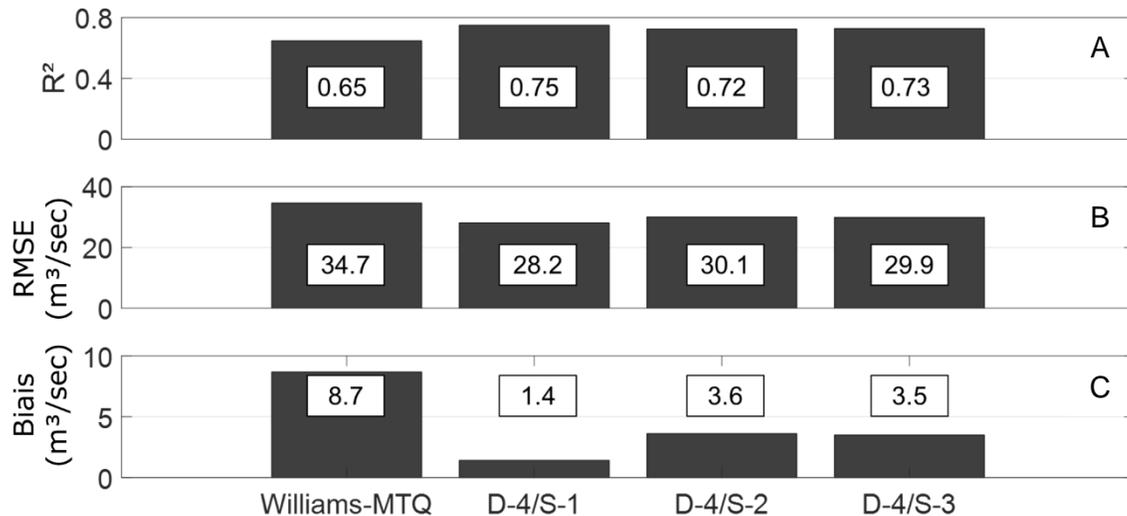


Figure 8.2 – Performance des quatre versions de la MÉRA : A) coefficient de détermination (R^2); B) erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error*; RMSE); C) biais moyen sur l'ensemble des BV

Un examen plus attentif des résultats de la version Williams-MTQ montre que pour les plus faibles débits (DMA < 50 m³/sec), elle surestime, parfois de façon importante, les quantiles observés. Ce résultat s'explique en partie par la sous-estimation des TC par l'équation de Williams qui entraîne une surestimation des débits (voir Section 5.6). La situation s'inverse pour les débits plus élevés (DMA > 150 m³/sec) avec des sous-estimations pour cinq BV sur six. Pour les cinq BV avec sous-estimation des débits, les CR estimés à partir de la table du MCP sont inférieurs aux CR estimés pour le PdR 25 ans et parfois de manière marquée. Ces sous-estimations sont telles qu'elles entraînent une sous-estimation des DMA malgré les sous-estimations importantes des TC (et donc des surestimations des débits qu'elles entraînent). La Figure 7.1 montrait d'ailleurs que dans l'ensemble les CR estimés avec la table des valeurs du MCP étaient inférieurs à 0.50 alors que les CR estimés pour le PdR 25 ans sont souvent supérieurs à cette même valeur.

L'utilisation de la version D-4/S-1 résulte, par rapport à l'approche Williams-MTQ, en un resserrement général des valeurs autour de la droite de pente un (ligne pointillée rouge) et donc un meilleur ajustement des DMA sur l'ensemble des BV. Les performances des versions D-4/S-2 et D-4/S-3 sont très similaires à celle de la version D-4/S-1 à l'exception d'un BV où la surestimation du débit de conception est beaucoup plus importante pour les versions D-4/S-2 et D-4/S-3 que pour la version D-4/S-1.

La Figure 8.3 affiche les biais moyens des quatre versions de la MÉRA en fonction des classes de pente de BV. Cette comparaison est utile considérant l'importance de cette variable physiographique dans l'estimation du CR et donc des débits de conception. Ces classes ont été identifiées lors de l'optimisation des valeurs de CR (Section 7.8.2).

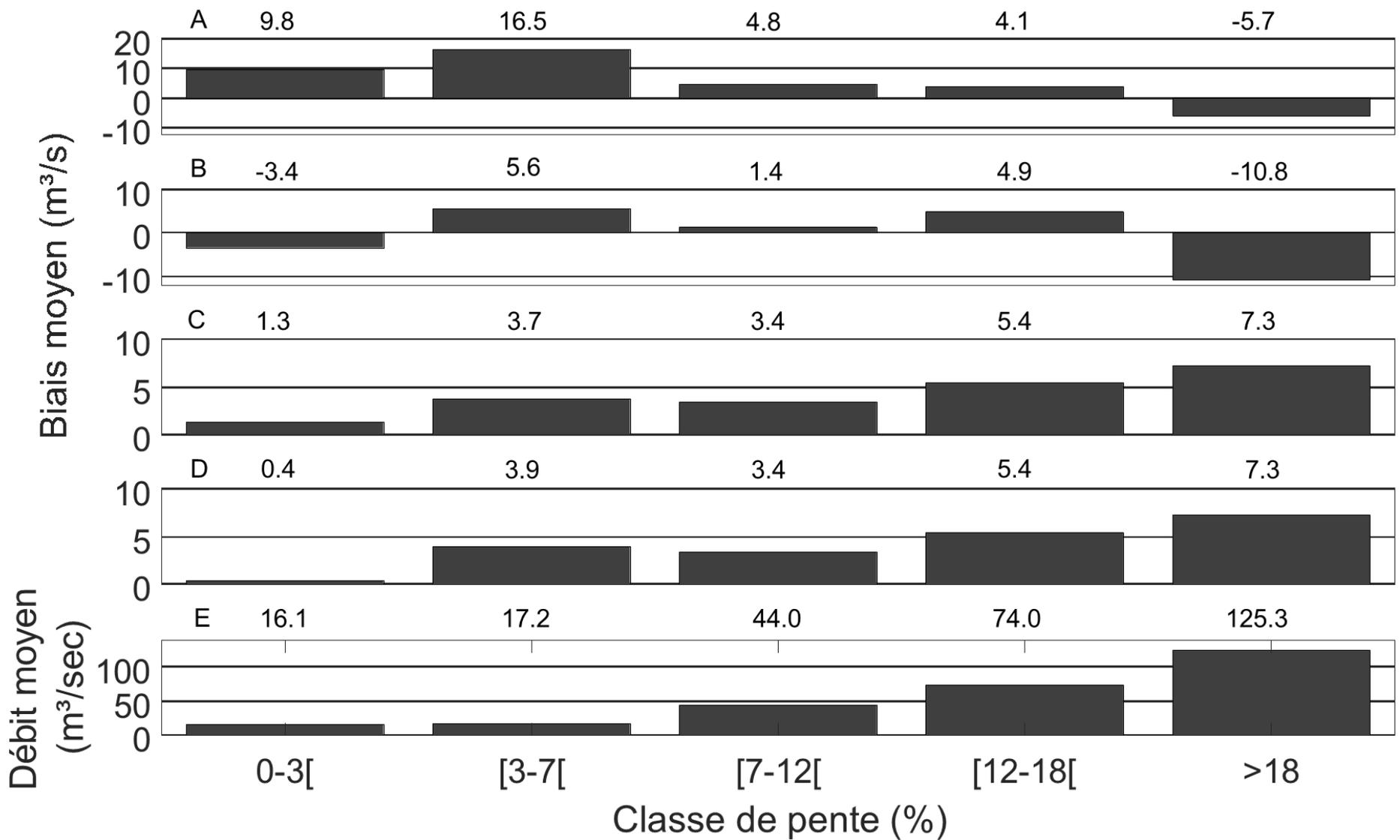


Figure 8.3 – Comparaison des biais et des débits moyens (m^3/sec) pour chaque classe de pente (%) selon les quatre versions de la MÉRA : A) MTQ-Williams; B) version D-4/S-1; C) version D-4/S-2; D) version D-4/S-3; E) débits moyen. Les valeurs des biais (graphiques A à D) et des débits moyens (graphique E) de chaque classe sont indiquées au-dessus de chacun des graphiques.

Pour la version Williams-MTQ, on remarque une tendance à la surestimation (biais positif) pour les classes de pente plus faibles (0-3[et [3-7[), lesquelles sont associées à des débits moyens plus petits, et à une sous-estimation (biais négatif) pour les BV de pente supérieure à 18 % et de débits moyens plus élevés. Ces résultats sont cohérents aux conclusions tirés de l'analyse de la Figure 8.1.

Pour l'approche D-4/S-1, on observe des biais négatifs (sous-estimation des débits de conception) pour les pentes les plus faibles et les pentes les plus fortes (0-3[et > 18). Cette version présente le R^2 le plus élevé et les plus faibles RMSE et biais. Toutefois, elle peut conduire à des sous-estimations des débits de conception par rapport aux versions D-4/S-2 et D-4/S-3 et notamment pour les BV avec de fortes pentes.

Les versions D-4/S-2 et D-4/S-3 donnent des résultats très similaires pour toutes les classes de pente. Ces résultats suggèrent que l'ajout des groupes hydrologiques pour les classes de pente 0-3[et [3-7[dans la version D-4/S-3 (voir Section 7.8.3) permet de réduire légèrement les biais pour la classe 0-3[.

8.2 Application de la MÉRA à des bassins-versants de différentes superficies

Il est intéressant d'analyser la performance et l'applicabilité de la MÉRA en fonction de la taille des BV et ce pour plusieurs raisons. En effet, de nombreuses sources suggèrent d'utiliser la MÉRA pour de très petits BV (15 km² et moins; voir la Section 5.1 de Mailhot *et al.* 2018a). Le principal argument évoqué est que la MÉRA considère une distribution uniforme des précipitations sur tout le BV et qu'elle peut donc conduire à des surestimations des débits de pointe sachant que les précipitations extrêmes seront plus localisées et ne couvriront pas tout le BV de façon uniforme lorsque la superficie de celui-ci augmente (Rossmiller, 1980; Ponce, 1989). De même, le MTQ utilise généralement la MÉRA pour les BV de superficies inférieures à 25 km² mais également pour des BV plus grands (jusqu'à 50 km²). Il est donc pertinent de voir si la performance de la MÉRA se détériore pour les BV de plus grandes superficies au-delà des valeurs prescrites dans la littérature.

D'autres organisations, par exemple le MFFP (Ministère de la forêt de la faune et des parcs) ou le MAPAQ (Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec), utilisent également la MÉRA pour de très petits BV (moins de 1 km²) en milieu forestier (communications personnelles, Sylvain Jutras) et pour des parcelles agricoles (Mailhot *et al.* 2016). De même le MTQ est appelé à appliquer la MÉRA à des BV dont la superficie est inférieure à 1 km² et dont la longueur du cours d'eau principal n'est que de quelques centaines de mètres tout au plus. Or, des 93 BV sous étude et seulement deux BV ont une superficie inférieure à 1 km² (02BF013, 0.5 km² et 02BF012, 0.9 km², BV situés en Ontario) et un seul a un cours d'eau principal dont la longueur est inférieure à un kilomètre (957 mètres, BV 02BF012). C'est donc dire que la version révisée de la MÉRA issue de la présente étude, notamment en ce qui concerne la méthode d'estimation de TC proposée, est mal adaptée à une application à des BV de moins de 1 km² puisque ceux-ci sont clairement sous-représentés dans l'échantillon des BV sous étude.

Ces différents constats montrent la pertinence d'analyser la performance de la MÉRA pour les BV de différentes superficies et de voir comment la version de la MÉRA développée dans le cadre de la présente étude peut être étendue à des BV de moins de 1 km². Ainsi, cette section discutera d'abord de l'application et de la performance de la MÉRA (version D-4/S-2) pour les BV dont les tailles varient entre 1 et 25 km² (Section 8.2.1) et proposera une nouvelle méthode d'estimation du TC dans le cas de très petits BV (superficie de moins de 1 km²; Section 8.2.2).

8.2.1 Bassins-versants de 1 à 100 km²

Les Figures 8.4 et 8.5 comparent les débits de conception provenant de l'approche D-4/S-2, PdR de 25 ans, aux DMA estimés à partir des séries observées de même période de retour en fonction de différentes classes de superficies des BV. À noter que les intervalles de confiance à 95 % des quantiles ont été ajoutés à ces figures.

La Figure 8.4 considère les BV de moins de 25 km² soient ceux de superficies inférieures à 5 km², comprises entre 5 et 10 km², entre 10 et 15 km² et enfin entre 15 et 25 km². Cette figure montre que de tous les BV de superficies inférieures à 25 km² (30 BV au total), seulement trois présentent des débits de conception inférieurs à la borne inférieure de l'intervalle de confiance 95 % des quantiles estimés à partir des séries de débits mesurés. On pourrait conclure que dans ces trois cas, les débits MÉRA sous-estimeraient les DMA observés. Ces trois BV ont une superficie inférieure à 5 km². Dans l'ensemble, l'application de la MÉRA pour des BV de superficie inférieure à 25 km² se traduit par des débits de conception se trouvant à l'intérieur des intervalles de confiance 95% (17 BV sur 30) ou supérieures à la borne supérieure de ces intervalles (10 BV sur 30).

Pour les BV de plus de 25 km², un constat similaire se dégage de la Figure 8.5. Cette figure montre que seulement sept BV sur 63 ont des débits de conception se situant en dessous de la borne inférieure associée à l'intervalle de confiance 95 %. Dans l'ensemble, l'application de la MÉRA pour des BV de superficie se situant entre 25 et 100 km² conduit à une estimation de débits conception se trouvant à l'intérieur des intervalles de confiance 95% dans 23 cas sur 63 BV et supérieurs à la borne supérieure de ces intervalles pour 33 BV.

8.2.2 Bassins-versants de moins de 1 km²

L'approche retenue pour l'estimation des TC (arbre D-4, Chapitre 6) ne permet pas d'attribuer de TC plus petit que 9 heures. Ce constat peut être attribué à l'absence de très petits BV parmi ceux à l'étude en raison de la rareté des données de débit colligées pour de tels BV. Par très petits, on attend ici les BV dont les superficies sont inférieures à 1 km² et même 0.5 km² et dont la longueur du cours d'eau principal n'est que de quelques centaines de mètres (tout au plus un kilomètre). Or, il est raisonnable de se questionner sur la vraisemblance d'attribuer un TC de 9 heures pour ce type de BV.

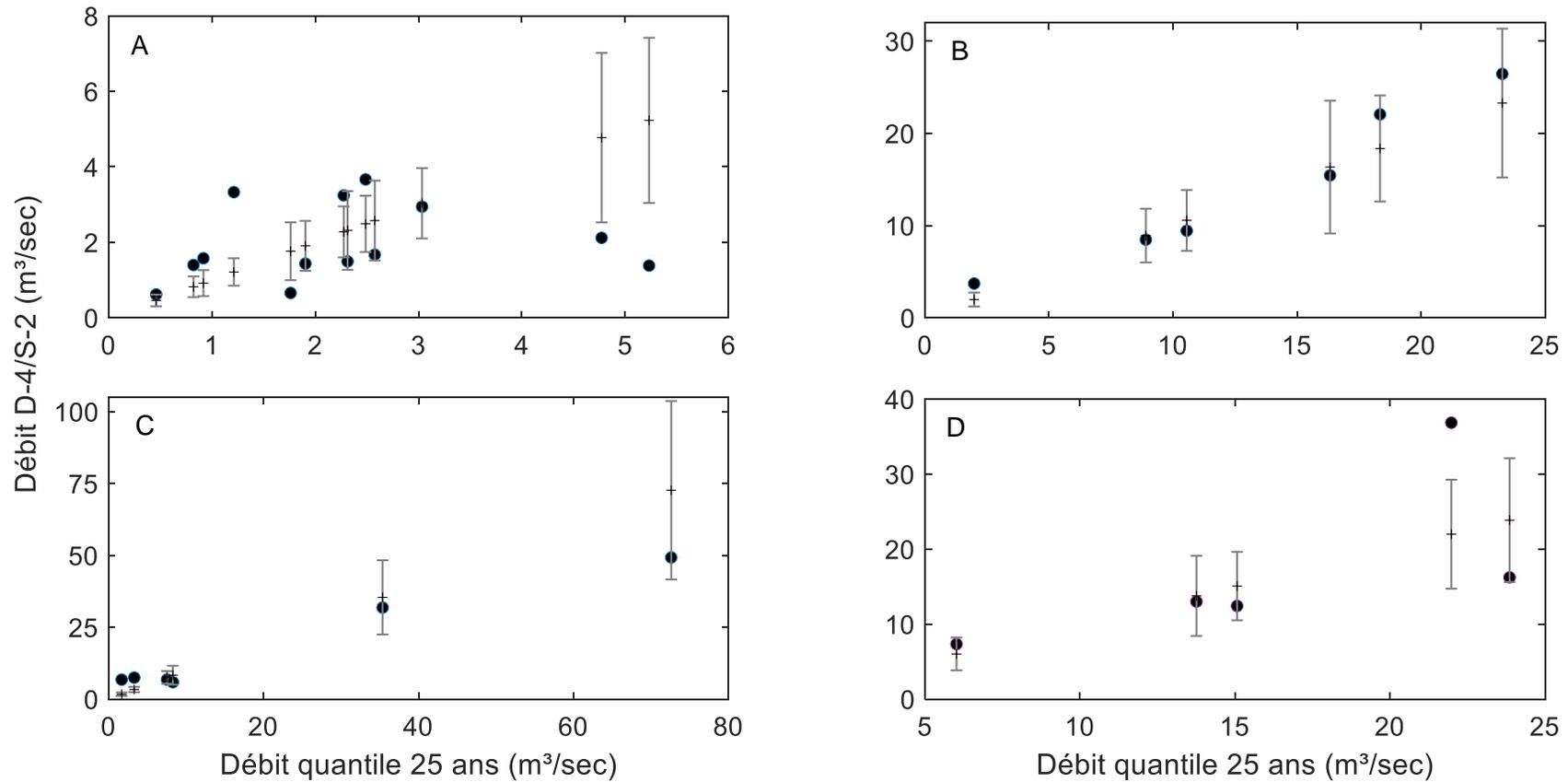


Figure 8.4 – Comparaison des DMA de période de retour 25 ans (croix noires) avec leur intervalle de confiance à 95 % (moustaches grises) estimés à partir des séries observées et des débits de conception estimés à partir de la version D-4/S de la MÉRA pour les BV dont la superficie est : A) inférieure à 5 km² (13 BV); B) comprise entre 5 et 10 km² (6 BV); C) comprise entre 10 et 15 km² (6 BV); D) comprise entre 15 et 25 km² (5 BV)

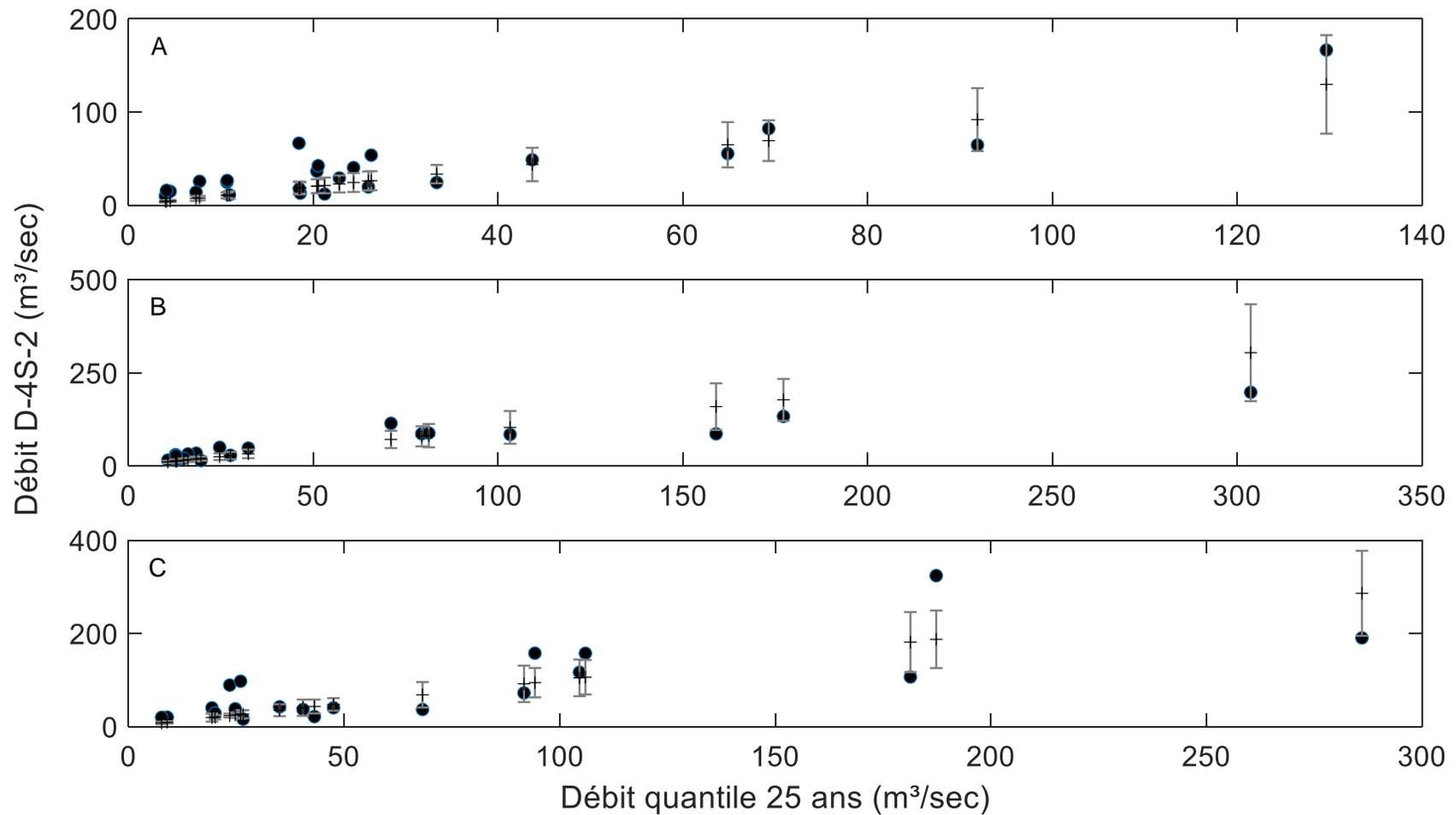


Figure 8.5 - Comparaison des DMA de période de retour 25 ans (croix noires) avec leur intervalle de confiance à 95 % (moustaches grises) estimés à partir des séries observées et des débits de conception estimés à partir de la version D-4/S de la MÉRA pour les BV dont la superficie est : A) comprise entre 25 et 50 km² (6 BV); B) comprise entre 50 et 75 km² (6 BV); C) comprise entre 75 et 100 km² (5 BV)

Dans le cadre d'un projet réalisé pour le compte du MAPAQ (Mailhot *et al.* 2016), les TC ont été estimés pour six parcelles agricoles du Québec méridional dont les superficies variaient entre 0.03 et 0.11 km² et les longueurs du cours d'eau principal entre 0.27 et 1.33 km. Les pentes moyennes de ces BV variaient entre 0.3 et 6 % et les pentes de cours d'eau entre 0.1 et 6 %. Pour ces BV, le TM a été identifié pour 9 à 34 hydrogrammes selon les sites et utilisé pour l'estimation du TC. Ces TM ont permis d'estimer des TC médians de 20 minutes à un peu plus de 5 heures. Il est très important mentionner qu'il s'agit de parcelles agricoles où l'hydrologie a été fortement modifiée et que la réponse hydrologique de ces BV est très rapide. Différentes formulations courantes d'estimation du TC ont par la suite été calibrées en fonction des TM médians en chaque BV. Il s'est avéré qu'une formulation basée sur la longueur du cours d'eau principal était la meilleure :

$$TC = 2.8 L_C^{1.6} \quad (8.1)$$

où L_C est la longueur du cours d'eau principal exprimée en km.

L'utilisation de cette équation pour des BV dont la longueur du cours d'eau principal peut atteindre jusqu'à un kilomètre mènera à des TC ne dépassant pas les trois heures. Ainsi, cette équation pourrait être conservée pour l'estimation de débits de conception considérant de très petits BV caractérisés par des longueurs de cours d'eau principal allant jusqu'à deux kilomètres.

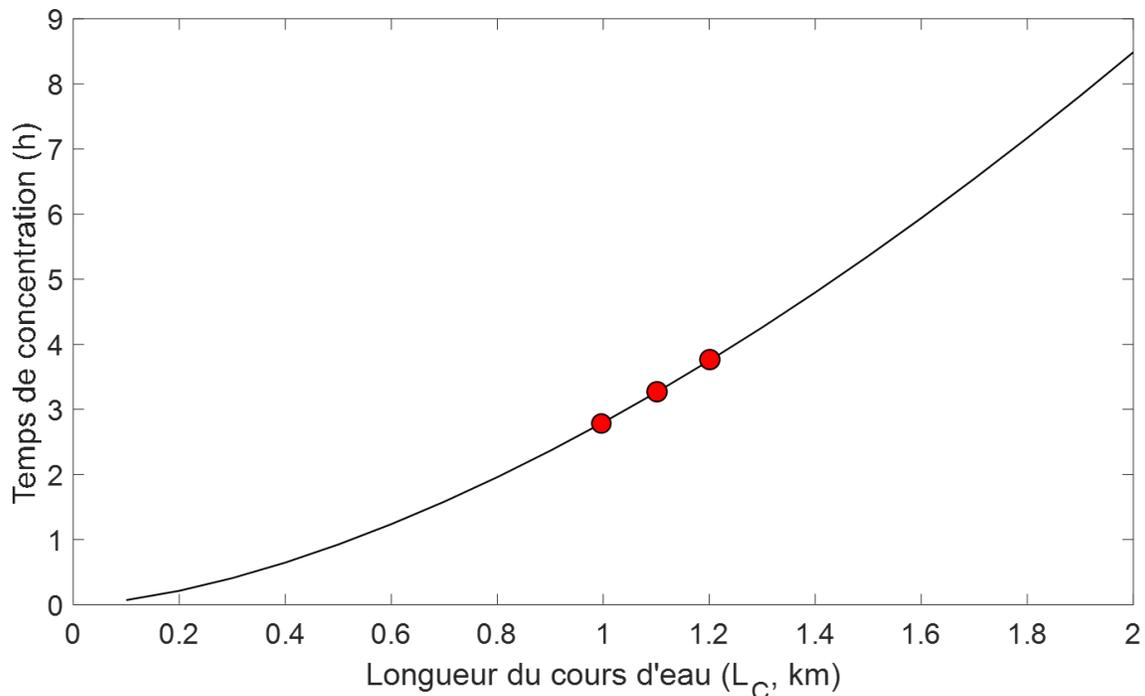


Figure 8.6 – Estimation du temps de concentration à partir de l'équation 8.1 pour une longueur de cours allant jusqu'à deux kilomètres. Les trois points correspondent aux trois BV de la présente étude avec une longueur du cours d'eau principal inférieure à 2 km.

L'utilisation de cette équation pour des BV dont la longueur du cours d'eau principal peut atteindre jusqu'à deux kilomètres mènera à des TC ne dépassant pas les neuf heures (Figure 8.6). Ainsi, cette équation pourrait être conservée pour l'estimation de débits de conception considérant de très petits BV caractérisés par des longueurs de cours d'eau principal allant jusqu'à deux kilomètres. Des 93 BV sous étude, trois ont une longueur du cours d'eau principal inférieure à 2 km (Figure 8.6) et sont classées dans les groupes G-1 et G-3 (TC de 9 et 17 heures respectivement, Tableau 6.1) selon l'arbre D-4 (Figure 6.1).

L'utilisateur doit toutefois être conscient que cette équation conduira vraisemblablement à des sous-estimations importantes des TC et donc à des surestimations des débits de conception par rapport aux débits observés et ce, en raison du caractère agricole des BV ayant servi à développer cette équation. Ainsi, cette équation doit être considérée si l'utilisation de l'arbre D-4 pour estimer le TC semble inappropriée, notamment pour de très petits BV qui n'ont pas été couverts dans le cadre de ce projet. Cela démontre également l'intérêt et la nécessité de jauger de très petits BV, notamment en milieux forestiers afin d'avoir une meilleure estimation des TC.

En conclusion, l'équation 8.1 est recommandée pour l'estimation des TC aux BV du Québec dont :

- les superficies sont inférieures à 1 km²;
- les longueurs du cours d'eau sont inférieures à 1 km;
- les pentes moyennes sont inférieures à 7 %.

De plus, il est important de souligner que l'utilisation de cette équation pour des BV très majoritairement forestier pourrait conduire à des sous-estimations des TC. Dans le même ordre d'idée, cette équation pourrait également conduire à des sous-estimations importantes pour de petits BV comprenant une fraction significative de LMH. Finalement, cette équation devrait être utilisée pour des BV ayant une fraction d'occupation urbaine négligeable ou une occupation urbaine dont les effets sur l'hydrologie du BV sont jugés négligeables.

8.3 Estimation des débits de conception de périodes de retour 50 et 100 ans

Les Figures 8.7 à 8.8 comparent les débits de conception estimés avec les versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3 de la MÉRA pour les PdR 25, 50 et 100 ans aux DMA estimés à partir des séries mesurées aux différents BV sous étude. Il est important de noter que pour la version D-4/S-1, les débits de conception pour les PdR 2, 5, 10, 50 et 100 ans ont été estimés à partir de régressions linéaires différentes (équations 7.6 et 7.7 respectivement) alors que pour les approches D-4/S-2 et D-4/S-3, les CR estimés pour la PdR 25 ans ont été multipliés par un facteur de 1.1 et 1.2 pour obtenir les valeurs correspondantes pour les PdR 50 et 100 ans respectivement. Ces facteurs ont été établis sur la base des analyses présentées à la Section 7.3.

Ces comparaisons montrent des résultats très similaires, peu importe la version de la MÉRA, pour les PdR 50 et 100 ans comparativement aux résultats pour la PdR 25 ans. Les coefficients de déterminations (R^2) affichés sur les Figures 8.4 à 8.6 ne changent pratiquement pas avec l'augmentation de la PdR et ce pour les trois versions de la MÉRA. Toutefois, l'analyse de la Figure 8.7 montre une augmentation du biais moyen et de la RMSE avec la PdR pour les trois approches considérant tous les sites à l'étude. Ces augmentations restent quand même bien modestes dans la mesure où les débits moyens pour l'ensemble des sites augmentent également.

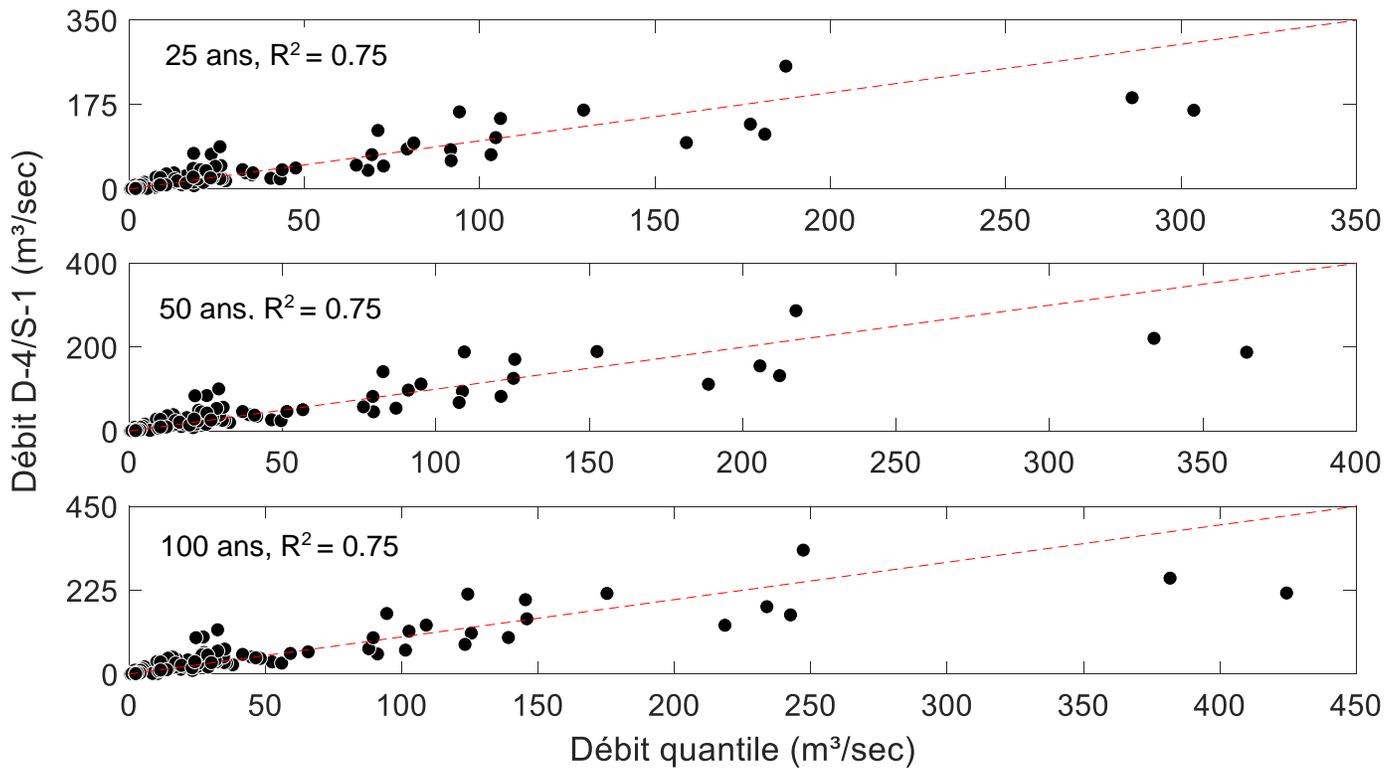


Figure 8.7 – Débits de conception estimés à partir de la version D-4/S-1 de la MÉRA en fonction des DMA estimés à partir des séries mesurées pour les périodes de retour : a) 25 ans; b) 50 ans; c) 100 ans.

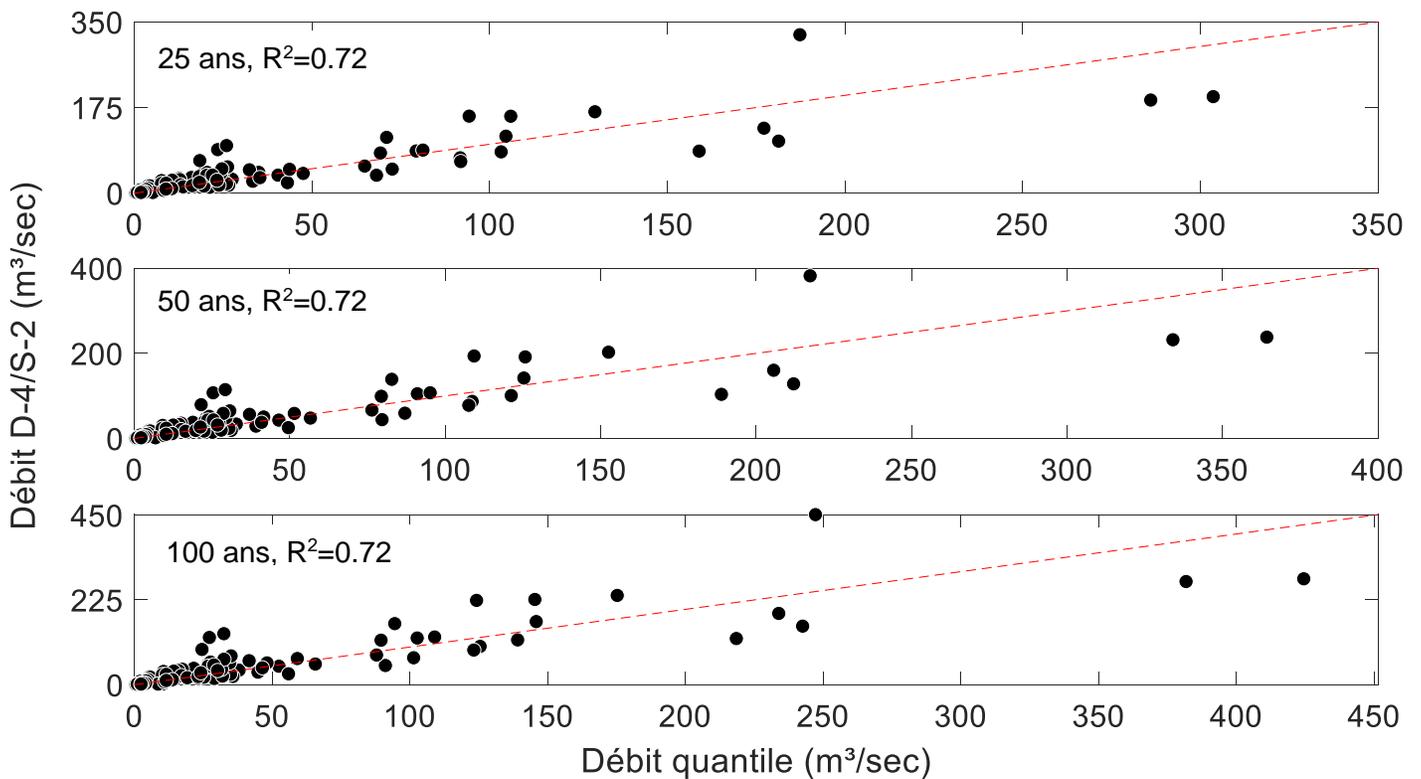


Figure 8.8 - Débits de conception estimés à partir de la version D-4/S-2 de la MÉRA en fonction des DMA estimés à partir des séries mesurées pour les périodes de retour : a) 25 ans; b) 50 ans; c) 100 ans.

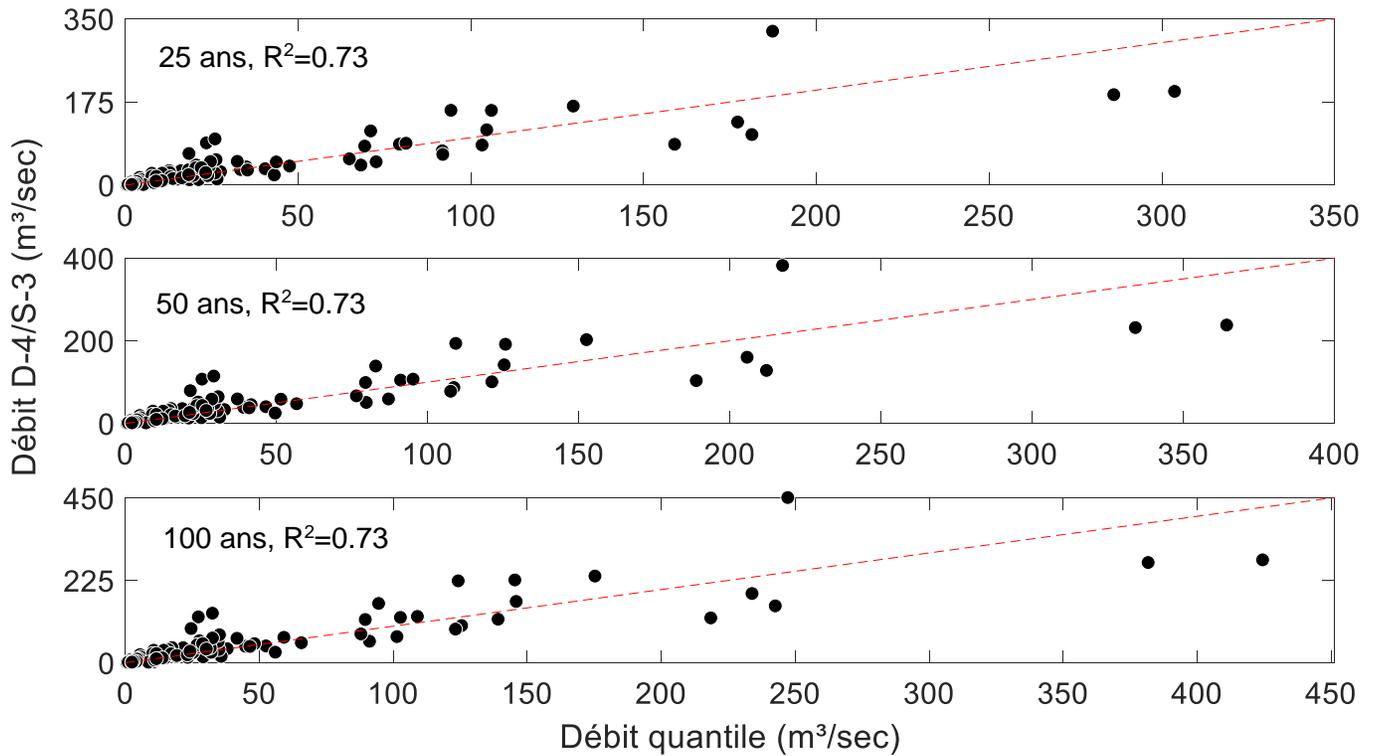


Figure 8.9 - Débits de conception estimés à partir de la version D-4/S-3 de la MÉRA en fonction des DMA estimés à partir des séries mesurées pour les périodes de retour : a) 25 ans; b) 50 ans; c) 100 ans.

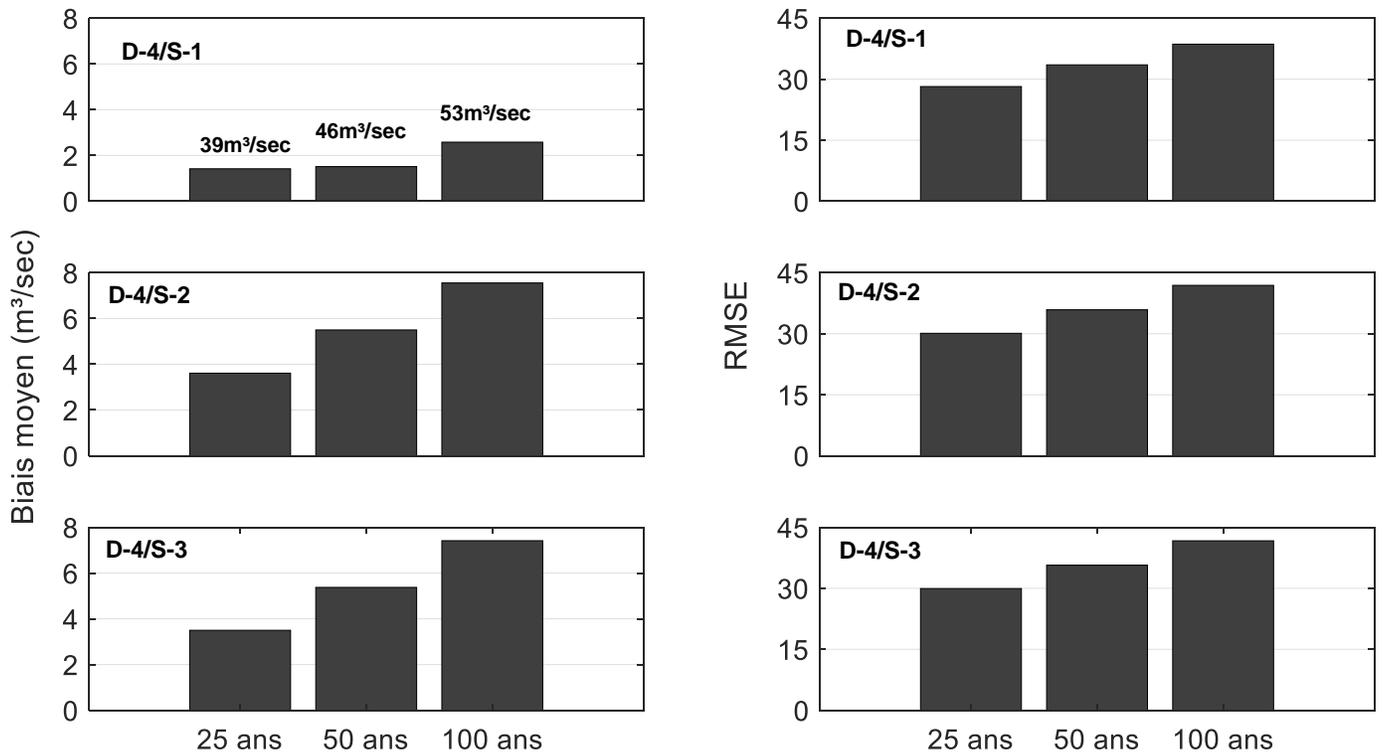


Figure 8.10 – Biais moyen (m^3/sec) (colonne de gauche) et des erreurs quadratiques moyennes (RMSE; colonne de droite) pour les versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3 en fonction de la période de retour (25, 50 et 100 ans). Les débits apparaissant dans le graphique à haut à gauche correspondent aux débits moyens pour chaque période de retour.

8.4 Limites d'application et incertitudes

La Figure 8.11 présente la distribution des écarts absolus entre les débits spécifiques estimés à partir de la MÉRA (version D-4/S-2) et les débits spécifiques estimés à partir des séries de débits mesurés pour la PdR 25 ans (MÉRA – mesurés). Cette figure montre sans surprise que les écarts absolus augmentent en fonction du débit spécifique et qu'en majorité, les valeurs estimées par la MÉRA sont supérieures aux valeurs estimées à partir des séries mesurées (écarts plus souvent positifs que négatifs). Par ailleurs on constate que les écarts relatifs peuvent être pour certains BV supérieurs à 100% (points situés au-dessus de la droite de pente +1). Les sous-estimations par la MÉRA sont possibles (écarts absolus négatifs) et peuvent atteindre dans certains cas près de 80%. Trois BV présentent par ailleurs des sous-estimation supérieures à 50% (points situés entre les droites de pente -1 et $-\frac{1}{2}$).

Cette figure peut être utile afin de limiter les risques de sous-estimations des débits de conception par la MÉRA. En effet, les écarts affichés peuvent servir de guide en vue de majorer les débits MÉRA afin d'éviter les risques de sous-estimations des débits de conception, et donc de sous-dimensionnements.

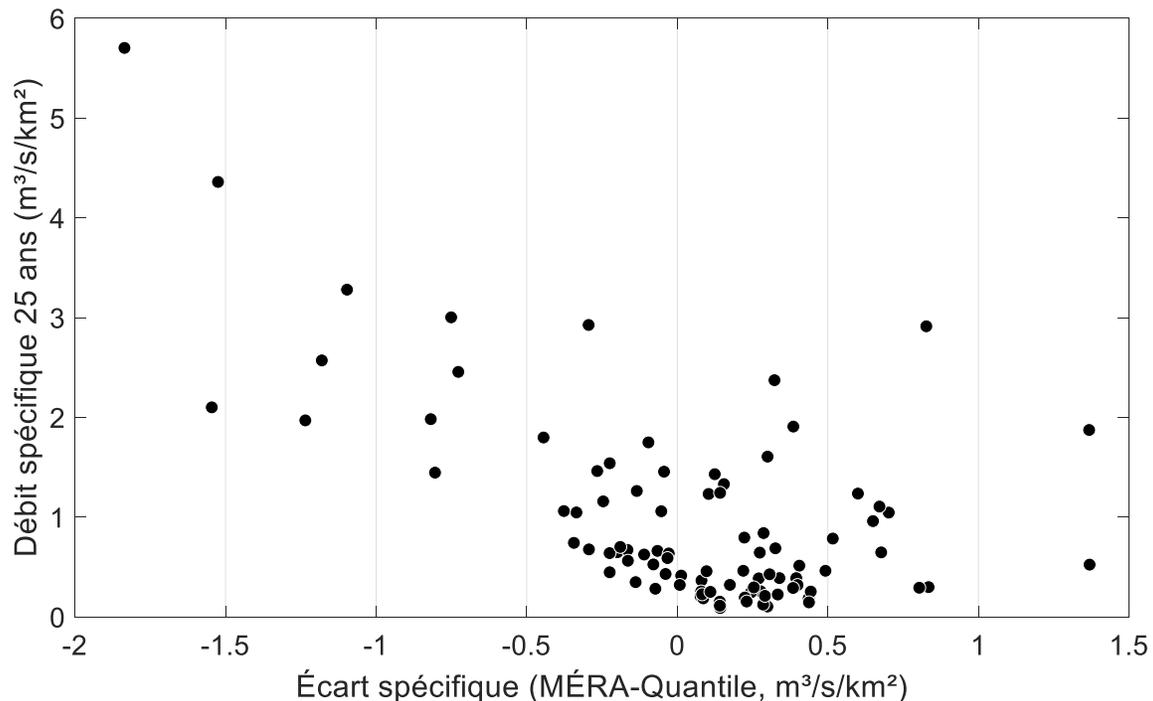


Figure 8.11 – Écarts absolus entre débits spécifiques estimés par la MÉRA et les débits spécifiques estimés à partir des débits mesurés (MÉRA-mesuré) en fonction du débit spécifique mesurés.

Plusieurs sources d'incertitudes peuvent expliquer ces écarts entre les débits estimés par la MÉRA et DMA estimés à partir des débits mesurés.

Un premier groupe d'incertitudes est lié aux DMA estimés à partir des débits mesurés qui sont de deux ordres : incertitudes sur les mesures de débits et incertitudes statistiques sur l'estimation des quantiles de débits extrêmes. Les incertitudes sur les mesures de débits peuvent être souvent très importantes notamment pour les débits les plus extrêmes qui dépassent les valeurs utilisées pour la construction de la courbe de tarage (voir par exemple Coxon *et al.*, 2015 ; McMillan *et al.*, 2017). Les incertitudes d'estimation des quantiles de débits extrêmes pour leur part seront fonctions de la longueur des séries disponibles, de la qualité de l'ajustement à la distribution retenue et de la PdR considérée. Ces deux éléments expliquent pourquoi les incertitudes sur les quantiles de débits extrêmes seront d'autant plus incertaines que la PdR considérée sera grande.

Le deuxième groupe d'incertitudes concerne plus spécifiquement la MÉRA et inclus les incertitudes liées à l'utilisation de la MÉRA, sur l'estimation du TC, sur les intensités des courbes IDF, sur l'estimation des CR et sur l'estimation des différentes caractéristiques physiographiques notamment la superficie du BV.

La plus grande source d'imprécision vient sans doute de l'utilisation de la MÉRA qui repose, comme on l'a vu, sur plusieurs hypothèses simplificatrices. Bien que plausibles, ces hypothèses sont difficiles à vérifier une à une et font en sorte que les estimés obtenus par la MÉRA doivent être vus comme des 'premières approximations' utiles des valeurs réelles.

L'utilisation de la MÉRA demande par ailleurs de préciser un certain nombre de paramètres tels le TC et le CR. Le Chapitre 5 a permis de mettre en lumière la difficulté de définir et d'estimer une valeur de TC. Les valeurs estimées sont donc très incertaines dans la mesure où il existe une valeur 'réelle' du TC.

Les valeurs de TC sont ensuite utilisées pour estimer les intensités de pluies à partir des courbes IDF. Plusieurs incertitudes sont associées à ces courbes (voir CSA 2019). D'abord, les erreurs de mesures qui sont plus importantes pour les pluies les plus intenses (phénomène de sous captation). Ensuite les incertitudes liées à l'estimation des quantiles de pluies extrêmes, d'autant plus importantes que les séries disponibles sont courtes.

De tous les paramètres de la MÉRA, l'estimation du CR est sans doute la plus incertaine. Le Chapitre 7 a montré que les valeurs proposées dans la littérature sont souvent subjectives. Des valeurs ont été proposées dans le cadre de cette étude mais sont fortement dépendantes de l'échantillon de BV considéré. Bien que très diversifié d'un point de vue hydrologique, cet échantillon ne peut être représentatif de toute la diversité des BV possibles.

8.5 Résumé et conclusion

Les principaux résultats et conclusion de ce chapitre sont :

- Les versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3 de la MÉRA offrent de meilleures performances que la version Williams-MTQ. Les coefficients de détermination (R^2) sont plus élevés alors que les biais moyens et les RMSE sont inférieures.
- Les performances des versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3 sont très similaires.
- L'analyse en fonction des classes de pente montre que la version D-4/S-1 peut conduire à des biais moyens négatifs (sous-estimation des débits de conception) pour la première et la dernière classe de pente (0-3[et >18%) ce qui n'est pas le cas avec les approches D-4/S-2 et D-4/S-3 où les biais sont positifs (surestimation des débits de conception) pour toutes les classes de pentes.
- L'estimation des débits de conception de PdR 50 et 100 ans à partir des versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3 de la MÉRA est réalisée en considérant une majoration des CR en fonction de la PdR.
- La performance de la MÉRA pour les PdR 50 et 100 ans est identique à la PdR 25 ans en ce qui concerne le coefficient de détermination (R^2) alors qu'elle diminue légèrement pour les biais moyens et la RMSE considérant tous les sites à l'étude.
- Les débits de conception de PdR 25 ans de 27 des 30 BV de moins de 25² km estimés à l'aide de la version D-4/S-2 de la MÉRA, se trouvent à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95% ou supérieure à la borne supérieure de cet intervalle pour les DMA 25 ans. Seulement trois BV ont des débits MÉRA inférieurs à la borne inférieure de l'intervalle 95% des DMA estimés, suggérant une sous-estimation significative dans ces cas. Pour les BV de 25 km² à 100km², l'application de la MÉRA conduit à des débits de conception se trouvant à l'intérieur des intervalles de confiance 95% des DMA estimés à partir des séries mesurés dans 23 cas sur 63 BV et au-delà de la borne supérieure de ces intervalles pour 33 BV. Seuls six BV présentent des débits de conception MÉRA inférieurs au DMA estimés à partir des débits mesurés.
- Considérant que seulement deux des 93 BV sous étude ont des superficies inférieures à 1 km² et le nombre important de BV de moins de 1 km² où la MÉRA est appelée à être appliqué, il est important de voir comment la version proposée de la MÉRA peut être étendue à ces BV et plus spécifiquement comment le TC de ces petits BV peut être estimé. Une équation du TC développée dans le cadre de travaux antérieurs à partir de données sur des parcelles agricoles du Québec méridional dont les superficies variaient entre 0.03 et 0.11 km² et les longueurs du cours d'eau principal entre 0.27 et 1.33 km, est proposée. Cette formulation ne considère que la longueur du cours d'eau principal comme variable explicative. L'utilisation de cette équation est recommandée pour les BV dont la longueur du cours d'eau principal est de moins de deux kilomètres. Il est important de réaliser que cette équation a été développée sur des BV agricoles et risquent donc de sous-estimer les TC de BV forestier par exemple.

La Figure 8.11 a permis de rendre compte des incertitudes parfois importantes des estimations des quantiles extrêmes de débit fourni par la MÉRA. La Figure 8.12 présente ces informations sous une autre forme à savoir la fonction de répartition des rapports (Quantiles MÉRA/Quantiles observés) pour la PdR 25 ans. Une valeur de 1 de ce rapport signifie donc que les quantiles estimés par la MÉRA sont identiques aux quantiles estimés à partir des séries observées alors qu'une valeur inférieure à 1 signifie que les quantiles MÉRA sous-estiment les quantiles observés. La distribution de ces rapports a été ajustée à une distribution Log-normale représentée par la courbe continue à la Figure 8.12. On peut constater que l'ajustement entre les quantiles empiriques et la distribution est satisfaisant.

Un examen de la Figure 8.12 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 d'un facteur deux la valeur observée est de l'ordre de 0.05.

Une telle courbe peut être utilisée dans des situations où une sous-estimation des débits de pointe par la MÉRA pourrait avoir des conséquences importantes en un site donné. Actuellement, tel que mentionné plus haut, la probabilité de sous-estimation des valeurs réelles par la MÉRA est de 40%. Si l'on veut réduire par exemple cette probabilité à 20%, la Figure 8.12 nous montre que le rapport dans ce cas est d'environ 0.75, c'est-à-dire que la probabilité de sous-estimer de 25% la valeur réelle est de 20%. Dès lors, on devrait majorer la valeur MÉRA d'environ $1/0.75$ soit 1.33 ou 33% pour que la probabilité de sous-estimation soit réduite à 20%.

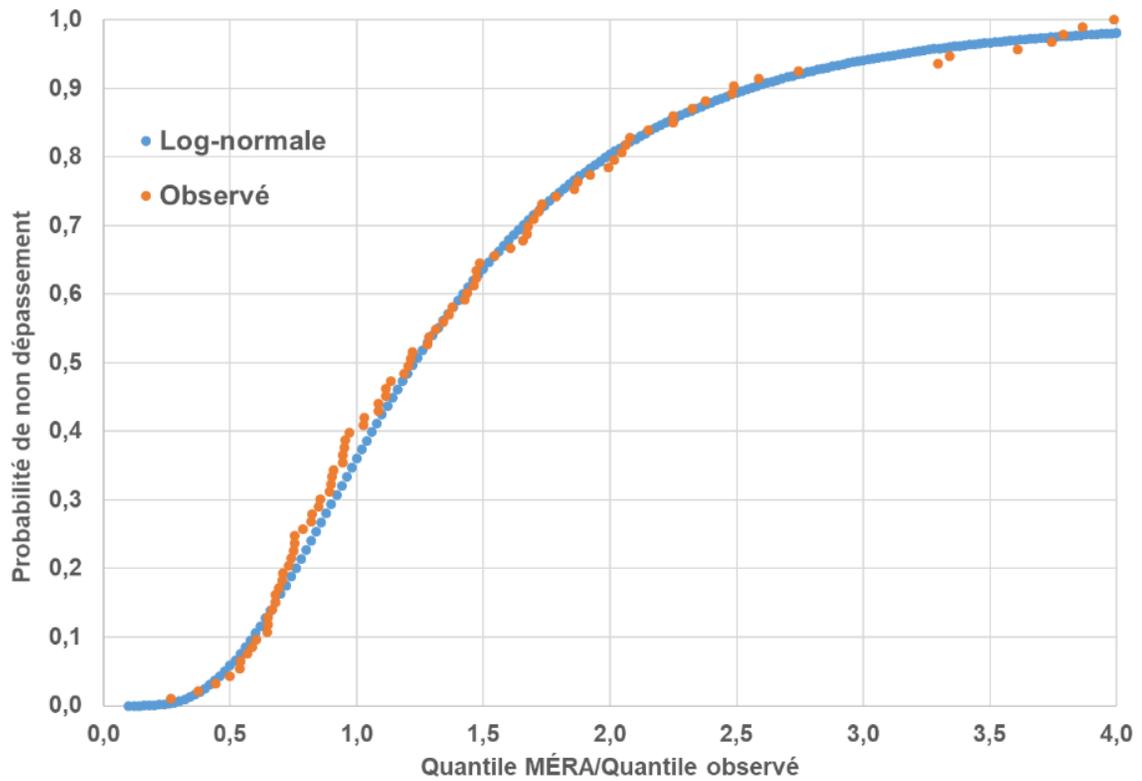


Figure 8.12 – Fonction de répartition des rapports entre quantiles de PdR 25 ans estimés à partir de la MÉRA et quantiles estimés à partir des séries observées (Quantile MÉRA/Quantile observé) aux 93 BV sous étude. Les points correspondent aux valeurs observées alors que la courbe continue correspond à la distribution Log-normale ($\mu = 0.205$; $\sigma = 0.572$).

Chapitre 9. Modélisation hydrologique

Ce chapitre présente les travaux de mise en place et de calage d'un modèle hydrologique à certains des bassins-versants (BV) sous étude. Il est important de rappeler que l'intérêt de l'utilisation d'un modèle hydrologique se justifie, en partie, par le nombre restreint d'années de données de débits enregistrées disponibles et donc par la faible probabilité qu'aient été observé des événements de pluie et les crues correspondantes de périodes de retour (PdR) élevées. Les modèles hydrologiques peuvent ainsi être utilisés pour simuler la réponse hydrologique des BV considérant des pluies de PdR beaucoup plus élevées et donc pertinentes à la conception (PdR de 25 ans ou plus). De plus, le modèle hydrologique peut être utilisé pour la simulation des conditions hydrologiques et de crues futures à partir de sorties de modèles climatiques.

Considérant la petite superficie des BV sous étude et leurs de 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 bassin à mesure que l'on s'éloigne de ce dernier et ce spécialement pour les événements pluvieux courts et intenses souvent localisés spatialement. 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.

Une alternative aux données aux stations peut consister en l'utilisation de jeux de données, telles les réanalyses ou ensembles 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 ces stations sont distantes les unes des autres.

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.

Toutes ces considérations montrent les défis que représente la mise en place de modèle hydrologique sur de petits BV. Le présent chapitre offre un résumé des travaux réalisés à ce sujet. La Section 9.1 présente et décrit le modèle hydrologique retenu. Les BV sélectionnés pour la modélisation hydrologique sont présentés à la Section 9.2. La Section 9.3 explique la procédure utilisée pour le calage du modèle et discute de la performance du modèle hydrologique. La démarche et les résultats relatifs à la simulation des conditions hydrologiques en climat de référence et future à partir des séries de modèles climatiques sont abordés à la Section 9.4 alors que la Section 9.5 présente un résumé des principaux résultats et des principales conclusions du chapitre. Il est à noter que l'on référera au besoin aux autres rapports produits dans le cadre de ce projet pour une description plus détaillée de la méthodologie.

Il est important de noter que les résultats pour cette partie du projet restent très préliminaires notamment ceux concernant les projections hydrologiques utilisant les données de modèles climatiques. La Section 9.4 en explique les raisons.

9.1 Modèle hydrologique retenu

Le modèle hydrologique retenu est le modèle GR5H, un modèle hydrologique comportant cinq paramètres de calage et simulant à un pas de temps horaire (pour une description de l'historique de développement et d'application de ce modèle, voir le Chapitre 3 de Mailhot *et al.* 2020a). 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 qui tentent de reproduire les principaux processus hydrologiques en jeu 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 (P) ; 2) l'évapotranspiration potentielle (E) ; 3) une fonction de production qui détermine la précipitation nette ou la part de précipitation impliquée dans le ruissellement (Pn) ; 4) une fonction de routage basée sur un hydrogramme unitaire (SH2). 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 présentés à la Section 3.2 de Mailhot *et al.* (2020a).

9.2 Bassins-versants retenus pour la modélisation hydrologique

Le modèle GR5H a été appliqué aux six BV suivants (entre parenthèses sont indiqués l'organisme responsable de la station hydrométrique et le numéro de cette station) : 1) Des Aulnaies (FOM, 051004); 2) Des Eaux Volées (FOM, 051002); 3) Des Eaux Volées (FOM, 051003); 4) Rivière Chevrotière (DEH, 062002); 5) Ruisseau Rouge (DEH, 062002); 6) Rivière Montmorency (DEH, 051005). Le Tableau 9.1 présente la superficie, l'occupation du territoire ainsi que le nombre d'années disponibles pour le calage du modèle pour chacun de ces BV.

Il est important de rappeler que les jeux de données utilisés pour la calibration du modèle ont une résolution horaire et qu'ils comprennent les données de débits, de précipitations et de températures. Ces jeux de données couvrent toute l'année. Une attention particulière est toutefois accordée à la période estivale (1^{er} juin au 31 octobre) où l'écoulement se fait en eaux libres. De plus, il s'agit de la période considérée lors de la sélection des BV à la Phase I du projet (Mailhot *et al.* 2018a). Les annexes C à H de Mailhot *et al.* (2019) présentent les jeux de données disponibles à tous ces bassins.

9.3 Calage du modèle hydrologique

Le calage du modèle hydrologique consiste à ajuster les paramètres du modèle de sorte à minimiser la somme des différences au carré entre débits horaires simulés et mesurés (erreur quadratique moyenne ou *mean square error* ou MSE) sur une période dite de calage pour laquelle des données de débits et de précipitations sont disponibles.

Trois périodes de calage ont été considérées : 1) la période estivale (1^{er} juin au 31 octobre); 2) la période hivernale (1^{er} novembre au 31 mai) ;3) l'année complète (1^{er} janvier au 31 décembre). Pour la période estivale, les données horaires de débits, de précipitations et de températures sont utilisées. Pour la période hivernale, les débits disponibles sont horaires alors que les précipitations et températures sont journalières. En effet, très peu de stations enregistrant des précipitations sous-journalières sont en opération en hiver. Il faut aussi garder à l'esprit que les incertitudes sur les mesures de précipitations solides (neige) peuvent être très importantes (Pierre *et al.* 2019).

Tableau 9.1 – Liste et principales caractéristiques des BV retenus pour la modélisation hydrologique

Bassin-versant ¹	Superficie (km ²)	Occupation du territoire (%)				Nombre d'années disponible pour le calage du modèle hydrologique
		Forestier	Agricole	Lacs et milieux humides	Autre	
Des Aulnaies (FOM, 051004)	1.6	100	0	0	0	16
Des Eaux Volées (FOM, 051002)	3.6	99	0	1	0	18
Des Eaux Volées (FOM, 051003)	8.4	99	0	1	0	18
Rivière Chevrotière (DEH ¹ , 050501)	19.4	82	8	8	2	12
Ruisseau Rouge (DEH, 062002)	26.8	51	40	8	1	10
Rivière Montmorency (DEH, 051005)	264.6	98	0	1	1	13

1. Le nom de l'organisme en charge de l'opération de la station hydrométrique et le numéro de station hydrométrique sont indiqués entre parenthèses (DEH : Direction de l'expertise hydrique, Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques; MFFP : Ministère de la forêt de la faune et des parcs; FOM : Forêt Montmorency).

Tableau 9.2 – Valeurs du critère de Nash-Sutcliffe (NSE) suite au calage du modèle hydrologique GR5H aux BV sous étude

Bassin	NSE estival (1 ^{er} juin au 31 octobre)	NSE année complète	Valeur annuelle minimale NSE estivaux (année)	Valeur annuelle maximale NSE estivaux (année)
Des Aulnaies (FOM, 051004)	0.82	0.69	0.13 (2011)	0.90 (2005)
Des Eaux Volées (FOM, 051002)	0.80	0.77	0.41 (2007)	0.88 (2013)
Des Eaux Volées (FOM, 051003)	0.82	0.77	0.45 (2008)	0.91 (2013)
Rivière Chevrotière (DEH, 050501)	0.77	0.75	0.47 (2009)	0.93 (2016)
Ruisseau Rouge (DEH, 062002)	0.78	0.76	-0.32 (2010)	0.94 (2018)
Rivière Montmorency (DEH, 051005)	0.63	0.76	0.20 (2006)	0.80 (2015)

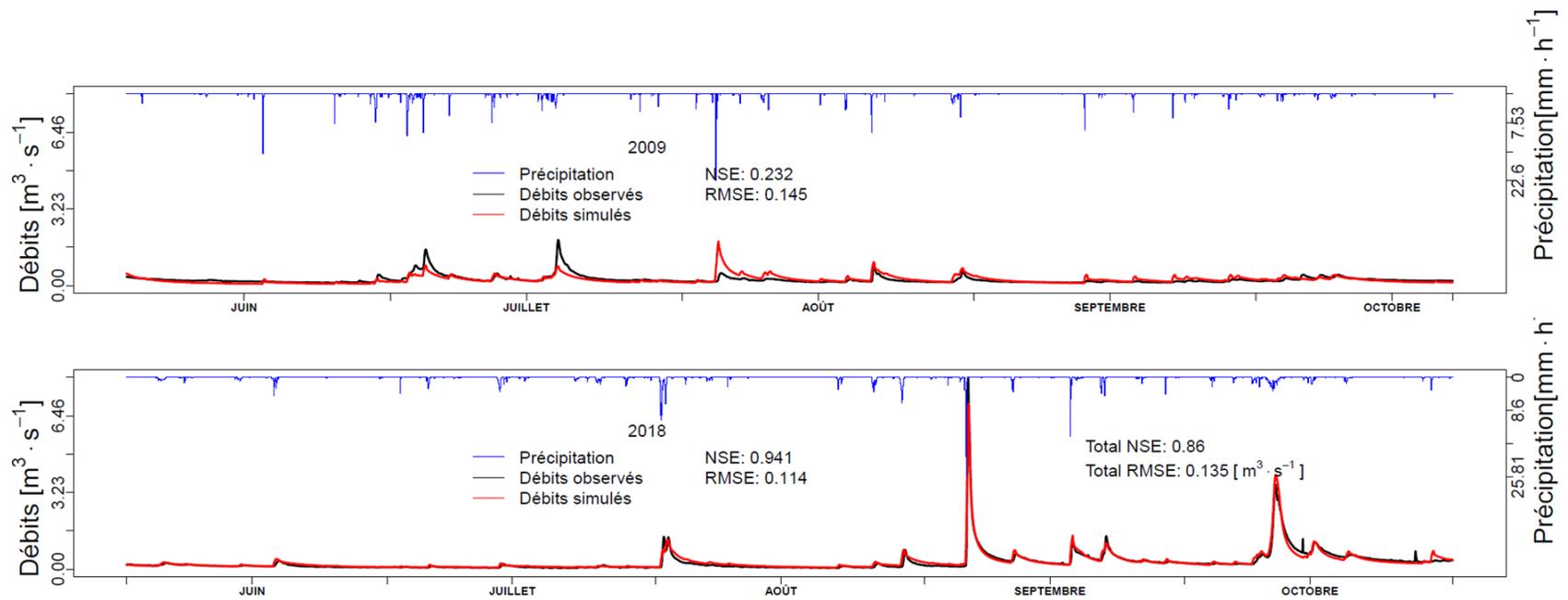


Figure 9.1 – Comparaison des débits simulés (courbe rouge) et observés (courbe noire) (axe de gauche) pour le ruisseau Rouge (DEH, 062002) pour les années 2009 (haut) et 2018 (bas). Les précipitations (en bleu) réfèrent à l'axe de droite.

Le calage des paramètres du modèle hydrologique a été réalisé en minimisant l'erreur quadratique moyenne (MSE) annuelle pour les périodes où des données (précipitations, températures et débits) sont disponibles et où ces mesures sont jugées fiables. Le calage du modèle en période estivale a donc été réalisé en considérant les séries horaires de précipitations et de températures et les séries horaires de débits. Pour la période hivernale, les données de précipitations journalières disponibles ont été réparties uniformément sur les 24 heures. D'autres méthodes de désagrégation temporelle auraient pu être mise en place mais considérant qu'en période hivernale les précipitations sont majoritairement solides et s'accumulent dans une large part pour constituer le stock de neige qui contribuera à la crue printanière, une distribution uniforme des précipitations journalières semble *a priori* raisonnable. La situation pourra cependant être différente lorsque surviennent des pluies en période hivernale qui pourraient entraîner une hausse rapide du ruissellement et des écoulements en rivière. Enfin, tel que mentionné plus haut, les débits simulés durant la période hivernale ne sont pas utilisés pour le calage du modèle puisque jugés non fiables.

Il est important de mentionner que le calage du modèle a permis d'identifier de nombreuses incohérences entre les précipitations et les débits mesurés (p. ex. précipitations importantes sans augmentations des débits ou augmentation notable des débits sans précipitations) et de ce fait améliorer le contrôle de qualité des données disponibles. L'Annexe B de Mailhot *et al.* (2020a) donne une description des incohérences observées dans les séries observées et explique quelles corrections ont été apportées à ces séries.

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 en 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 9.2 présente les valeurs annuelles et estivales des NSE sur toute la série ainsi que les valeurs minimales et maximales annuelles.

Les résultats présentés au Tableau 9.2 montrent que le modèle hydrologique GR5H simule de façon réaliste les débits observés. Les NSE annuels varient ainsi entre 0.69 (Des Aulnaies - 051004) et 0.77 (Des Eaux Volées 051002 et 051003). De plus il est intéressant de noter que la performance du modèle en période estivale dépasse la performance annuelle sauf pour le BV Rivière Montmorency où le NSE estival (0.63) est inférieur au NSE annuel (0.77).

La performance du modèle varie cependant grandement d'une année à l'autre. Pour chaque site, des NSE estivaux plus faibles sont généralement observés pour une ou deux années. La Figure 9.1 présente un exemple pour le ruisseau Rouge (DEH, 062002) où une valeur de 0.23 est obtenue en 2009 (ce qui correspond à un accord médiocre entre débits simulés et observés mais n'est pas l'année avec la pire performance en l'occurrence 2010 avec un NSE de -0.32) alors qu'un NSE estival de 0.94 est obtenu pour l'année 2018. On peut observer une incapacité du modèle à simuler les débits de crues

au cours des mois de juin et juillet pour l'année 2009 alors que les débits simulés sont systématiquement surestimés à partir du début du mois d'août. À noter également que les valeurs de débit de l'année 2009 sont petites par rapport à l'année 2018. Ce constat est souvent observé à savoir que la performance du modèle hydrologique pour les années de faible hydraulité est souvent moins bonne que pour les années présentant une plus grande variabilité des débits marquées par plusieurs crues et décrues.

De même, une analyse de ces résultats a permis de conclure que la qualité et la représentativité des données météorologiques jouent un rôle crucial dans la qualité du calage. On observe en effet généralement une dégradation de la qualité des ajustements lorsque des données de stations plus éloignées du BV sont utilisées comme données d'entrée du modèle hydrologique et ce même si cette station se trouve à quelques kilomètres du BV. Ceci montre l'importance, pour des BV de petites superficies, d'utiliser des données météorologiques représentatives des conditions locales puisque la réponse hydrologique rapide de ces BV est gouvernée par ces conditions. Cette assertion est d'autant plus vraie pour les événements hydrologiques extrêmes puisqu'elles résultent de pluies extrêmes associées à des systèmes météorologiques très localisés.

9.4 Simulations hydrologiques en climat passé et futur

L'investigation des impacts hydrologiques des changements climatiques (CC) exige dans un premier temps de vérifier dans quelle mesure les simulations hydrologiques utilisant les données de modèles climatiques (séries de températures et de précipitations) offrent une représentation acceptable des conditions hydrologiques passées.

Le grand ensemble du *Canadian Regional Climate Model* (CRCM5 v3.3.3.1; Martynov et al. 2013, Šeparović et al. 2013) a été considéré, le même ensemble que celui utilisé par Innocenti *et al.* (2019a) pour le développement de projections futures des précipitations extrêmes (voir la Section 10.2.1 pour une description du CRCM5-LE de même que Leduc *et al.* 2019). Cet ensemble regroupe 50 simulations climatiques sur la période 1954 à 2099 utilisant le RCP 8.5, un scénario pessimiste d'évolution des gaz à effet de serre (voir Section 10.1 pour une description des scénarios RCP). Le domaine de simulation correspond à la partie nord-est de l'Amérique du Nord (Figure 10.2). Chacune des 50 simulations représentent une réalisation possible du climat futur. Les données de précipitations du CRCM5-LE sont archivées à un pas de temps horaire et la résolution spatiale (taille des points de grille) est d'environ 12 km. Chaque point de grille occupe donc une surface d'environ 144 km² soit une superficie très supérieure à la superficie des BV où le modèle hydrologique est appliqué (voir Tableau 9.1). Ce point est important à souligner puisqu'il signifie que les précipitations simulées par le CRCM5-LE, qui représentent en quelque sorte la précipitation moyenne sur 144 km², sous-estimeront très vraisemblablement les précipitations les plus extrêmes et plus localisées.

Des BV du Tableau 9.1, seuls les résultats pour le BV rivière Rouge seront présentés et analysés dans ce qui suit. Les séries horaires de précipitations et journalières de températures minimales et maximales simulées pour le point de grille couvrant le BV ont été extraites et utilisées comme données d'entrée du modèle GR5H. Les paramètres du

modèle obtenus après calage du modèle à partir des séries observées ont été utilisés pour la simulation hydrologique (voir section précédente). Chacune des 50 simulations climatiques a été simulé résultant en 50 séries de débits horaires simulés à l'exutoire du BV. La période de référence 1990-2020 (30 ans) a été considérée dans un premier temps pour simuler les débits.

La Figure 9.2 présente une synthèse des résultats obtenus. Cette figure permet d'abord de constater que les débits maxima annuels (DMA) estimés à partir de la simulation hydrologique utilisant les données météorologiques observées comme données d'entrée (croix rouges de la Figure 9.2), les mêmes qui ont servis au calage du modèle, tendent à sous-estimer les valeurs correspondantes estimées à partir des débits observés (points noirs de la Figure 9.2) pour les PdR plus élevées ($T \geq 5$ ans). Ce résultat pourrait s'expliquer par une tendance du modèle hydrologique à sous-estimer les débits les plus extrêmes mais cette hypothèse n'a pas été vérifiée.

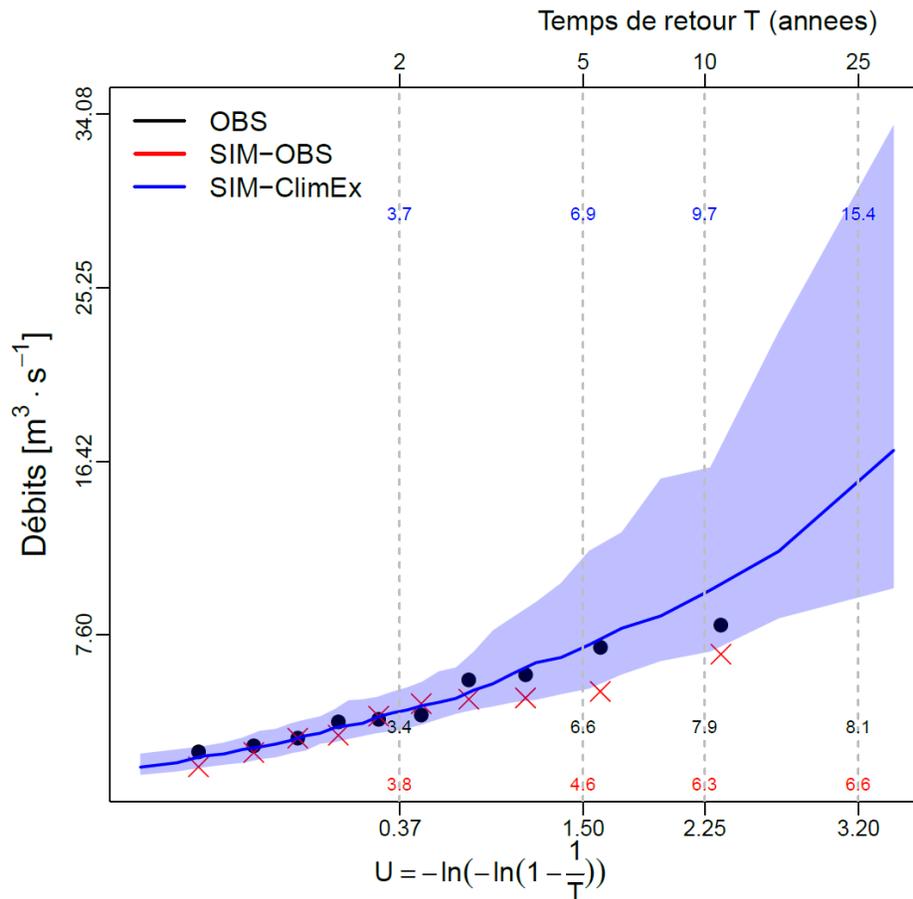


Figure 9.2 - Débits maxima annuels observés et simulés à partir du CRCM5-LE sur le BV du ruisseau Rouge. L'échelle des x correspond au quantile Gumbel pour diverses périodes de retour T indiquées sur l'axe des x au haut du graphique. Les points noirs correspondent aux valeurs estimées à partir des débits observés, les croix rouges, à partir des débits simulés avec des séries de précipitations et températures observées, et le trait (médiane) et la zone bleue (intervalles 95%), à partir des 50 séries de précipitations et températures du CRCM5-LE. Les chiffres le long des lignes verticales en tirets indiquent les valeurs estimées des débits maxima annuels de périodes de retour 2, 5, 10 et 25 ans.

L'accord entre les DMA estimés à partir des débits observés (points noirs de la Figure 9.2) et ceux estimés à partir des séries climatiques (croix rouges de la Figure 9.2) est notable pour les PdR de 5 ans et moins alors que les DMA simulés surestiment les valeurs observées pour les PdR 10 et 25 ans, cette surestimation atteignant 90% de la valeur observée pour la PdR 25 ans.

Le résultat précédent a de quoi surprendre considérant que les précipitations extrêmes simulées par les modèles climatiques ont tendance à sous-estimer les valeurs observées et que, conséquemment, en toute logique, les débits extrêmes simulés par le modèle hydrologique devraient également sous-estimer les débits extrêmes observés.

Une comparaison plus poussée comparant les précipitations et températures simulées par le modèle climatique aux valeurs observées (p. ex. moyennes saisonnières et annuelles) montrent l'existence de plusieurs biais, c'est-à-dire de différences entre les valeurs moyennes simulées et observées. Ces biais n'ont en soi rien de surprenant puisque tous les modèles présentent de tels biais. Leur existence implique cependant que l'utilisation des séries 'brutes' simulées comme données d'entrée du modèle hydrologique en climat de référence et pour le développement de projections futures conduirait à des valeurs vraisemblablement irréalistes. Ces biais doivent donc être 'corrigés' avant que les séries climatiques simulées puissent être utilisées pour la modélisation des conditions hydrologiques futures.

Les biais des modèles climatiques sont généralement corrigés de sorte à ce qu'après correction, les valeurs simulées par les modèles se rapprochent des valeurs observées. Ces 'corrections' sont ensuite apportées aux valeurs simulées en climat futur. Les différences entre ces deux versions 'corrigées' des valeurs simulées entre climat futur et climat de référence sont ensuite interprétées comme le 'signal climatique'. L'hypothèse sous-jacente a une telle approche est que les biais observés sont suffisamment similaires entre climat de référence et futur qu'une correction de ces derniers sur ces deux périodes permet de 'récupérer' le signal climatique. Plusieurs méthodes, appelées 'méthodes de correction de biais', ont été proposées dans la littérature (le lecteur intéressé par cette question peut consulter Maraun *et al.* 2010).

Dans le cas présent, le bon accord entre les DMA observés et estimés à partir du CRCM5-LE, considérant l'existence de tels biais, pourrait être attribuable à un effet de compensation entre l'existence de biais sur les précipitations et les températures. Ainsi cet accord entre valeurs observées et simulées ne peut être interprété comme une validation de la qualité des séries simulées. Il est donc important de corriger ces biais avant de pouvoir simuler les conditions hydrologiques futures.

Plusieurs tests ont été réalisés en ce sens (ces derniers ne sont pas présentés ici par souci de concision). Ces tests ont utilisé des méthodes de correction de biais adaptées à la problématique présente (Vaithinada Ayar *et al.* 2020). Ces essais n'ont cependant pas été concluant et ne seront pas présentés dans ce qui suit. Il appert en fait que la méthode de correction de biais appliquée ne permet pas de corriger adéquatement les séries des modèles climatiques de sorte qu'elles puissent être utilisées dans la modélisation hydrologique. Les DMA estimés en climat futur sur la base de ces simulations

hydrologiques sont trop incertains et reposent sur plusieurs hypothèses qui demanderaient à être davantage explorées. Des analyses complémentaires devront être conduites pour valider ces résultats et consolider les approches utilisées.

9.5 Résumé et conclusion

Le présent chapitre visait à rendre compte des travaux et résultats relatifs à la mise en place d'un modèle hydrologique. Les principaux éléments et principales conclusions à retenir de ces travaux sont :

- La mise en place d'un modèle hydrologique sur des BV de moins de 200 km² pose plusieurs défis tant en matière de modélisation hydrologique comme telle (peu de modèles ont été spécifiquement développés pour ce type de BV) que de disponibilité de données de précipitations et de températures nécessaires au calage et à l'utilisation de ces modèles (peu de stations hydrométriques et météorologiques enregistrant et archivant des données sous-journalières).
- Le modèle hydrologique retenu est le modèle GR5H, un modèle hydrologique comportant cinq paramètres de calage et simulant à un pas de temps horaire; Les principaux arguments militant en faveur de ce modèle sont sa simplicité, tant d'un point de vue structurel que de mise en place, et les exemples d'application très divers trouvés dans la littérature. Le module CemaNeige a été intégré au modèle GR5H pour simuler les conditions hydrologiques hivernales.
- Le modèle GR5H a été appliqué à six BV (Des Aulnaies 051004; Des Eaux Volées 051002; Des Eaux Volées 051003; Rivière Chevrotière 062002; Ruisseau Rouge 062002; Rivière Montmorency 051005) situés au Québec dont les superficies sont comprises entre 1.6 km² et 264.6 km²; ces BV sont principalement forestier (un seul BV a une occupation agricole importante) et compte de 0 à 8% de lacs et milieux humides; le nombre d'années de données disponibles pour le calage du modèle hydrologique varie de 10 à 18 ans.
- Le calage du modèle hydrologique a permis de mettre en lumière de nombreuses incohérences entre les précipitations et les débits mesurés (p. ex. précipitations importantes sans augmentations des débits ou augmentation notable des débits sans précipitations) et de procéder à un contrôle de qualité rigoureux de ces données.
- Le critère Nash-Sutcliffe (NSE) a été retenu pour quantifier la performance du modèle. Après calage, le modèle hydrologique GR5H simule de façon réaliste les débits observés avec des NSE annuels variant entre 0.69 et 0.77 pour les six BV. La performance du modèle en période estivale (1^{er} juin au 31 octobre) est supérieure à la performance annuelle sauf pour l'un des BV (Rivière Montmorency); la performance du modèle est cependant très variable d'une année à l'autre et souvent plus mauvaise les années de faible hydraulicité.
- Ces résultats ont montré toute l'importance de disposer de données météorologiques locales de bonne qualité pour la modélisation hydrologique pour des BV de petites dimensions; en effet l'utilisation de données météorologiques donnant une

représentation incomplète de la réalité sur le BV (p. ex. provenant d'une station plus éloignée du BV) résulte en une dégradation marquée de la performance du modèle hydrologique.

- L'investigation des impacts hydrologiques potentiels des changements climatiques sur les DMA du BV du ruisseau Rouge a été réalisée en utilisant le grand ensemble du *Canadian Regional Climate Model* (CRCM5-LE) composé de 50 simulations climatiques sur la période 1954 à 2099 considérant le RCP 8.5 (point de grille de résolution spatiale de 12 km x 12 km); les séries de précipitations horaires et de températures simulées ont été extraites au point de grille couvrant le BV du ruisseau Rouge.
- On observe un bon accord entre les quantiles de DMA estimés à partir des débits observés et des débits simulés à partir des séries de précipitations et de températures du CRCM5-LE pour les PdR de 5 ans et moins alors que les DMA simulés surestiment les valeurs observées pour les PdR 10 et 25 ans, cette surestimation s'accroissant avec la PdR.
- Le résultat précédent a de quoi surprendre considérant que les précipitations extrêmes simulées par les modèles climatiques ont tendance à sous-estimer les valeurs observées et que, conséquemment, en toute logique, les débits extrêmes simulés par le modèle hydrologique devraient également sous-estimer les débits extrêmes observés.
- Une analyse plus poussée comparant les précipitations et températures simulées par le modèle climatique aux valeurs observées révèle l'existence de plusieurs biais dans les valeurs simulées (résultat mainte fois rapporté dans la littérature); ces biais doivent être 'corrigés' avant de pouvoir utiliser les séries climatiques simulées pour la modélisation des conditions hydrologiques futures;
- L'application de méthodes de correction de biais à priori adaptées à la problématique présente n'a pas été concluante puisqu'elle n'a pas permis de corriger adéquatement les séries des modèles climatiques de sorte que les DMA estimés en climat futur sur la base de ces simulations hydrologiques sont trop incertains pour être exploitables ou d'une quelconque utilité pour le développement de projections futures; des analyses complémentaires devront être conduites pour valider ces résultats et consolider les approches utilisées.

Chapitre 10. Courbes IDF en climat futur et prise en compte des changements climatiques dans la conception

Le présent chapitre rend compte des travaux portant sur l'évolution future des précipitations extrêmes afin de revoir les recommandations proposées dans Mailhot *et al.* (2014). Une révision de ces recommandations s'impose considérant les progrès importants en matière de modélisation climatique et notamment l'amélioration de la résolution des modèles et de la représentation de certains processus importants liés aux précipitations extrêmes.

L'approche retenue consiste à procéder à une revue de littérature des travaux les plus récents visant à développer des projections sur les pluies extrêmes et reprend celle utilisée dans le cadre des travaux ayant conduit aux recommandations formulées dans Mailhot *et al.* (2014). La revue de littérature s'est intéressée aux études couvrant en tout ou en partie l'est du Canada et inclut les travaux de l'équipe du prof. Mailhot réalisés dans le cadre de différents mandats et études scientifiques. Les valeurs recommandées dans le cadre du présent rapport s'appuient donc sur une synthèse et une analyse critique de ces travaux. Cette approche se justifie par la grande diversité d'études publiées sur le sujet et sur les incertitudes encore importantes sur les projections actuelles des précipitations extrêmes.

Le chapitre est structuré de la façon suivante. La Section 10.1 présente un certain nombre de considérations générales sur les précipitations extrêmes et les changements climatiques (CC) et décrit de façon sommaire certains concepts importants en modélisation climatique nécessaire à la compréhension du chapitre. La Section 10.2 passe en revue les avancées les plus récentes en matière de projections climatiques des précipitations extrêmes et présente une synthèse de l'état actuel des connaissances sur le sujet. Cette synthèse servira de base aux recommandations sur les majorations à appliquer qui sont détaillées à la Section 10.3. La Section 10.4 discute de la signification des majorations proposées, des incertitudes et des limites associées et fournit des pistes sur la façon d'interpréter et d'utiliser les recommandations proposées dans le présent document. Enfin la Section 10.5 décrit la démarche retenue pour tenir compte des changements climatiques dans la conception d'ouvrage hydrauliques.

Il est important de noter qu'une étude similaire a été réalisée pour le compte de la Communauté Métropolitaine de Québec (CMQ) et la ville de Québec et que les majorations recommandées proposées ici sont similaires à celle de cette étude (Mailhot *et al.*, 2020b). Le texte qui suit reprend pour l'essentiel le Chapitre 7 du rapport pour la CMQ et la ville de Québec portant sur les majorations des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF).

10.1 Considérations générales

Plusieurs études suggèrent que les précipitations extrêmes seront plus fréquentes et plus intenses en climat futur (voir p. ex. IPCC 2014 ; Bush et Lemmen, 2019; Ouranos, 2014 ; Westra *et al.* 2014). De même les analyses des séries de précipitations observées suggèrent des augmentations des pluies extrêmes bien que le signal d'un tel changement demeure difficilement détectable compte tenu des séries observées relativement courtes dont nous disposons particulièrement au Canada (voir par exemple Shephard *et al.*, 2014; Kunkel, 2003; Asadieh et Krakauer, 2015).

L'augmentation des intensités des précipitations extrêmes s'explique en partie par le fait qu'une atmosphère plus chaude peut contenir une plus grande quantité d'humidité (pour une synthèse des travaux récents sur le sujet voir Martinkova et Kysely, 2020). La relation décrivant la relation entre contenu en humidité et température s'appelle l'équation de Clausius-Clapeyron (C-C) et indique que l'on peut escompter une augmentation du contenu en humidité d'environ 7%/°C. Ce faisant on peut s'attendre à une augmentation de 7% d'augmentation des intensités de pluie extrêmes pour chaque augmentation d'un degré de la température de surface si l'on ne considère que ce processus. On parle alors de *scaling* de Clausius-Clapeyron (ou *scaling* C-C). Plusieurs études ont toutefois montré que d'autres processus sont également en jeu qui peuvent déterminer l'évolution future des pluies extrêmes dans un contexte de CC. Ainsi les trajectoires des systèmes dépressionnaires pourraient être modifiées dans un contexte de CC affectant du coup les intensités des pluies extrêmes pour certaines régions. Dans ce cas la seule équation de C-C ne pourra expliquer les modifications à venir des pluies extrêmes. La relation de C-C est tout de même souvent évoquée pour comparer les valeurs simulées par les modèles climatiques à ce qui serait obtenu si ce seul processus était en jeu.

Afin d'estimer comment le climat futur sera modifié par les augmentations des émissions et des concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, il est nécessaire de préciser comment ces concentrations évolueront au cours des décennies à venir. De très nombreuses variables détermineront les taux d'émissions futures telles que la démographie, le développement économique, les technologies utilisées, les filières énergétiques, les crises et mouvements sociaux et les politiques environnementales. Un ensemble de scénarios d'évolution des GES, appelés *Representative Concentration Pathways* (RCP), a été défini dans le cadre du 5^e rapport de l'IPCC (Meinshausen *et al.*, 2011; van Vuuren *et al.*, 2011). Ces scénarios sont définis en fonction des variations du forçage radiatif entre les années 1750 et 2100. Le forçage radiatif est défini comme la variation induite par les augmentations de GES sur le bilan net radiatif de la Terre et est exprimé en Watt/m². Autrement dit, il correspond en quelque sorte à l'énergie supplémentaire 'injectée' dans le climat terrestre.

Ces scénarios sont représentés par l'abréviation RCP XX où XX est la variation du bilan net radiatif de la Terre. Quatre scénarios sont ainsi définis (Figure 10.1). Le premier, le scénario RCP2.6, suppose une variation du forçage radiatif de 2.6 W/m², ce qui correspond à une variation faible suite à la mise en place de mesure importante pour

réduire les émissions de GES. Ce forçage attendra un pic dans le courant du XXI^e siècle et décroîtra par la suite jusqu'à la fin du siècle. Un second scénario, RCP4.5, correspond à une variation du forçage radiatif de 4.5 W/m² avec une stabilisation vers 2100. Le troisième, RCP6.0, suppose une variation de 6.0 W/m² du forçage avec une croissance jusqu'en 2100. Enfin le dernier scénario, RCP8.5, correspond à une situation de forte émission de GES tout au long du siècle pour une variation totale du forçage radiatif de 8.5 W/m² pour la période 1750-2100. Comme le montre la Figure 10.1, ces scénarios vont au-delà de 2100 même si la plupart des simulations disponibles se terminent en 2100. Le scénario RCP 2.6 sera qualifié d'optimiste', les RCP 4.5 et 6.0 de 'modérés' et enfin le scénario RCP 8.5 de 'pessimiste'.

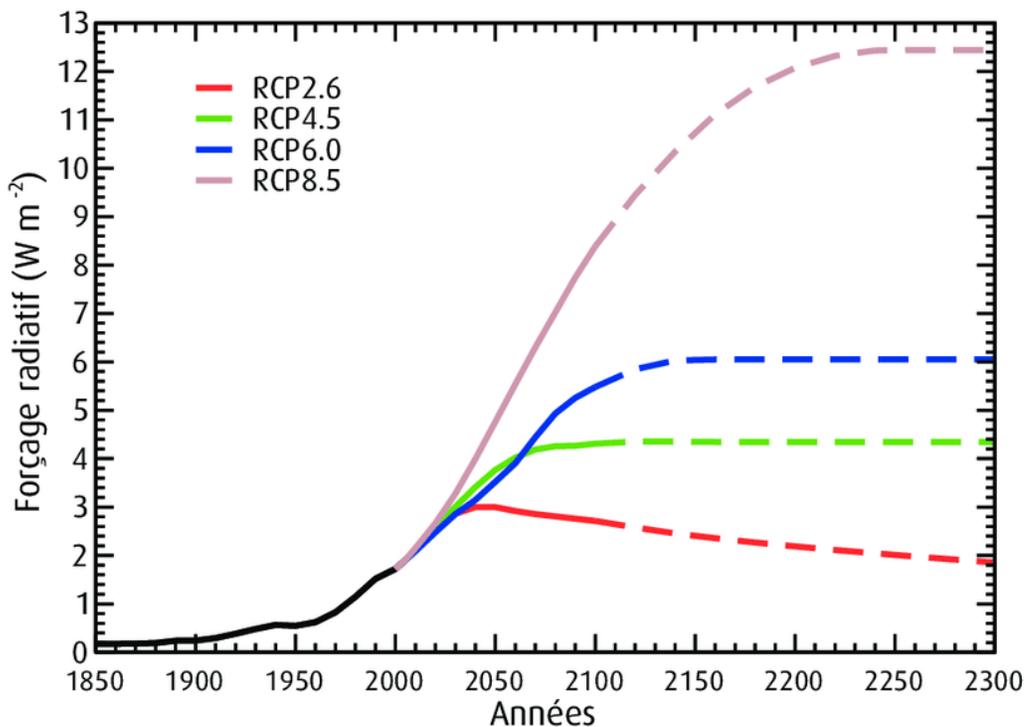


Figure 10.1 - Scénarios de forçage radiatif (*Representative Concentration Pathways* ou RCP) exprimés en W m⁻² proposés dans le cadre du 5^e rapport de l'IPCC. La période historique (avant 2000) correspond au forçage radiatif observé

10.2 Revue et bilan des projections actuelles

La présente section reprend les études les plus récentes et les plus pertinentes à la présente étude. Les paragraphes suivants donnent une courte description de chacune de ces études en insistant sur leurs limitations. Elle ne recense que les études permettant d'extraire une information quantitative concernant les augmentations des pluies extrêmes pour le Québec ou le nord-est de l'Amérique du Nord. Seules les études utilisant des projections climatiques simulées par des modèles climatiques sont retenues. Les études basées sur des approches dites de mise à l'échelle statistique (*statistical downscaling* en anglais) qui utilisent des liens statistiques pour passer de la résolution spatiale

relativement grossière des modèles de climat (souvent des modèles globaux) à des échelles spatiales plus fines, ne sont pas considérées dans ce qui suit (voir par exemple à ce sujet Asong *et al.*, 2016; Sandik *et al.*, 2016; Simonovic *et al.*, 2016). Par ailleurs, l'utilisation de ce type d'approche exige un volume de données historiques rarement disponible et n'est donc généralement par recommandée (Li *et al* 2019 ; CSA 219).

10.2.1 Innocenti et al. (2019a)

Les travaux publiés dans Innocenti *et al.* (2019a) ont été réalisés dans le cadre du doctorat de Mme Silvia Innocenti sous la direction du prof. Mailhot. L'étude utilise le grand ensemble CRCM5-LE (pour plus de détails, voir Leduc *et al.* 2019). Le domaine de simulations couvre le nord-est de l'Amérique du Nord et la période de simulation est 1951-2100. Le scénario de forçage RCP 8.5 (scénario pessimiste) est considéré. Les précipitations horaires simulées sont disponibles en chaque point de grille de résolution 15 km x 15 km. Innocenti *et al.* (2019a) présente la méthodologie et les résultats de cette étude. Innocenti *et al.* (2019b) ont également réalisés des travaux visant à comparer la performance CRCM5-LE avec d'autres données observationnelles et d'autres simulations climatiques.

L'évolution future des Maxima annuels de précipitations (MAP) de durées 1 heure à 24 heures et de période de retour (PdR) 2, 25 et 100 ans a ainsi été investiguée. L'avantage d'un tel ensemble où l'on dispose de plusieurs simulations (50 dans le cas présent) est qu'il permet d'explorer l'évolution future des MAP de grandes PdR (p. ex. 100 ans). De façon globale, les résultats montrent que les augmentations projetées seront plus importantes pour les MAP de courtes durées et de plus longues PdR ou, dit autrement, les extrêmes de courtes durées et plus rares seront plus affectés par les CC.

Les augmentations moyennes simulées par cet ensemble de simulations pour la région comprise entre les latitudes 42° et 52° nord et à l'est du 80° parallèle ont été analysées. Ce territoire couvre le sud du Québec (sud du 52°), la partie est de l'Ontario, les Maritimes, Terre-Neuve et les états du nord-est des États-Unis (Figure 10.2). Ce territoire sera désigné dans ce qui suit par sud-Québec même s'il comprend des régions extraterritoriales au Québec.

Les augmentations des précipitations extrêmes moyennes sur le territoire décrit plus haut ont été ajustées à l'équation suivante :

$$Y(t) = \alpha e^{\beta t} \quad (10.1)$$

où t est le temps (exprimé en décennies), $Y(t)$ est la valeur au temps t et α et β deux paramètres d'ajustement. La Figure 10.3 montre la distribution des valeurs aux points de grille du sud Québec pour les PdR 2, 5 et 25 ans alors que la Figure 10.4 montre l'évolution des valeurs moyennes de β sur le territoire pour les PdR 2, 25 et 100 ans en fonction de la durée pour les trois PdR considérées. Cette dernière figure suggère que les hausses sont plus importantes lorsque la PdR augmente et la durée des événements diminue. Dès lors les évènements de précipitations extrêmes courts et rares seront les plus affectés par les CC.

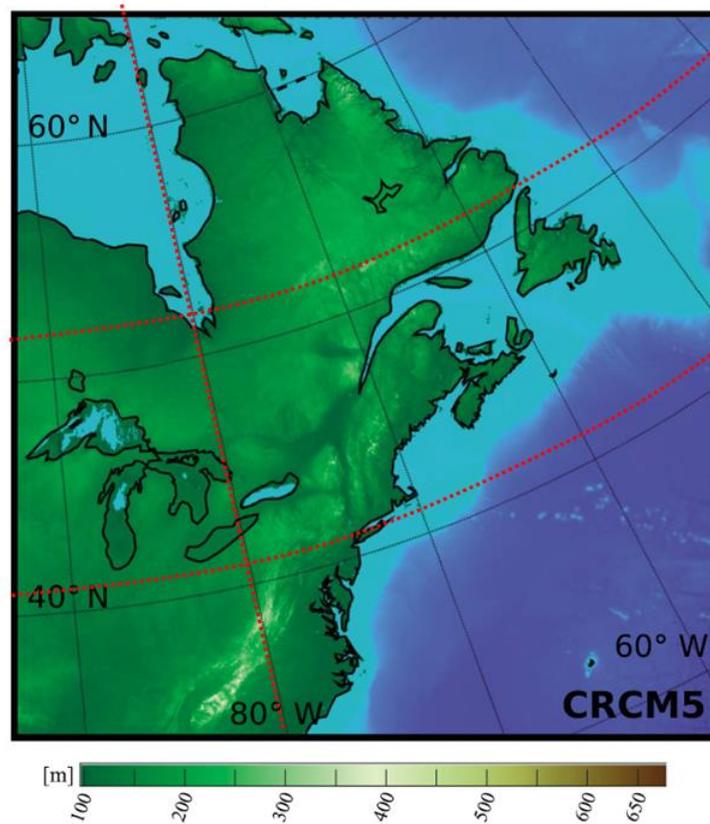


Figure 10.2 - Domaine de simulation du CRCM5. Les lignes rouges pointillées correspondent au territoire considéré pour l'estimation des variations des précipitations (entre 42° et 52° parallèles nord et à l'est de la longitude 80° ouest).

Si on considère les augmentations entre les décennies t_2 et t_1 , on a pour l'augmentation relative entre ces deux décennies :

$$\delta Y_{t_2-t_1} = \frac{Y(t_2) - Y(t_1)}{Y(t_1)} = \frac{\exp(\beta t_2) - \exp(\beta t_1)}{\exp(\beta t_1)} = \exp[\beta(t_2 - t_1)] - 1$$

Le Tableau 10.1 présente les valeurs correspondantes pour les périodes futures 2020-2040, 2040-2060, 2060-2080 et 2080-2100 en considérant la décennie 1990-2020 comme période de référence. La Figure 10.5 reprend ces valeurs sous forme graphique.

Ainsi selon Innocenti *et al.* (2019a), les augmentations projetées augmentent lorsque la PdR augmente et la durée diminue et ce quel que soit l'horizon futur considéré. Les augmentations relatives seront également plus importantes pour les périodes futures plus éloignées. Il est important de mentionner finalement que ces résultats sont basés sur les simulations d'un seul modèle climatique et ne considère que le scénario pessimiste RCP 8.5.

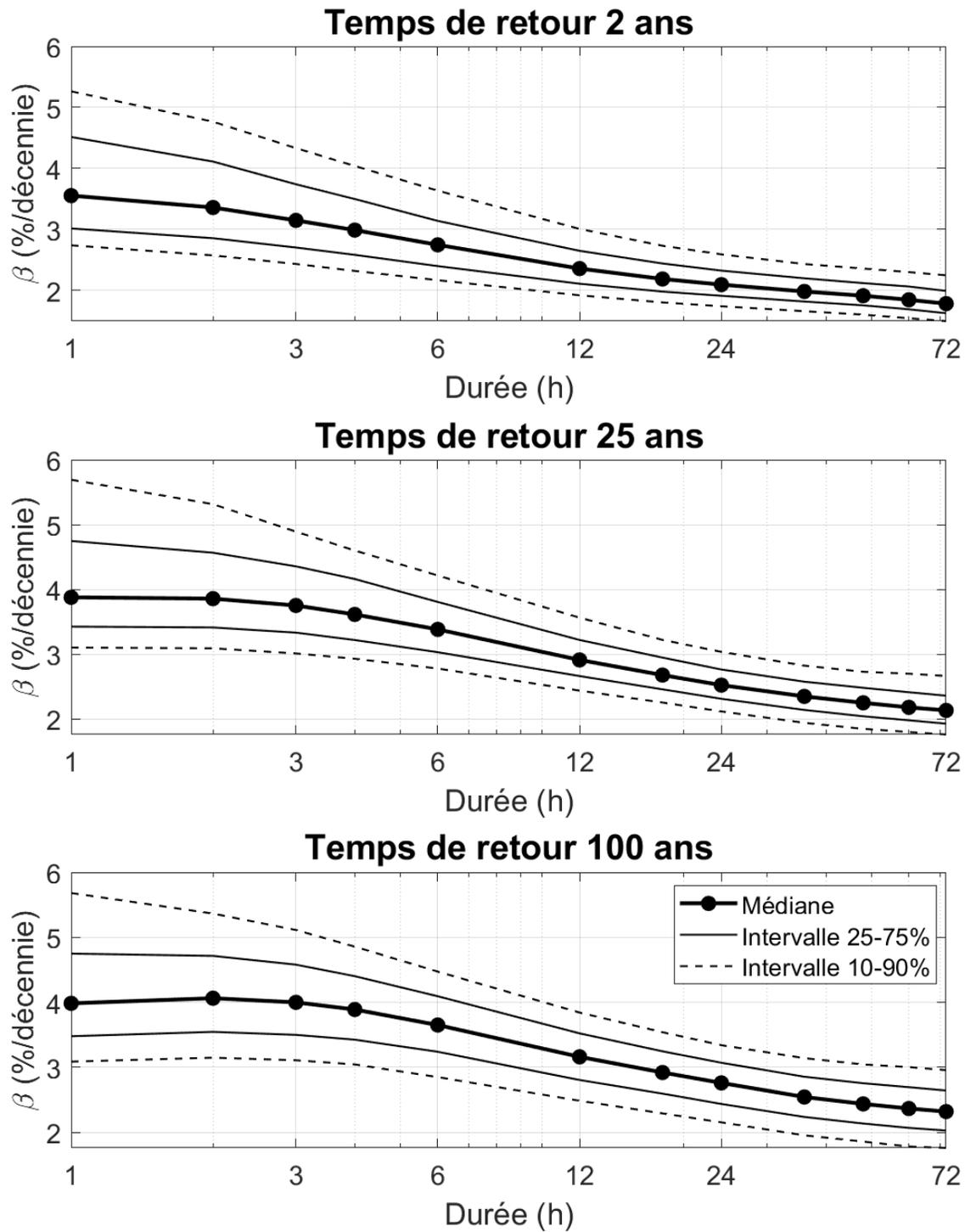


Figure 10.3 - Distributions des valeurs de β (%/décennie) (voir Équation 10.1) pour le territoire d'étude (voir Figure 10.2) en fonction de la durée pour les périodes de retour 2 ans (en haut), 25 ans (au milieu) et 100 ans (en bas)

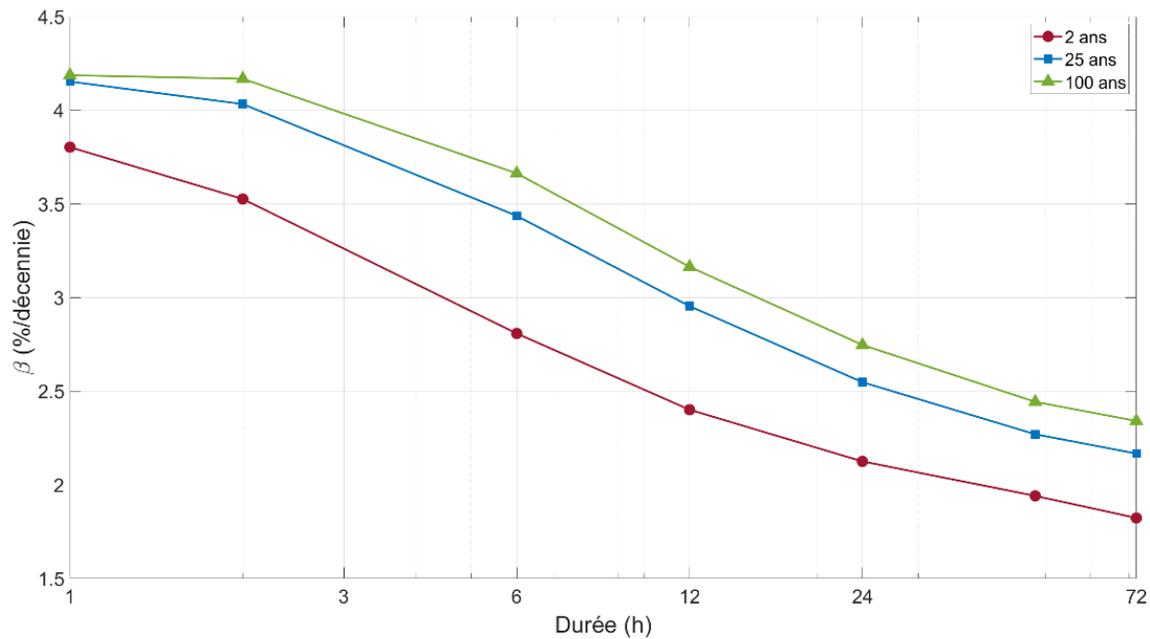


Figure 10.4 - Valeurs moyennes de β (voir Équation 10.1) pour le territoire d'étude (voir Figure 10.1) en fonction de la durée pour les périodes de retour 2 (courbe rouge), 25 (courbe bleue) et 100 ans (courbe en gris).

10.2.2 Cannon et Innocenti (2019)

Cannon et Innocenti (2019) ont analysé les simulations du modèle climatique *Weather Research and Forecasting* (WRF), version 3.4.1 (Liu *et al.*, 2017; Rasmussen *et al.*, 2020) sur un domaine de simulations couvrant l'Amérique du Nord. Le modèle WRF est un '*convection-permitting model*', c'est-à-dire un modèle où la convection associée aux précipitations intenses, notamment en période estivale, est représentée de façon explicite à l'aide des équations fondamentales de la physique, contrairement à un modèle comme le CRCM5 utilisée par Innocenti *et al* (2019a) où la convection est 'paramétrée' c'est-à-dire utilise une représentation simplifiée de la convection. La résolution du modèle WRF est également plus fine à savoir 4 km x 4 km. L'utilisation d'un '*convection-permitting model*' tel que WRF permet donc de penser que la convection est mieux décrite et que les précipitations de type convectif simulées par ces modèles sont plus réalistes.

Tableau 10.1 - Changements projetés (%) en fonction de la période de retour et de la durée pour le sud du Québec entre les périodes 2020-2040, 2040-2060, 2060-2080 et 2080-2100 et la 1990-2020 (Innocenti *et al.*, 2019a)

Durée (heures)	Période de retour (ans)	Période future			
		2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
1	2	10.0	18.5	28.0	38.0
	25	11.0	20.5	31.0	42.5
	100	11.0	20.5	31.5	42.5
2	2	9.0	17.0	26.0	35.0
	25	10.5	20.0	30.0	41.0
	100	11.0	20.5	31.0	42.5
6	2	7.5	13.5	20.0	27.0
	25	9.0	16.5	25.0	34.0
	100	9.5	18.0	27.0	36.5
12	2	6.0	11.5	17.0	22.5
	25	7.5	14.0	21.0	28.5
	100	8.0	15.5	23.0	31.0
24	2	5.5	10.0	15.0	20.0
	25	6.5	12.0	18.0	24.0
	100	7.0	13.0	19.5	26.5
48	2	5.0	9.0	13.5	18.0
	25	6.0	11.0	16.0	21.5
	100	6.5	11.5	17.0	23.0
72	2	4.5	8.5	12.5	17.0
	25	5.5	10.0	15.0	20.0
	100	6.0	11.0	16.5	22.0

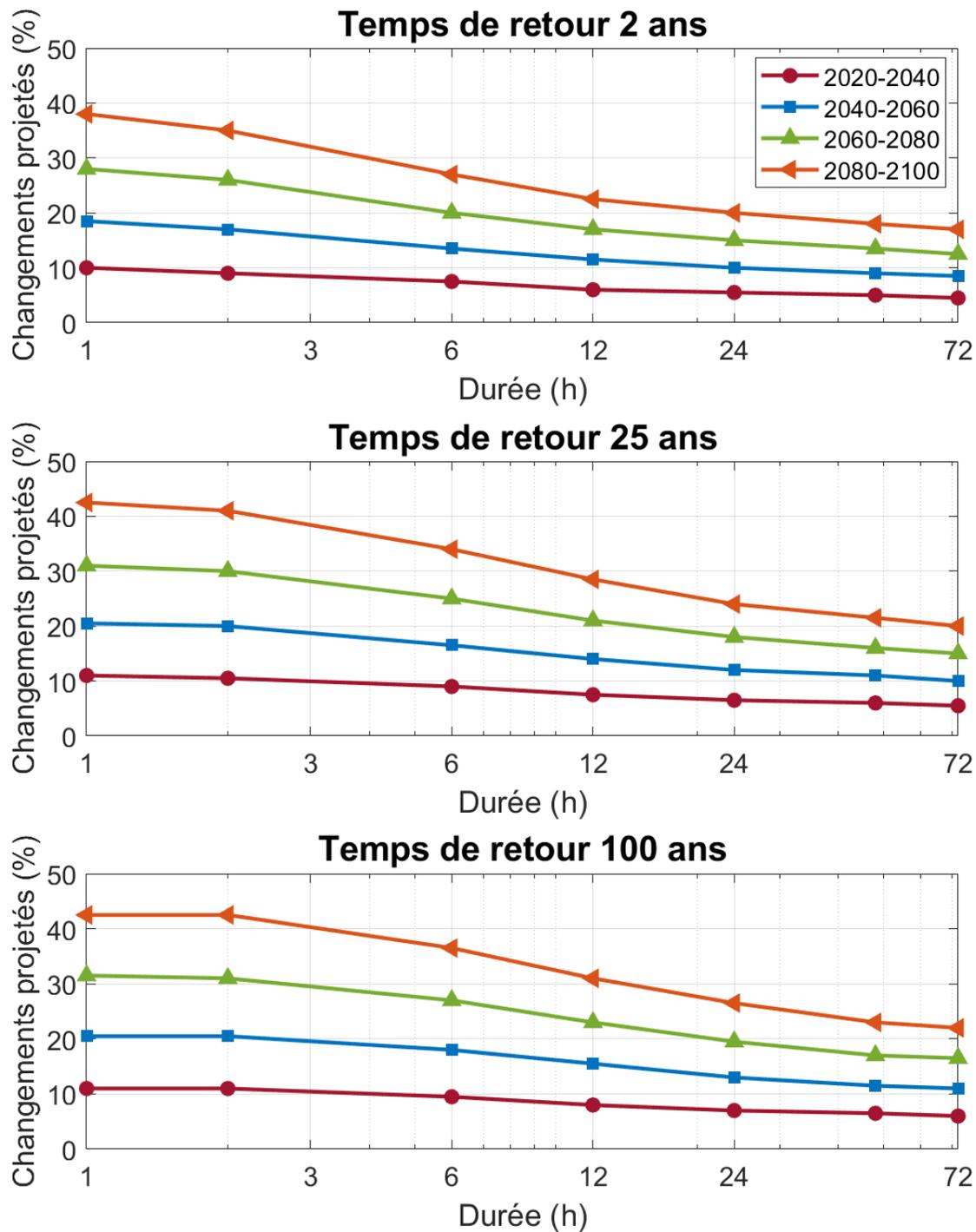


Figure 10.5 - Changements relatifs projetés (%) en fonction de la durée pour le sud du Québec entre les périodes 2020-2040, 2040-2060, 2060-2080 et 2080-2100 et la 1990-2020 pour les périodes de retour 2 ans (en haut), 25 ans (au milieu) et 100 ans (en bas)

Une autre différence importante pour cette simulation WRF est qu'une réanalyse est utilisée pour définir les conditions aux frontières du domaine alors que généralement un modèle global est utilisé pour ce faire (p. ex. le modèle CanESM2-LE pour l'ensemble CRCM5-LE utilisé par Innocenti et al. (2019a) ; voir Leduc *et al.*, 2019). Une approche de type '*pseudo-global-warming simulation*' est utilisée où les variables de la réanalyse ERA-Interim sont modifiées en fonction du signal de CC issue de l'ensemble *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5; Taylor *et al.*, 2012). Le scénario RCP 8.5 est considéré dans le cadre de cette simulation (Meinshausen *et al.*, 2011; van Vuuren *et al.*, 2011) et seule la période future de 2071 à 2100 est simulée alors que la période de référence utilisée est 1976-2005. Les précipitations maximales annuelles de durées 1 h à 24 h sont analysées en utilisant la distribution GEV avec des paramètres de position et d'échelle dépendant de la durée (voir Annexe U).

Ces auteurs procèdent d'abord à une évaluation de la performance du modèle à travers une comparaison des quantiles MAP journaliers et sous-journaliers estimés à partir des séries simulées avec ceux estimés à partir des séries aux stations et concluent que la performance du modèle est acceptable.

Les projections développées à partir de cette simulation montrent des augmentations des intensités des MAP journaliers et sous-journaliers sur l'ensemble du territoire du Québec inclus dans le domaine de simulation (sud du 54° de latitude). Les augmentations pour les MAP de durée 1 heure et de PdR 10 ans seraient de l'ordre de 30 à 50% (Figure 9d de Cannon et Innocenti, 2019). Ces résultats seraient cohérents avec une augmentation de 6 à 7%/°C lorsque la température moyenne annuelle est considérée et suggèrent que les augmentations dépendront faiblement de la PdR (particulièrement pour le sud du Québec) mais plus fortement de la durée, les durées plus courtes étant susceptibles de subir des augmentations plus importantes. Ces résultats sont globalement cohérents avec ceux de Innocenti *et al.* (2019a).

10.2.3 Martel *et al.* (2020)

Cette étude utilise trois grands ensembles de simulations. Les deux premiers sont les ensembles CanESM2 (résolution de 2.8°) qui compte 50 simulations et CESM1 (résolution de 1°) qui compte 40 simulations (pour les références au sujet de ces deux ensembles, voir Martel *et al.*, 2020). Ces deux ensembles ont été produits à partir de modèles globaux. Le troisième est le CRCM5-LE déjà considéré par Innocenti *et al.* (2019a). Ce faisant, seuls les résultats de cette étude se rapportant aux deux premiers ensembles seront décrits dans ce qui suit.

La période future considérée pour ces simulations est 2080-2099 et la période de référence 1980-1999. Seul le scénario de forçage RCP8.5 est utilisé. Les résultats sont présentés pour le domaine de simulation du CRCM5 à savoir le nord-est de l'Amérique du Nord (voir Figure 10.2).

Les projections futures des MAP sur 1 jour et 5 jours ont été analysées pour les ensembles CanESM2 et CESM1 puisque seules les séries de précipitations journalières sont

disponibles. Les résultats montrent des hausses généralisées à tous les points de grille du domaine de simulations. Les hausses médianes des MAP 1 jour sont de 26% pour le CESM1-LE, de 33% pour le CanESM2 et de 31% pour le CRCM5-LE pour la PdR 20 ans. Pour la PdR 100 ans, les valeurs correspondantes sont de 31% pour le CESM1-LE, de 35% pour le CanESM2 et de 35% selon le CRCM5-LE. Ces valeurs réfèrent toutefois à l'ensemble du domaine de simulation (nord-est de l'Amérique du Nord un territoire) alors que celles du Tableau 7.1 concernent la partie de ce domaine couvrant le sud du Québec (Figure 10.2).

Bien que ce portrait soit à l'échelle du domaine de simulation, il montre que les résultats issus de ces différents ensembles pointent tous vers des hausses des quantiles de précipitations extrêmes journalières et que les changements projetés sont, sans être identiques, globalement comparables.

10.2.4 Bush et Lemmen (2019)

Environnement et Changements Climatiques Canada a publié une synthèse des connaissances sur les CC à venir pour le Canada intitulée Rapport sur le climat changeant du Canada (Bush et Lemmen, 2019). Des projections pour les précipitations journalières y sont présentées. Elles ont été développées à partir de l'ensemble de modèles globaux du *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) et concernent les maximums annuels de précipitations journalières (Sillmann *et al.*, 2013). La période de référence est 1986-2005 et trois périodes futures sont considérées, 2016-2035, 2031-2050 et 2081-2100. Enfin deux scénarios de forçage, RCP2.5 (scénario optimiste) et RCP8.5 (scénario pessimiste) sont analysés et les résultats sont présentés à l'échelle de chaque province canadienne. Le Tableau 10.2 présente une synthèse de ces résultats pour le Québec pour les PdR 10, 20 et 50 ans. Ces valeurs sont tirées du Tableau 4.6 de Bush et Lemmen (2019).

Le Tableau 10.2 montre, comme plusieurs autres études déjà publiées, que les augmentations sont plus importantes pour la période 2081-2100 que la période 2031-2050 et plus importantes pour le scénario pessimiste (RCP8.5) que le scénario optimiste (RCP2.6). Les différences entre les deux périodes futures sont beaucoup plus marquées pour le scénario RCP8.5 que pour le scénario RCP2.6. Finalement, les variations entre les différentes PdR pour une période et un scénario donnée sont très faibles et, considérant les intervalles interquartiles, peu significatives.

Les valeurs du Tableau 10.2 sont comparables à celles du Tableau 10.1 issues des travaux de Innocenti *et al.* (2019a) bien que les PdR, périodes futures et de référence ne soient pas identiques. Ainsi, pour la PdR 20 ans, la variation pour la période 2031-2050 selon le RCP 8.5 serait de 10.2% selon le Tableau 10.2. La valeur du Tableau 10.1 à laquelle cette dernière valeur pourrait être comparée correspond à la PdR 25 ans pour la période future 2040-2060 soit 12%. De même la valeur pour la période 2081-2100 (RCP 8.5) pour la PdR 20 ans, 25.8% peut se comparer à la valeur du Tableau 10.1 pour la période future 2080-2100 à savoir 24%.

Tableau 10.2 - Augmentations projetées des maximums journaliers de précipitations pour le Québec. Les valeurs présentées sont les médianes des simulations CMIP5 et les nombres entre parenthèses correspondent aux 25^e et 75^e percentiles des valeurs simulées. La période de référence est 1986-2005 (valeurs tirées du Tableau 4.6 de Bush et Lemmen, 2019). La période de référence est 1986-2005.

Période de retour (ans)	RCP2.6		RCP8.5	
	2031-2050	2081-2100	2031-2050	2081-2100
10	6.8 (2.7, 10.6)	7.2 (4.6, 10.2)	10.0 (6.2, 15.6)	26.0 (17.8, 30.2)
20	6.0 (2.2, 10.8)	8.6 (3.8, 9.9)	10.2 (5.1, 15.8)	25.8 (18.3, 32.0)
50	6.3 (0.9, 9.9)	7.7 (3.3, 11.9)	10.8 (4.7, 17.1)	26.5 (17.9, 33.8)

Ces valeurs, malgré les différences entre les définitions des périodes futures et référence et les PdR considérées et, encore plus important, le type de modèles climatiques pour développer ces projections, sont étonnamment cohérentes. Une autre différence importante est celle des régions sur lesquelles ces estimations ont été faites. En effet, rappelons que, dans le cas de Innocenti *et al.* (2019a), les valeurs reportées au Tableau 10.1 sont les moyennes sur un territoire couvrant, mais pas uniquement, la partie sud du Québec alors que les valeurs du Tableau 10.2, tirées de Bush et Lemmen (2019), sont des valeurs moyennes pour le Québec.

10.2.5 CSA (2019)

Le *Canadian Standard Association* (CSA) a publié en 2019 un document où l'on propose une approche pour estimer un facteur de majoration des courbes IDF afin de tenir compte des CC (CSA 2019). Ce facteur est basé sur la relation entre l'augmentation des températures et l'accroissement de la capacité de l'atmosphère à stocker de l'humidité appelée relation de Clausius-Clapeyron (C-C). Celle-ci stipule que cette capacité augmente à raison de 7% pour chaque augmentation de 1°C de la température. La formulation proposée dans CSA (2019) est la suivante :

$$I_F = I_R C_{adj}^{\Delta T} \quad (10.2)$$

où I_F est l'intensité de pluie en climat futur, I_R est l'intensité en climat actuel, C_{adj} est le facteur de correction et ΔT est la variation de température locale entre le climat futur et actuel. La valeur recommandée pour le facteur de correction est $C_{adj} = 1.07$ qui correspond à la valeur obtenue en considérant la relation de Clausius-Clapeyron. À titre d'exemple si $I_R = 10$ mm/h et $\Delta T = 3^\circ\text{C}$ entre la période future considérée et la période de référence alors $I_F = (10 \text{ mm/h}) (1.07)^3 = 12 \text{ mm/h}$.

On indique par ailleurs que le choix de la température la plus appropriée pour représenter le ΔT de l'équation 10.1 reste une question ouverte (p. ex. température moyenne annuelle, température moyenne saisonnière, températures moyenne pour les jours avec pluies extrêmes, température du point de rosée). Le document précise que des travaux devront

être entrepris afin de préciser ce point. De plus, il est suggéré d'appliquer un même facteur quel que soit la PdR ou la durée considérée. Toutefois, on indique que les simulations climatiques récentes suggèrent que les majorations à appliquer pourraient être plus importantes pour les grandes PdR et les durées plus courtes sans toutefois préciser de valeurs en ce sens. Ce constat est corroboré par les travaux de Innocenti *et al.* (2019a) et de Cannon et Innocenti (2019).

L'application d'une telle relation exige de connaître les variations de températures entre la période future d'intérêt et la période passée considérée pour le développement des courbes IDF. Le Tableau 10.3 présente les valeurs des variations de températures entre la période de référence et diverses périodes futures pour le sud du Québec (Ouranos 2014). Les valeurs rapportées dans ce tableau correspondent aux 10^e percentiles et 90^e percentiles de l'intervalle des variations moyennes estimées selon 33 simulations de l'ensemble CMIP5 (pour plus de détails, voir Ouranos 2014). À défaut d'avoir la valeur médiane, celle-ci sera assimilée à la valeur moyenne entre ces deux percentiles.

Afin de permettre une comparaison avec les valeurs du Tableau 10.1, les variations entre les différentes périodes futures et la période de référence ont été ajustées en interpolant les valeurs de façon linéaire et en considérant les années moyennes de chaque période. Le Tableau 10.4 présente les valeurs des 10^e – 90^e percentiles des variations de températures moyennes estimées entre les différentes périodes futures et la période de référence 1990-2020 pour les RCP 4.5 et 8.5. Le Tableau 10.5 présente les variations d'intensités des précipitations extrêmes correspondantes obtenus à partir de l'équation 10.1. À noter que les variations de températures estivales (juin-juillet-août, JJA) sont considérées.

La Figure 10.6 offre une représentation visuelle des valeurs du Tableau 10.5. Elle montre que les variations augmentent si l'on considère des périodes futures plus éloignées et sont plus importantes pour le RCP8.5 que le RCP 4.5. On constate également que si la hausse est soutenue pendant tout le siècle pour le RCP 8.5, la progression est beaucoup plus lente pour le RCP 4.5 et semble vouloir se stabiliser au tournant du siècle. Dans ce dernier cas, l'augmentation médiane serait de moins de 20% à la fin du siècle alors qu'il atteindrait plus de 40% pour le RCP 8.5. Les incertitudes demeurent toutefois très élevées. À noter que les incertitudes qui sont prises en compte sont celles associées aux projections des modèles climatiques et n'intègrent pas les incertitudes associées à l'utilisation de l'équation 7.1 pour estimer les extrêmes de précipitations en climat futur.

Si on compare ces valeurs à celles de Innocenti *et al.* (2019a), on voit que les changements projetés selon l'approche CSA (2019) sont généralement plus élevés. Ainsi la valeur médiane des augmentations projetées pour la période 2040-2060 selon la méthode CSA (2019) est d'environ 17% (RCP 8.5) alors que, pour cette même période future, des augmentations comparables sont obtenues pour les durées 2 et 6 heures par Innocenti *et al.* (2019a).

Tableau 10.3 - Projections climatiques d'évolution des températures moyennes saisonnières (°C) pour le sud du Québec pour divers horizons futurs et selon différents RCP (10^e et 90^e percentiles des variations estimées selon les simulations climatiques de l'ensemble CMIP5). La période de référence est 1971-2000 (valeurs tirées du Tableau 1-2 de Ouranos 2014).

Période	RCP 4.5			RCP 8.5		
	2011-2040	2041-2070	2071-2100	2011-2040	2041-2070	2071-2100
Annuel	+0.9 à +2.1	+1.7 à +2.9	+2.1 à +4.7	+1.1 à +2.3	+2.4 - +4.6	+4.1 à +7.2
DJF ¹	+1.2 à +2.7	+1.8 à +4.3	+2.3 à +5.5	+1.0 à +2.9	+3.0 à +5.5	+5.1 à +8.2
MAM ²	+0.7 à +2.3	+1.4 à +3.5	+1.8 à +4.2	+0.8 à +2.1	+2.2 à +5.1	+3.9 à +7.6
JJA ³	+1.0 à +1.8	+1.6 à +3.3	+1.9 à +4.2	+1.0 à +2.0	+2.2 à +4.5	+3.9 à +7.2
SON ⁴	+0.8 à +2.1	+1.7 à +3.4	+2.1 à +4.3	+0.9 à +2.2	+2.5 à +4.2	+3.9 à +6.8

1. Décembre-janvier-février
2. Mars-avril-mai
3. Juin-juillet-août
4. Septembre-octobre-novembre

Tableau 10.4 - Variations des températures moyennes estivales (JJA) (°C) pour le sud du Québec pour diverses périodes futures selon les RCP 4.5 et 8.5 (10^e et 90^e percentiles des variations estimées selon les simulations climatiques de l'ensemble CMIP5). La période de référence est 1990-2020 (valeurs estimées à partir des valeurs du Tableau 10.3). La valeur médiane est obtenue en faisant la moyenne des valeurs associées aux 10^e et 90^e percentiles.

RCP	Percentiles	Période future			
		2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
4.5	10 ^e	0.6	1.0	1.3	1.5
	50 ^e	0.9	1.6	2.1	2.5
	90 ^e	1.1	2.2	2.9	3.5
8.5	10 ^e	0.7	1.5	2.6	3.7
	50 ^e	1.1	2.3	3.7	5.2
	90 ^e	1.4	3.1	4.9	6.7

Tableau 10.5 - Variations relatives (%) des intensités des précipitations extrêmes pour le sud du Québec pour diverses périodes futures selon les RCP 4.5 et 8.5 estimés à partir de l'équation 10.1 (CSA, 2019) en utilisant les valeurs du Tableau 10.4 La période de référence est 1990-2020. La valeur médiane est obtenue en faisant la moyenne des valeurs associées aux 10^e et 90^e percentiles.

RCP	Percentiles	Période future			
		2020-2040	2040-2060	2060-2080	2080-2100
4.5	10 ^e	4.1	7.0	8.8	10.3
	50 ^e	6.1	11.2	14.9	18.0
	90 ^e	7.9	15.7	21.3	26.3
8.5	10 ^e	4.9	10.7	18.8	28.3
	50 ^e	7.4	16.8	28.4	41.8
	90 ^e	10.1	23.2	38.8	56.8

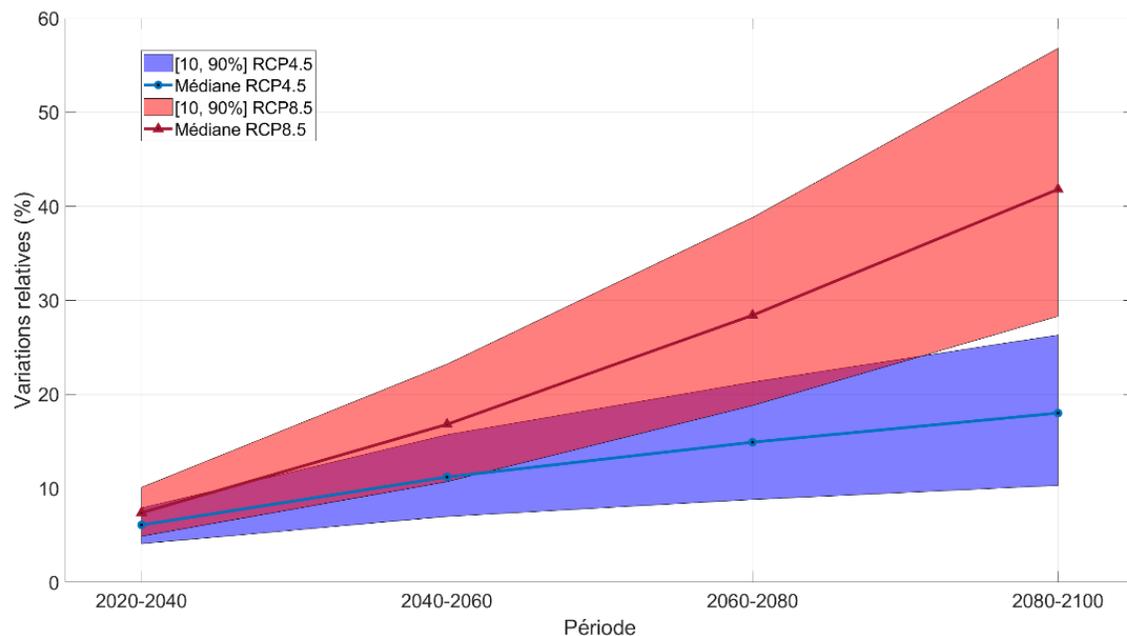


Figure 10.6 - Variations relatives (%) médianes des intensités des précipitations extrêmes pour le sud du Québec pour diverses périodes futures selon les RCP 4.5 et 8.5 estimés à partir de l'approche proposée dans CSA (2019). Les zones ombrées représentent l'intervalle entre les 10^e et 90^e percentiles des valeurs estimées. La période de référence est 1990-2020.

10.2.6 Simulations NA-CORDEX

L'ensemble de simulations du *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX) sur le domaine de l'Amérique du Nord, plus succinctement désigné par NA-CORDEX (NA pour *North America*) a également été considéré. Ce groupe de simulations avait également été considéré dans le cadre de travaux pour la ville de Montréal (Mailhot *et al.* 2018b) et plus récemment dans un projet pour la VQ sur l'évolution future de précipitations liquides et solides. Les simulations considérées dans le cadre du présent projet sont identiques à celles considérées dans Mailhot *et al.* (2018b).

L'ensemble NA-CORDEX a été produit à partir de plusieurs couples de modèles globaux/régionaux et permet donc d'évaluer les différences entre les projections simulées selon différents modèles. La liste des simulations CORDEX utilisées dans le cadre de la présente étude, à savoir 11 simulations pour le RCP 8.5 et sept simulations pour le RCP 4.5, est présenté à l'Annexe V. Toutes ces simulations ont été réalisées en utilisant le scénario RCP 8.5 et sept en utilisant également le scénario RCP 4.5. À noter que la résolution spatiale de six des 11 simulations est de 0.22° (soit environ 24 km x 24 km pour le sud du Québec) alors que les cinq autres ont une résolution de 0.44° (environ 49 km x 49 km pour le sud du Québec). Seuls les MAP 24 heures (journaliers), 48 (deux jours) et 72 heures (trois jours) ont été considérés pour cet ensemble puisque seulement les séries journalières sont disponibles pour l'ensemble NA-CORDEX. Deux périodes futures ont été considérées 2040-2070 et 2070-2100 (seuls les résultats pour la période 2040-2070 sont discutés dans ce qui suit). Les valeurs estimées concernent la partie sud du Québec.

La comparaison des quantiles des MAP journaliers observés et simulés a été réalisée dans le cadre des travaux rapportés dans Mailhot *et al.* (2018). Les quantiles des MAP quotidiens estimés aux stations situées au sud du Québec ont ainsi été comparés à ceux estimés à partir des séries simulées par les différents modèles. L'estimation des quantiles des MAP quotidiens a été réalisée en utilisant la distribution de Gumbel et en ajustant les paramètres de cette distribution à l'aide de la méthode des L-moments (Hosking et Wallis, 1997). Les écarts entre les valeurs estimées aux stations et les valeurs aux tuiles correspondantes (tuiles les plus près des stations) des différentes séries simulées montrent que les simulations CORDEX sont dans l'ensemble non-biaisées (i.e. que les distributions des écarts sont centrées à zéro). La capacité des simulations à reproduire les quantiles observés varient toutefois sensiblement d'une simulation à l'autre, cette variabilité étant associée aux différentes représentations de ces différents modèles du système climatique (pour plus de détails voir Mailhot *et al.* 2018b).

Les valeurs des quantiles des MAP journaliers pour la période 2040-2070 et 2070-2100 ont été estimées à chacun des points de grille du sud du Québec pour chacune des simulations NA-CORDEX. Cette fois la distribution GEV avec la méthode des L-moments a été utilisée pour représenter les séries des MAP journaliers. La Figure 10.7 présente les distributions aux points de grille couvrant le sud du Québec des variations relatives des MAP journaliers entre les périodes 2040-2070 et 1990-2020 pour les PdR 2, 5, 10, 25 et 50 ans.

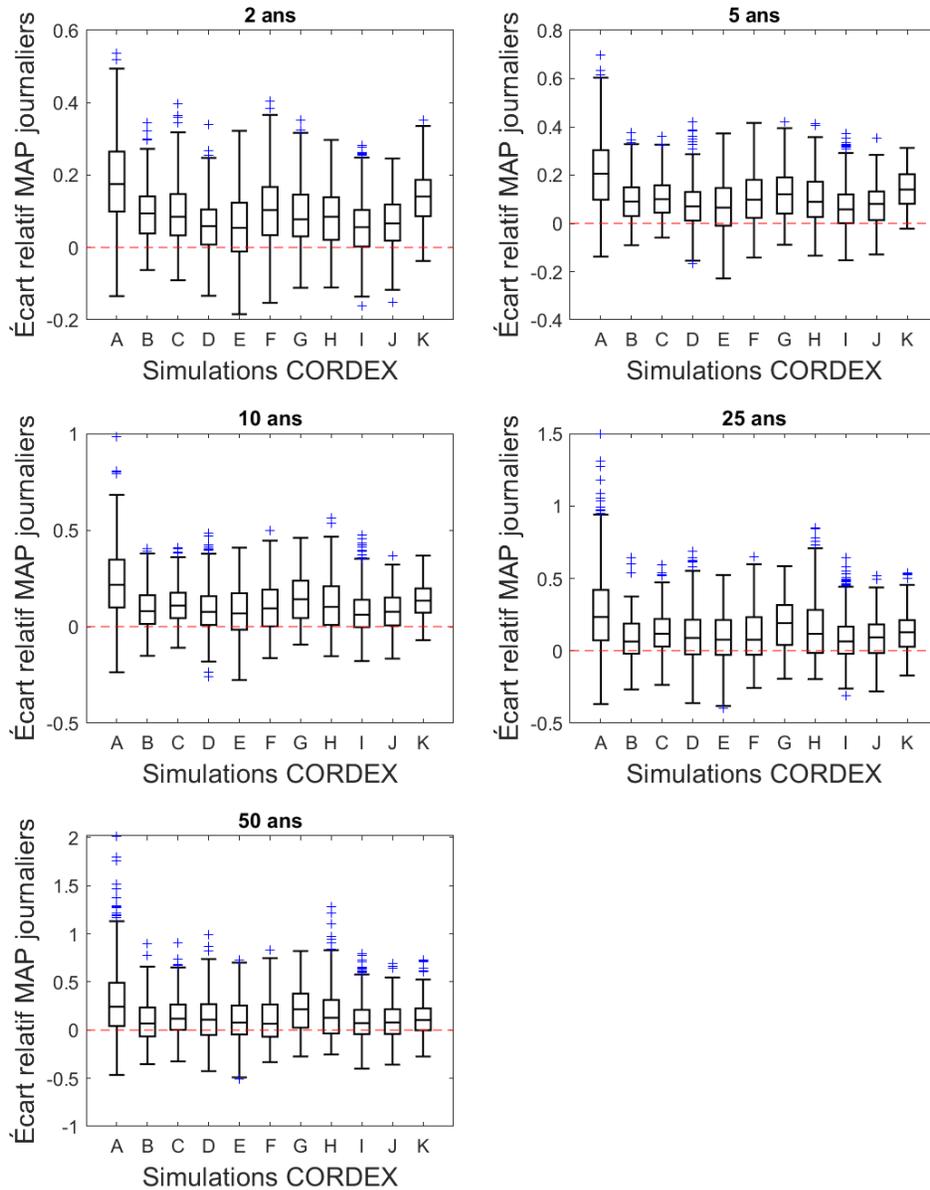
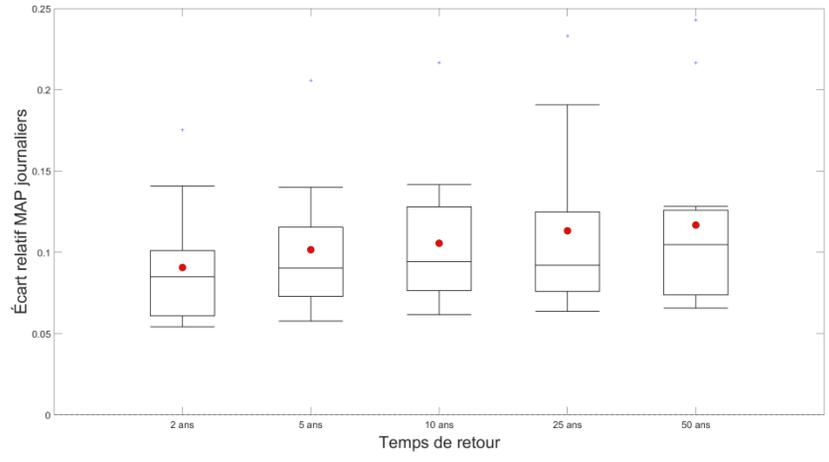
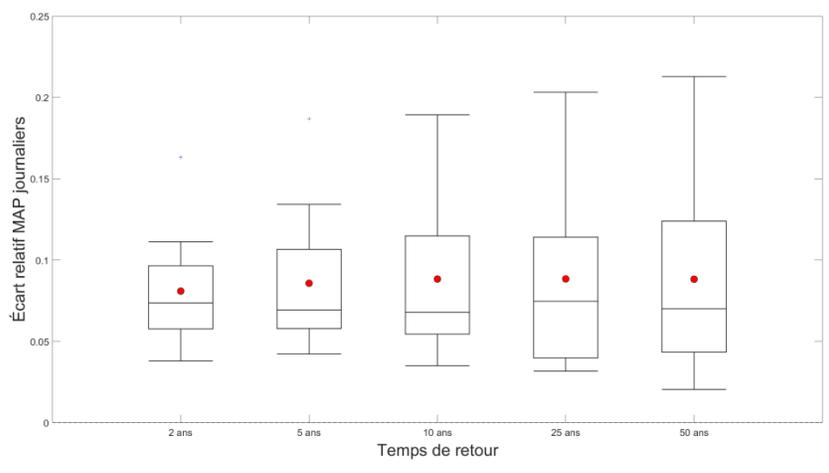


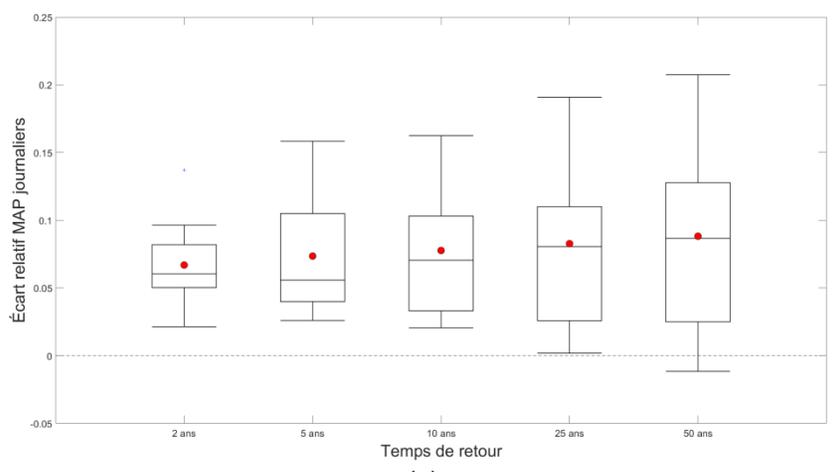
Figure 10.7 - Distributions des écarts relatifs des MAP journaliers de période de retour 2 à 50 ans aux différents points de grille couvrant le sud du Québec entre les périodes 2040-2070 et 1990-2020 pour les 11 simulations NA-CORDEX utilisant le scénario RCP 8.5 (voir le Tableau V.1 de l'Annexe V pour la liste des simulations NA-CORDEX)



(a)



(b)



(c)

Figure 10.8 - Écarts relatifs médians pour le sud du Québec des MAP de période de retour 2 à 50 ans entre les périodes 2040-2070 et 1990-2020 pour les 11 simulations NA-CORDEX utilisant le scénario RCP 8.5 pour les durées : a) 24 heures; b) 48 heures; c) 72 heures. Les points rouges correspondent aux valeurs moyennes.

On constate qu'une majorité de simulation projette des augmentations des MAP journaliers sur une large fraction du territoire (Figure 10.7). Les amplitudes de ces changements varient sensiblement d'une simulation à l'autre (Figure 10.8a). Les valeurs moyennes simulées à l'échelle du sud du Québec sont de l'ordre de +10% et varient très peu selon la PdR (Figure 10.8a). Cette valeur est comparable à la valeur de 10 à 13% proposée par Innocenti *et al.* (2019a) (10 à 13 %; voir Tableau 10.1), à celle de Bush et Lemmen (2019) (10 à 11% pour une période future légèrement différente 2031-2050) mais est plus petite que celle évaluée par la méthode CSA (2019) (environ +17%; voir Tableau 10.5).

Les Figures 10.8b et c montrent les graphiques correspondants pour les durées 48 et 72 heures. Ainsi les valeurs des écarts moyens pour ces deux durées sont respectivement de 8 à 9 % et de 7 à 8% et varient très peu avec la PdR. Ces valeurs sont du même ordre que celle obtenues par Innocenti *et al.* (2019a) pour ces mêmes durées.

10.2.7 Comparaison des résultats des différentes études

La Figure 10.9 et le Tableau 10.6 présentent une synthèse des résultats des études de Innocenti *et al.* (2019a), de la méthode CSA (2019), des valeurs rapportées dans Bush et Lemmen (2019) et de l'analyse des simulations NA-CORDEX. À noter que les valeurs ont été ajustées (en utilisant une interpolation linéaire et en considérant les années centrales des périodes de référence considérées dans chaque cas) pour définir une période de référence commune 1990-2020 (année centrale 2005). Il convient aussi de noter que le territoire considéré diffère selon les études consultées. Ainsi Bush et Lemmen (2019) propose des projections pour l'ensemble du territoire du Québec alors que les valeurs proposées par Innocenti *et al.* (2019a) ne concernent que le sud du Québec.

La Figure 10.9 permet d'apprécier les importantes différences entre les valeurs proposées selon les différentes sources consultées. Malgré ces différences, il appert que les augmentations sont de plus en plus importantes au fur et à mesure que l'on avance au cours du siècle et plus importantes pour les scénarios RCP associés à des augmentations plus marquées des GES, à savoir en ordre croissant le RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5.

La méthode CSA donne les projections d'augmentations les plus élevées. Rappelons qu'elle repose sur l'utilisation d'une relation établissant un lien entre variations de température et de précipitations extrêmes. À noter que ces projections s'appliqueraient, selon CSA (2019), à toutes les durées et PdR.

Les projections proposées dans Bush et Lemmen (2019), établies à partir de modèles globaux et concernant plus spécifiquement les MAP journaliers, sont comparables à ceux de la méthode CSA à l'horizon 2040 mais nettement inférieures à ces derniers à l'horizon 2090, se trouvant en quelque sorte à mi-chemin des projections de la méthode CSA pour les RCP 4.5 et 8.5. À noter également les projections avec le RCP 2.6, un scénario très optimiste où l'on atteindrait un maximum de forçage radiatif au milieu du siècle et une réduction par la suite jusqu'à la fin du siècle. Suivant un tel scénario les augmentations seraient très faibles de l'ordre de moins de 10% à l'horizon 2090.

Les projections de Innocenti *et al.* (2019a) sont moindres que celles de la méthode CSA sauf dans le cas des MAP 1 heure. Dans ce cas, les augmentations projetées sont comparables aux médianes de la méthode CSA pour tous les horizons futurs. Pour les durées plus courtes, les augmentations projetées sont nettement plus petites. Sans vouloir prêter une attention trop importante à ce résultat, il faut se souvenir que la relation de C-C utilisée dans CSA (2019) pour estimer les changements futurs des précipitations extrêmes, s'applique plus spécifiquement aux précipitations de type convectif donc de plus courtes durées (p. ex. précipitations extrêmes sur une heure) ce qui pourrait expliquer la meilleure concordance entre valeurs CSA et de Innocenti *et al.* (2019a) pour les précipitations de courtes durées.

La Figure 10.9 montre également que les différences entre les augmentations calculées par Innocenti *et al.* (2019a) pour les différentes durées sont importantes et comparables dans une certaine mesure aux écarts entre les deux RCP 4.5 et 6.5. Ce résultat supporte l'idée d'intégrer une modulation des majorations à appliquer en fonction de la durée particulièrement pour les courtes durées.

Tableau 10.6 - Variations relatives (%) des intensités des précipitations extrêmes pour diverses périodes futures. Toutes les valeurs ont été ajustées pour la période de référence 1990-2020. Ces valeurs ont été utilisées pour la construction de la Figure 10.9.

Source ³	RCP	Percentiles	Horizon ¹			
			2040		2090	
Bush et Lemmen (2019)	2.6	25 ^e	1.9		3.9	
		50 ^e	6.4		7.8	
		75 ^e	10.4		10.7	
	8.5	25 ^e	5.3		18.0	
		50 ^e	10.3		26.1	
		75 ^e	16.2		32.0	
Innocenti <i>et al.</i> (2019a) ²	RCP	Durée	2030	2050	2070	2090
	8.5	1 h	10.7	19.8	30.2	41.0
		24 h	6.3	11.7	17.5	23.5
		72 h	5.3	9.8	14.7	19.7
NA-CORDEX ⁴	RCP	Valeurs	2055		2085	
	4.5	Min	4.4		6.7	
		Médiane	9.5		11.5	
		Max	21.7		17.4	
	8.5	Min	6.4		6.2	
		Médiane	9.2		18.6	
Max		23.3		53.5		

1. L'horizon est défini par l'année centrale de la période considérée. Ainsi pour la période 2040-2060, l'horizon est 2050.
2. Les valeurs de Innocenti *et al.* (2019a) correspondent aux valeurs moyennes sur les différentes périodes de retour.
3. Les valeurs proposées dans Bush et Lemmen (2019) s'appliquent à l'ensemble du Québec alors que pour Innocenti *et al.* (2019a) et NA-CORDEX seul le sud du Québec est considéré.
4. Sept simulations ont été utilisées pour les estimés du RCP 4.5 et 11 pour le RCP 8.5 (voir Annexe V pour la liste de ces simulations).

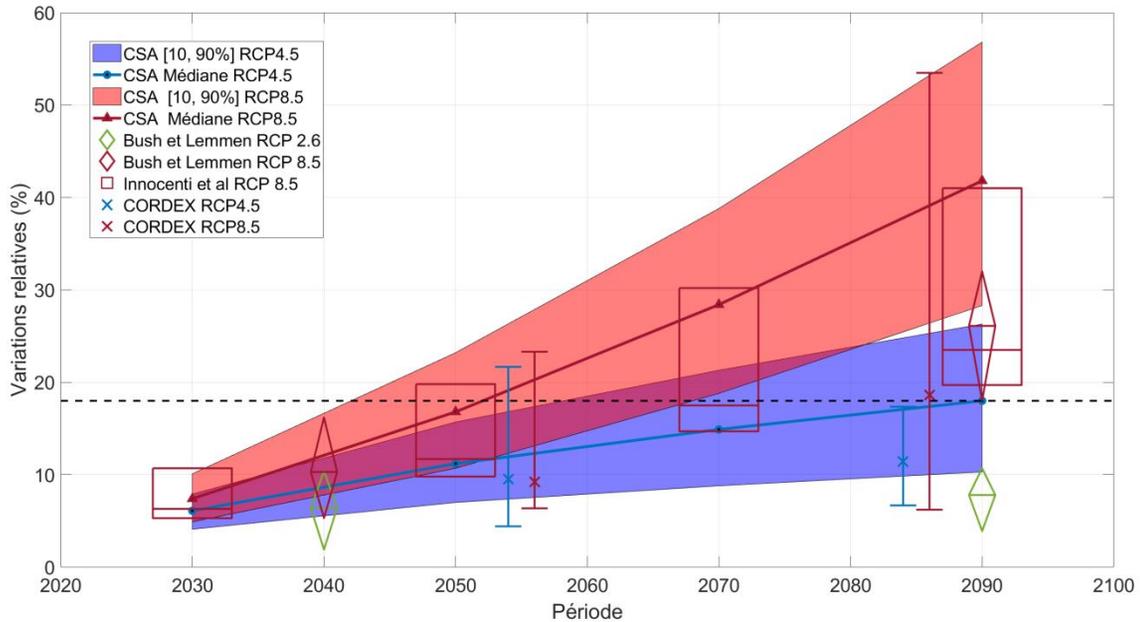


Figure 10.9 - Variations relatives (%) des intensités des précipitations extrêmes pour divers horizons futurs selon différences sources. L'horizon est défini par l'année centrale de la période considérée. Les bandes en bleu et rouge (intervalle entre 10^e et 90^e percentiles) correspondent aux variations relatives (%) selon les RCP 4.5 (en bleu) et 8.5 (en rouge) estimées à partir de l'approche CSA (2019) (Figure 10.6). Les valeurs pour Bush et Lemmen (2019), Innocenti *et al.* (2019a) et NA-CORDEX sont détaillées au Tableau 10.6. Les intervalles pour Innocenti *et al.* (2019a) correspondent aux durées 1 h et 72 h et la valeur centrale à la durée 24 heures, pour Bush et Lemmen (2019) à l'intervalle interquartile et pour NA-CORDEX aux valeurs maximales et minimales simulées. La ligne en tiret horizontal correspond à la recommandation de Mailhot *et al.* (2014) d'une majoration de +18% à l'horizon 2050 pour toutes durées et périodes de retour. Toutes les valeurs ont été ajustées en fonction de la période de référence 1990-2020.

10.3 Majorations recommandées pour les courbes IDF en climat futur

Les majorations proposées dans par Mailhot *et al.* (2014) pour la majoration des courbes IDF en climat futur pour le sud Québec étaient basées sur une revue de littérature et une majoration de +18% avait alors été recommandée pour l'horizon 2050 pour toutes les durées et PdR. Ce résultat résultait de l'analyse de séries simulées des MAP annuels journaliers puisqu'une grande majorité des simulations climatiques alors disponibles étaient archivées aux pas de temps journalier. Aucune modulation des majorations en fonction de la durée ou de la PdR n'avait été alors proposée puisque les incertitudes et l'état des connaissances d'alors ne permettaient pas de statuer sur le sujet.

Tel qu'évoqué dans les sections précédentes, quatre périodes futures seront considérées dans ce qui suit : 2020-2040, 2040-2060, 2060-2080 et 2080-2100. La période 1990-2020 est définie comme période de référence. Les majorations proposées sont basées sur les principes directeurs suivants (la Section 10.4 discutera plus en détails de la signification et des impacts de ces principes directeurs) :

- Les majorations seront modulées en fonction de la durée conformément aux résultats de Innocenti *et al.* (2019a);
- Les majorations ne seront pas modulées en fonction de la PdR puisque ces variations sont beaucoup plus petites et incertaines (ce choix sera justifié dans les paragraphes qui suivent);
- Des majorations moyennes uniques seront proposées pour tout le sud du Québec;
- Deux ensembles de majorations seront proposées, l'un associé au scénario RCP 4.5 (modéré) et l'autre au scénario RCP 8.5 (pessimiste).

Les valeurs estimées selon l'approche CSA (2019) serviront de point de départ (Tableau 10.5 et Figure 10.6). Tel que mentionné plus haut ces valeurs sont supérieures aux valeurs obtenues par Innocenti *et al.* (2019a) pour la durée 24 heures et comparables aux valeurs des durées plus courtes. Les majorations de la méthode CSA (2019) seront utilisées comme facteur de majoration à utiliser pour les MAP de durée 24 heures. Ce choix reste arbitraire mais fera en sorte que les majorations proposées minimiseront les risques de sous-estimations.

La modulation des majorations en fonction de la durée sera établie sur la base des résultats de Innocenti *et al.* (2019a). Dans un premier temps, les variations relatives pour les diverses durées et PdR seront exprimées en fonction de la variation relative moyenne pour la durée 24 heures et la PdR 2 ans pour un horizon futur donné (Tableau 10.1). Ainsi, par exemple si la variation relative pour la période future 2040-2060 du MAP de durée 1 heure et de PdR 25 ans est 20.5% et la variation relative pour le MAP de durée 24 heures et de PdR 2 ans pour la même période future est de 10% alors la variation relative par rapport à la durée 24 heures sera $20.5\%/10\% = 2.1$. Autrement dit, la hausse prévue pour le MAP 1 heure de PdR 25 ans sera 2.1 fois plus importante que celle du MAP 24 heures de PdR 2 ans pour la période 2040-2060. On parlera lors de variations relatives normalisées. Ces valeurs normalisées ont été calculées pour toutes les périodes futures et sont présentées au Tableau 10.7.

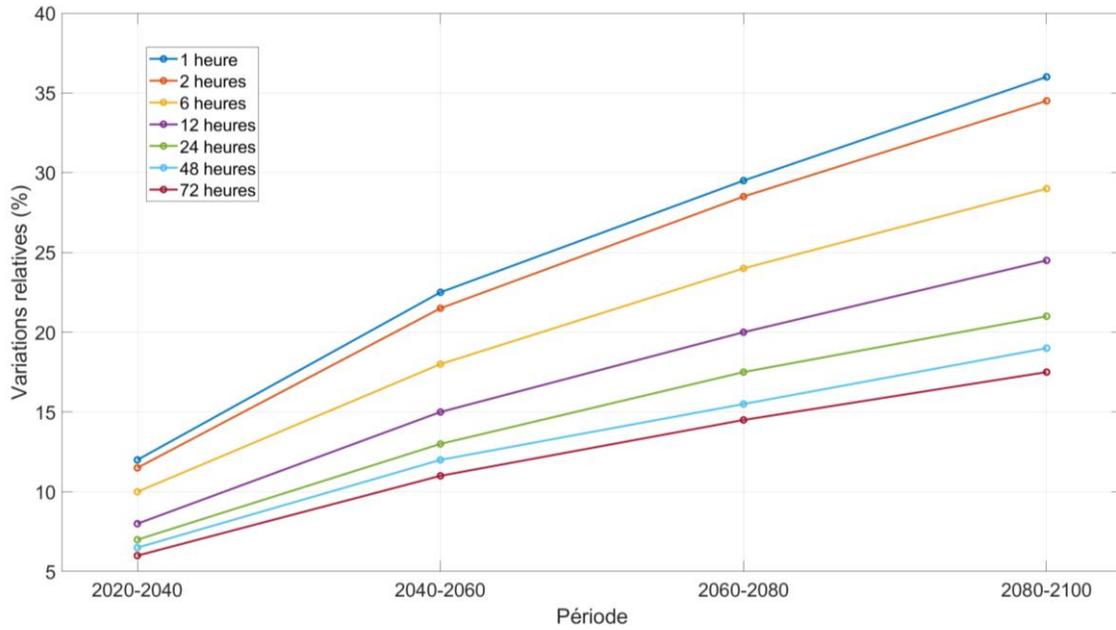
Un examen de ce tableau montre que les valeurs pour une durée et une PdR donnée sont très similaires d'une période future à l'autre. On supposera donc qu'elles ne dépendent pas de la période future et la valeur moyenne sur les différentes périodes futures sera considérée (ligne 'Moyenne périodes futures' du Tableau 10.7). Ces valeurs moyennes dépendent de la durée (valeurs plus importantes pour les courtes durées) et aussi de la PdR (valeurs plus importantes pour les grandes PdR). Cependant considérant la faible variation en fonction de la PdR, les valeurs moyennes sur les différentes PdR seront considérées (ligne 'Moyenne périodes futures et PdR' du Tableau 10.7). Ces facteurs seront donc ceux appliqués aux majorations estimées pour les MAP de durées 24 heures pour obtenir les majorations à appliquer aux autres durées.

Tableau 10.7 - Changements projetés normalisés (%) en fonction de la valeur pour la durée 24 heures de périodes de retour 2 ans (voir Tableau 10.1) pour le sud du Québec pour les périodes futures 2020-2040, 2040-2060, 2060-2080 et 2080-2100.

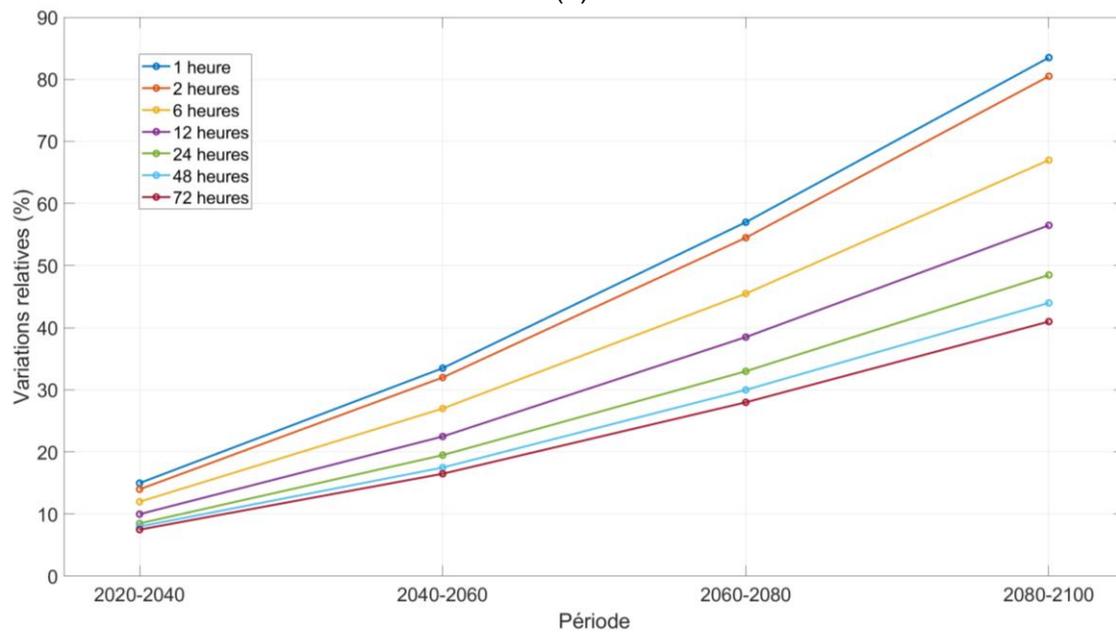
Période future	Période de retour (ans)	Durée (h)						
		1	2	6	12	24	48	72
2020-2040	2	1.8	1.6	1.4	1.1	1.0	0.9	0.8
	25	2.0	1.9	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
	100	2.0	2.0	1.7	1.5	1.3	1.2	1.1
2040-2060	2	1.9	1.7	1.4	1.2	1.0	0.9	0.9
	25	2.1	2.0	1.7	1.4	1.2	1.1	1.0
	100	2.1	2.1	1.8	1.6	1.3	1.2	1.1
2060-2080	2	1.9	1.7	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8
	25	2.1	2.0	1.7	1.4	1.2	1.1	1.0
	100	2.1	2.1	1.8	1.5	1.3	1.1	1.1
2080-2100	2	1.9	1.8	1.4	1.1	1.0	0.9	0.9
	25	2.1	2.1	1.7	1.4	1.2	1.1	1.0
	100	2.1	2.1	1.8	1.6	1.3	1.2	1.1
Moyenne périodes futures	2	1.9	1.7	1.3	1.1	1.0	0.9	0.8
	25	2.1	2.0	1.7	1.4	1.2	1.1	1.0
	100	2.1	2.1	1.8	1.5	1.3	1.2	1.1
Moyenne périodes futures et période de retour		2.0	1.9	1.6	1.3	1.2	1.0	1.0

Tableau 10.8 – Majorations recommandées (%) à appliquer aux courbes IDF en climat de référence (1990-2020) pour l'estimation des courbes IDF pour diverses périodes futures (2020-2040, 2040-2060, 2060-2080, 2080-2100) selon les RCP 4.5 (scénario modéré), 8.5 (scénario pessimiste) et le scénario intermédiaire.

RCP	Période future	Durée (h)						
		1	2	6	12	24	48	72
4.5	2020-2040	12.0	11.5	10.0	8.0	7.0	6.5	6.0
	2040-2060	22.5	21.5	18.0	15.0	13.0	12.0	11.0
	2060-2080	29.5	28.5	24.0	20.0	17.5	15.5	14.5
	2080-2100	36.0	34.5	29.0	24.5	21.0	19.0	17.5
8.5	2020-2040	15.0	14.0	12.0	10.0	8.5	8.0	7.5
	2040-2060	33.5	32.0	27.0	22.5	19.5	17.5	16.5
	2060-2080	57.0	54.5	45.5	38.5	33.0	30.0	28.0
	2080-2100	83.5	80.5	67.0	56.5	48.5	44.0	41.0
Intermédiaire	2020-2040	13.0	12.0	10.5	8.5	7.5	7.0	6.5
	2040-2060	25.5	24.0	20.5	17.0	14.5	13.5	12.5
	2060-2080	36.5	35.0	29.5	24.5	21.5	19.0	18.0
	2080-2100	48.0	46.0	38.5	32.5	28.0	25.5	23.5



(a)



(b)

Figure 10.10 – Majorations recommandées (%) à appliquer aux courbes IDF en climat de référence (1990-2020) pour l'estimation des courbes IDF pour diverses périodes futures (2020-2040, 2040-2060, 2060-2080, 2080-2100) selon : a) le RCP 4.5 (scénario modéré); b) le RCP 8.5 (scénario pessimiste).

Le Tableau 10.8 présente les majorations proposées pour les différentes périodes futures selon la durée des MAP considérées. La Figure 10.10 reprend les valeurs du Tableau 10.8 sous forme graphique. Ces résultats appellent quelques commentaires. Les majorations à appliquer aux durées non répertoriées au Tableau 10.8 peuvent être obtenues par interpolation linéaire.

Les résultats diffèrent sensiblement selon que l'on considère le RCP4.5 et le RCP 8.5. Ces différences augmentent avec le temps. Ainsi les écarts entre les majorations de chaque période future moyennées sur les durées passent de 2% pour l'horizon 2030, à 8% à l'horizon 2050, 20% à l'horizon 2070 et enfin 34 % à l'horizon 2090.

Ultimement le choix du RCP à retenir dépend de l'appréciation du niveau de risque et d'optimisme face à la réponse de nos sociétés devant le défi climatique. À terme, il est clair que les majorations associées au RCP 8.5 aux horizons 2070 et 2090 sont intenables (40% en moyenne à l'horizon 2070 et 60% à l'horizon 2090) alors que les majorations associées au RCP 4.5 demeurent élevées mais encore réalistes d'un point de vue opérationnel (21% en moyenne à l'horizon 2070 et 26% à l'horizon 2090).

Un scénario 'intermédiaire' entre les scénarios RCP 4.5 et 6.5 a également été considéré entre ces deux derniers scénarios. Bien qu'un scénario RCP 6.0 existe, intermédiaire aux deux RCP précédents (voir Figure 10.1), ce scénario n'a pas été considéré par Innocenti et al. (2019), Bush et Lemmen (2019) et NA-CORDEX puisque peu de simulations climatiques utilisent ce scénario. Ce scénario intermédiaire a été estimé en faisant la somme pondérée des valeurs des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 :

$$x_{\text{int}} = 0.75 x_{4.5} + 0.25 x_{8.5} \quad (10.3)$$

où x_{int} est la majoration associée au scénario intermédiaire, $x_{4.5}$ la majoration pour le scénario RCP 4.5 et $x_{8.5}$ la majoration pour le scénario RCP 8.5. Cette majoration correspond approximativement à une hausse des températures de l'ordre de 3.0 à 3.5°C à l'horizon 2080. Les valeurs correspondantes (scénario intermédiaire) ont été ajoutées au Tableau 10.8 (à noter que les valeurs ont été arrondies aux 0.5 le plus près). On constate que les majorations à appliquer à l'horizon 2040-2050 sont de l'ordre de 12.5 à 25.5 % selon la durée mais que ces majorations augmentent de façon marquée pour les horizons 2060-2080 et 2080-2100.

10.4 Utilisation, limites et incertitudes des majorations proposées

Le choix de la majoration effective à appliquer dans un cas spécifique dépend d'un certain nombre de considérations :

- **Durée de vie utile de l'ouvrage** : L'horizon choisi dépend de la durée de vie utile de l'ouvrage pour lequel les courbes IDF sont utilisées. Ainsi, un ouvrage installé en 2020 dont la durée de vie utile escomptée est de 50 ans, sera vraisemblablement remplacé en 2070. Dans ce cas la majoration à considérer devra être associée à l'horizon 2070.
- **Durée à considérer pour les courbes IDF** : La durée des MAP à considérer est souvent estimée à partir du temps de concentration ou d'un certain temps

caractéristique définissant la durée des pluies extrêmes pertinentes à la conception de cet ouvrage. Les durées répertoriées au Tableau 10.8 sont comprises entre 1 heure et 72 heures. Les modèles climatiques actuelles ne permettent pas de statuer sur les majorations à appliquer lorsque la durée à considérer est inférieure à 1 heure. À défaut de valeurs dans ce cas, nous suggérons d'utiliser les majorations recommandées pour la durée 1 heure.

- **Choix du RCP** : Tel que mentionnée plus haut, les scénarios RCP sont le reflet de notre méconnaissance de l'évolution future des émissions de GES et des concentrations de ces gaz dans l'atmosphère terrestre au cours des décennies à venir. Dans le cas présent, deux principaux scénarios ont été examinés, les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 et des majorations proposées pour chacun de ces scénarios. Le scénario RCP 4.5 est un scénario modéré alors que le scénario RCP 8.5 est un scénario pessimiste. On peut penser que la réalité se trouvera quelque part entre ces deux scénarios. Ultimement le choix de la majoration effective à appliquer relève de considérations liées à l'appréciation des risques et des conséquences d'une défaillance de l'ouvrage. Il est donc recommandé face à un ouvrage dont les conséquences d'une défaillance ou d'un dépassement de capacité sont majeures de prendre des majorations plus près du RCP 8.5 alors qu'au contraire pour un ouvrage dont les conséquences sont moins importantes de prendre des majorations plus près de celles suggérées pour le RCP 4.5.
- **Incertitudes sur les majorations proposées** : La Figure 10.9 permet d'apprécier l'ampleur des incertitudes associées aux majorations proposées. Plusieurs sources d'incertitudes contribuent à cette incertitude globale. Outre les incertitudes sur l'évolution future des concentrations de GES, représentées par les scénarios RCP, les incertitudes associées aux modèles climatiques sont également importantes. À titre d'exemple, il suffit de voir les écarts importants entre les projections présentées à la Figure 10.9 issues des différentes simulations de l'ensemble CORDEX ou des modèles globaux utilisés par Bush et Lemmen (2019). Globalement, les incertitudes totales sur les projections augmentent avec le temps. Ainsi les incertitudes sur les projections à la fin du siècle sont plus grandes que celles des prochaines décennies ce que montre bien la Figure 10.9. Même si les simulations ne projettent pas des augmentations similaires, toutes cependant indiquent que les extrêmes augmenteront, que ces augmentations seront plus importantes au fur et à mesure que l'on progressera dans le siècle, qu'elles seront d'autant plus importantes que les concentrations de GES seront importantes et enfin que, très vraisemblablement ces augmentations seront plus importantes pour les pluies de plus courtes durées. Les valeurs recommandées au Tableau 10.8 ont été développées en fonction de ces différents constats et conclusions tirées de l'analyse des simulations climatiques disponibles à ce jour.
- **Comment interpréter et utiliser les majorations proposées ?** En regard de ce qui a été dit aux paragraphes précédents, il apparaît clair que les majorations proposées doivent être vues et utilisées comme des valeurs 'guides' pour la prise en compte de l'impact des CC lors de la conception d'ouvrages dont la durée de vie utile

s'échelonne sur les décennies à venir. L'utilisateur doit être conscient des incertitudes associées à ces valeurs et devra faire preuve de jugement et de discernement face à une application particulière pour adapter ces valeurs en fonction du contexte particulier d'application et des éléments de risque et de vulnérabilité en présence.

10.5 Estimation des débits de conception en climat futur

Compte tenu des résultats précédents, il apparaît impératif de revoir les procédures actuelles de conception afin de prendre en compte les impacts des CC sur les précipitations extrêmes. À défaut de quoi les ouvrages conçus à partir des courbes IDF actuelles pourraient être sous-dimensionner et accentuant le risque de dépassements de leur capacité à moyen ou long terme.

La MÉRA établit un lien direct entre les précipitations et les débits extrêmes à travers l'utilisation des courbes IDF. Ce lien n'est toutefois pas déterministe dans ce sens qu'il ne signifie pas qu'à chaque fois qu'une pluie de PdR 25 ans par exemple s'abat sur un BV qu'un débit de crue de PdR 25 ans sera observé. La MÉRA établit plutôt un lien 'statistique' entre la pluie de PdR donnée et le débit de même PdR et assume qu'en moyenne, il existe un lien entre ces deux types d'événements.

La question est donc de savoir si cette relation persistera en climat futur et donc si on peut toujours utiliser la MÉRA en climat futur et utiliser une version majorée des courbes IDF. La modélisation hydrologique réalisée dans le cadre de ce projet devait en partie répondre à cette question. Malheureusement les résultats de cette analyse ne sont pas concluants (voir Chapitre 9).

Dans un tel contexte, l'hypothèse la plus simple est de considérer que les majorations futures des débits de crue (en eaux libres) seront proportionnelles aux majorations des courbes IDF tel que le suppose la MÉRA. L'estimation des débits de conception en climat futur se fait donc en utilisant les courbes IDF actuelles majorées selon les valeurs du Tableau 10.8. L'utilisateur doit préciser certains paramètres (p. ex. horizon futur considéré qui est fonction de la durée de vie utile présumée de l'ouvrage) et faire certains choix (p. ex. sur le type d'évolution future des GES et les risques et les conséquences d'une défaillance de l'ouvrage) afin de définir le facteur à appliquer (voir Section 10.4).

Chapitre 11. Approche révisée de la méthode rationnelle

Ce chapitre a pour objectif de présenter une application détaillée de la version révisée de la MÉRA. Pour ce faire, le BV 030423, un BV de 94 km² avec une couverture agricole importante, localisé au Québec, est considéré. Les Annexes B et D peuvent être consultées pour toutes les informations concernant les sources d'informations utilisées et les outils/méthodes d'estimation des caractéristiques physiographiques.

11.1 Caractéristiques physiographiques nécessaires à l'application de la MÉRA

La caractérisation d'un BV passe en tout premier lieu par la délimitation du BV. Pour le BV, un modèle numérique de terrain et les cartes ont été utilisés pour la délimitation (Annexe D.1). Les Figures 11.1 et 11.3 montrent la délimitation ainsi obtenue du BV. Le Tableau 11.1 présente les valeurs estimées pour chacune des caractéristiques physiographiques de base de ce BV. Une fois le BV délimité, il est possible d'estimer la longueur du cours d'eau principal (Section 11.1.1), la répartition de l'occupation du territoire (Section 11.1.2), la pente moyenne du BV (Section 11.1.3) et la pente du cours d'eau (11.1.4)

11.1.1 Longueur du cours d'eau principal

La longueur du plus long cours d'eau qui traverse le BV depuis l'exutoire jusqu'à sa limite amont (cours d'eau principal, Annexe D.3) est estimée en considérant l'ensemble du réseau hydrographique. La Figure 11.1 montre à la fois le réseau hydrographique ainsi que le cours d'eau principal du BV 030423. Il est important de rappeler qu'il peut être nécessaire d'ajouter un segment au cours d'eau principal afin qu'il atteigne la limite amont du BV.

Tableau 11.1 – Estimation des caractéristiques physiographiques du BV 030423

Caractéristiques	Estimation	
Superficie du bassin (A, km ²)	94.0	
Longueur du réseau hydrographique (L _{RH} , km)	157.9	
Longueur du cours d'eau principal (L _C , km)	24.2	
Pente moyenne du bassin-versant (S _B , %)	0.76	
Pente du cours d'eau (%)	0.38	
Pente 85-10 du cours d'eau (S _C , %)	0.31	
Occupation (%)	Agricole	55.5
	Forestière	34.6
	Lac	0.1
	Milieu humide	9.2
	Urbain	0.6

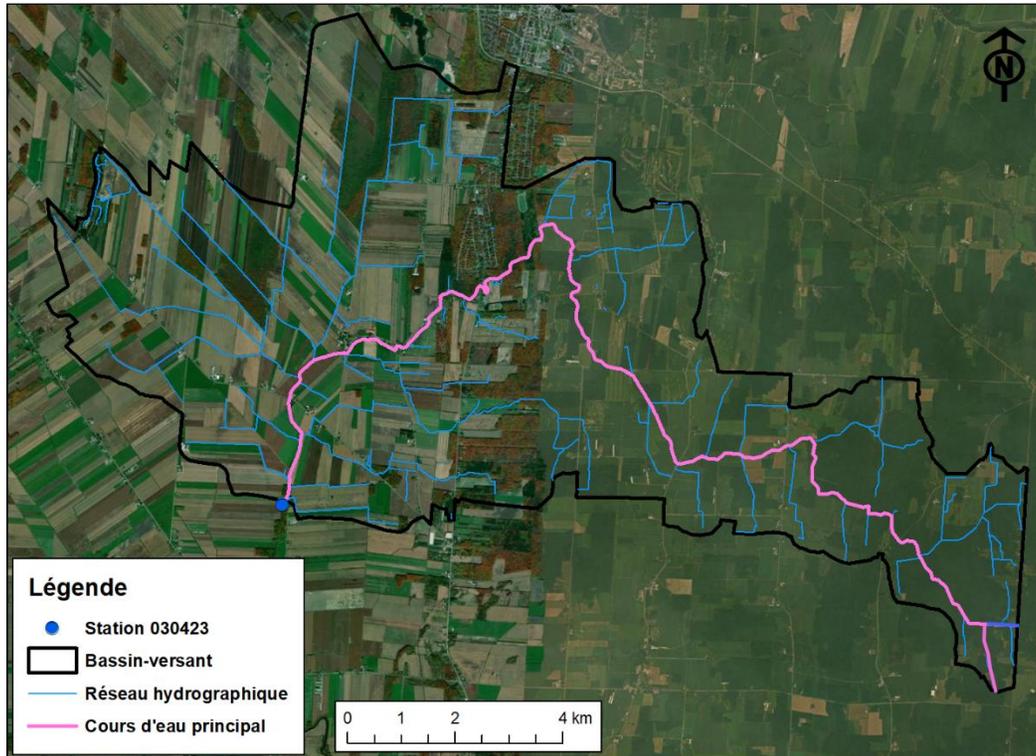


Figure 11.1 – Réseau hydrographique du BV 030423 et cours d'eau principal associé au plus long parcours de l'eau

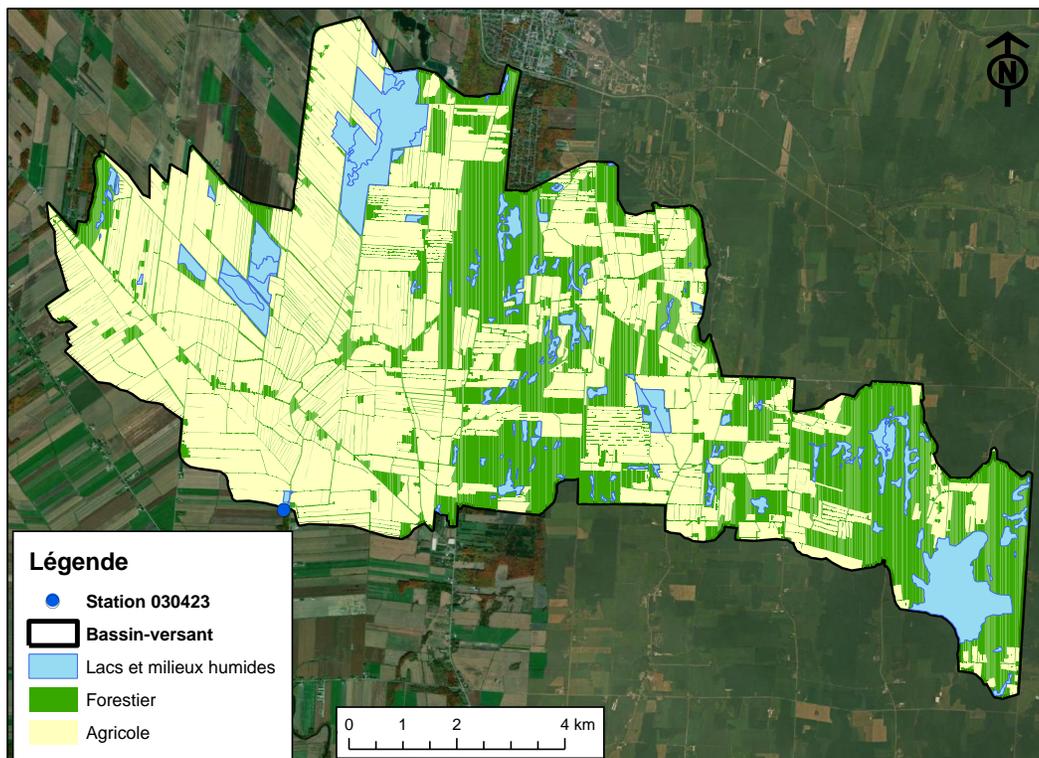


Figure 11.2 – Occupation du territoire du BV 030423

11.1.2 Occupation du territoire

L'occupation du territoire provient de l'inventaire annuel des cultures du Canada (IAC, 2016). Cet inventaire est très précis en terme d'occupation puisqu'il fait notamment la distinction entre les types de cultures et les différentes zones forestières (arbustaire, conifère, feuillu, etc.). Ainsi, les regroupements suggérés dans le rapport final de la Phase I du même projet (Mailhot *et al.* 2018, Section 7.3) ont été utilisés pour définir et estimer les couvertures associées aux catégories d'occupation du territoire de type forestière, agricole et urbaine.

La couverture des lacs et les milieux humides provient d'autres sources (voir Tableau B.1, de l'Annexe B) et a été soustraite à l'IAC (voir Section D.8). La Figure 11.2 montre l'occupation du territoire ainsi estimée pour le BV 030423. Celle-ci est majoritairement agricole (55.5 %; Tableau 13.1) et comprend également une fraction importante de zones forestières (34.6 %). Les LMH sont également importants (9.3 %) et sont essentiellement associés à des milieux humides (9.2 %). Quant à l'occupation urbaine, elle reste marginale avec moins de 1% (Tableau 11.1).

11.1.3 Pente moyenne du BV

La Figure 11.3a présente le relief du BV 030423 provenant d'un MNT dont la résolution 10 m x 10 m (Annexe D.2). La distribution des pentes (fonction de répartition) des tuiles est présentée à la Figure 11.3b. Cette figure montre que plus de 98 % des tuiles du MNT ont des pentes inférieures à 2 %. Dès lors, le BV 030423 est caractérisé par une pente moyenne faible (0.76 %; Tableau 13.1).

11.1.4 Pente du cours d'eau

La Figure 11.3c montre le profil de l'altitude le long du cours d'eau principal (Annexe D.4). La pente du cours d'eau principal est de 0.28 % alors que la pente 85-10 (10% en amont de l'exutoire et à 15% en aval de la limite du BV) est de 0.31 %.

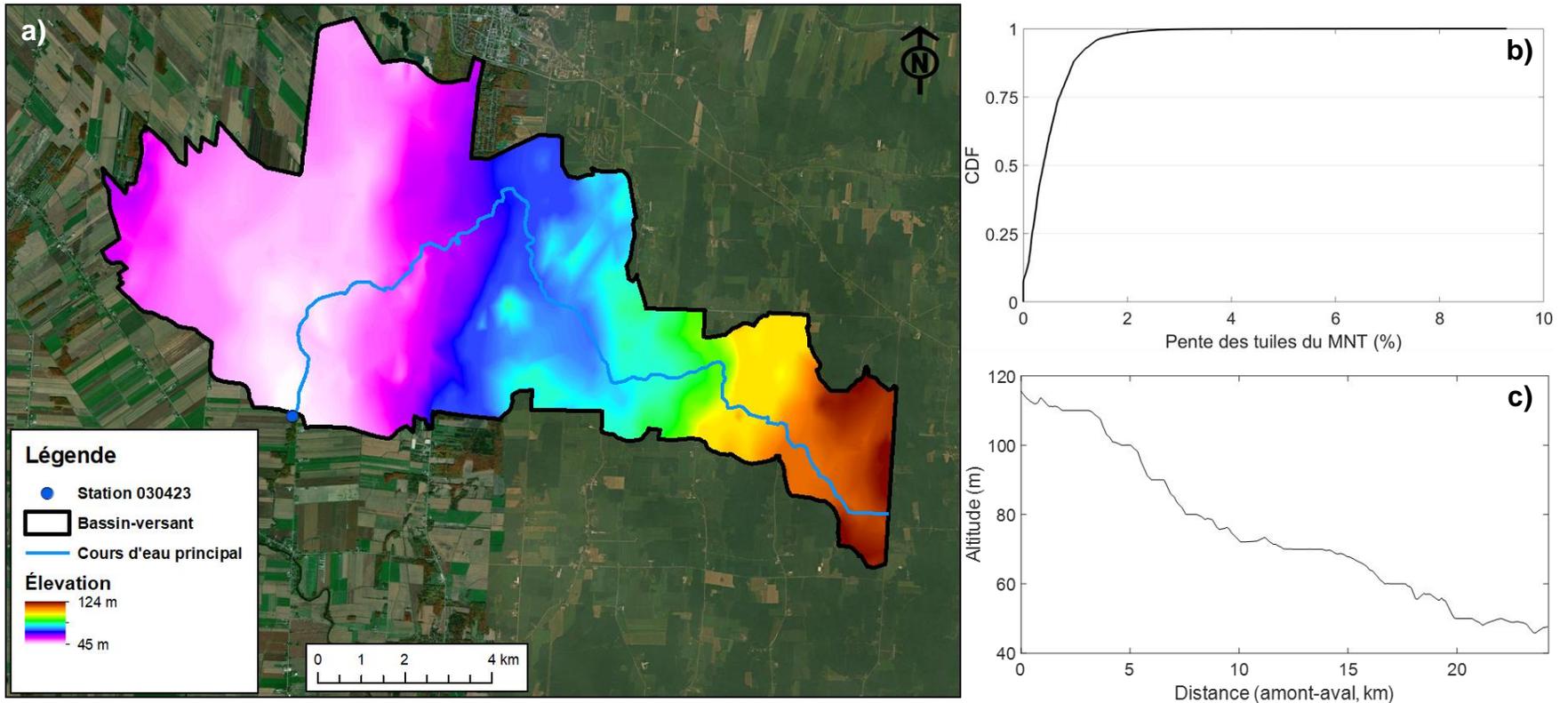


Figure 11.3 – a) Relief du BV 030423 provenant d'un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 10 m x 10 m; b) fonction de répartition des pentes des tuiles du MNT ayant servi à estimer la pente moyenne du BV; c) profil de l'altitude du cours d'eau principal

11.2 Temps de concentration et intensité de précipitation

Pour estimer le TC à partir de l'arbre D-4 (Figure 6.1), il est nécessaire de connaître l'occupation en LMH et la valeur du rapport $L_C/\sqrt{S_C}$. Pour le BV 030423, ce rapport, considérant les valeurs du Tableau 11.1 est de 39.2 km et l'occupation en LMH est de 9.3 %. Ainsi, le TC estimé est de 13 heures. La Figure 11.4 montre où se situe le BV 030423 dans l'arbre D-4.

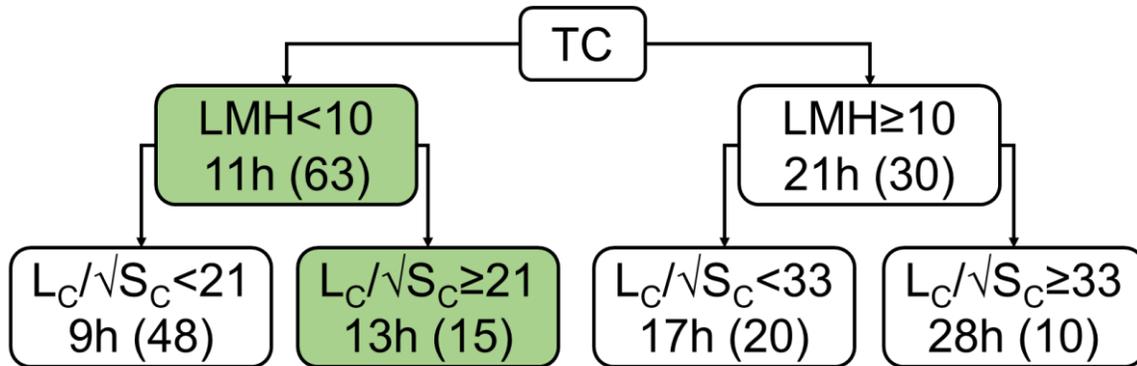


Figure 11.4 – Estimation du temps de concentration du BV 030423 dont l'occupation en lacs et milieux humides (LMH) est de 9.3 % et le rapport $L_C/\sqrt{S_C}$ est de 39.2 km

Pour le BV 030423, la station météorologique la plus près, pour laquelle des courbes IDF sont disponibles, est Saint-Sébastien (7027725). Cette station se trouve à 11.7 km de la station de jaugeage (voir le Tableau O.1 de l'Annexe O). L'intensité de la précipitation (mm/h) est estimée à partir de l'équation suivante :

$$I = a TC^b \quad (11.1)$$

Pour un TC de 13 heures, les intensités de la précipitation de PdR 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans seront :

$$I_2 = 20.9 (13^{-0.68}) = 3.7 \text{ mm/h} \quad (11.2)$$

$$I_5 = 26.3 (13^{-0.70}) = 4.4 \text{ mm/h} \quad (11.3)$$

$$I_{10} = 29.9 (13^{-0.70}) = 5.0 \text{ mm/h} \quad (11.4)$$

$$I_{25} = 34.4 (13^{-0.71}) = 5.6 \text{ mm/h} \quad (11.5)$$

$$I_{50} = 37.7 (13^{-0.71}) = 6.1 \text{ mm/h} \quad (11.6)$$

$$I_{100} = 41.0 (13^{-0.71}) = 6.6 \text{ mm/h} \quad (11.7)$$

11.3 Coefficient de ruissellement

Pour cet exemple, le CR sera estimé à partir de la deuxième approche simplifiée (S-2, Section 7.8.2). Avec cette approche, le CR est estimé à partir de l'occupation du territoire et de la pente moyenne du BV. Pour le BV 030423, la pente moyenne du BV est 0.76 % ce qui le place dans la classe de pente [0-3] %. Le Tableau 11.2 met en valeur les CR attribués aux classes de pente [0-3] % ainsi qu'aux autres occupations du territoire (affleurements rocheux, Lac, Milieu humide et zone urbaine)

Puisque le CR total (CR_T) se calcule au prorata de la superficie de chaque occupation et du CR correspondant, on a donc :

$$\begin{aligned} CR_T &= (0.20 * 0.346) + (0.30 * 0.555) + (0.80 * 0.001) \\ &+ (0.15 * 0.092) + (0.50 * 0.006) = 0.26 \end{aligned}$$

Considérant des facteurs de 0.5, 0.8, 0.9, 1.1 et 1.2 (Sections 7.4 et 7.7) les CR de PdR 2, 5, 10, 50 et 100 ans sont de 0.13, 0.21, 0.23, 0.29 et 0.31 respectivement.

Tableau 11.2 – Valeurs de CR pour la classe de pente [0-3] % considérant l'approche S-2 et, entre parenthèses, les fractions de la superficie du BV 030423 se trouvant dans chacune des catégories (adaptation du Tableau 7.6)

Pente (%)	Forestier	Agricole
[0-3]	0.20 (0.346)	0.30 (0.555)
Affleurement rocheux	Lac	Milieu humide
0.75 (0.0)	0.80 (0.001)	0.15 (0.092)
Urbain faible densité	Urbain densité moyenne	Urbain forte densité
0.20 (0.0)	0.50 (0.006)	0.90 (0.0)

11.4 Débits de conception

L'estimation des débits de conception exige de connaître la superficie du BV (A, hectare; Tableau 11.1), l'intensité de la précipitation de durée égale au TC (I, mm/h; équations 11.2, 11.3 et 11.4) et le CR (Section 11.3) :

$$Q = \frac{A I CR}{360} \quad (11.8)$$

Pour les différentes PdR, les débits de conception seront calculés de la manière suivante :

$$Q_2 = \frac{9400 * 3.7 * 0.13}{360} = 12.6 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11.9)$$

$$Q_5 = \frac{9400 * 4.4 * 0.21}{360} = 24.1 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11.10)$$

$$Q_{10} = \frac{9400 * 5.0 * 0.23}{360} = 30.0 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11.11)$$

$$Q_{25} = \frac{9400 * 5.6 * 0.26}{360} = 38.0 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11.12)$$

$$Q_{50} = \frac{9400 * 6.1 * 0.29}{360} = 46.2 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11.13)$$

$$Q_{100} = \frac{9400 * 6.6 * 0.31}{360} = 53.4 \text{ m}^3/\text{s} \quad (11.14)$$

Les débits de conception de périodes de retour 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans pour le BV 030423 sont donc respectivement 25.1 m³/s, 29.9 m³/s, 33.9 m³/s, 38.0 m³/s, 44.6 m³/s et 50.0 m³/s.

Chapitre 12. Bassins-versants instrumentés

Dans le cadre de ce projet, quatre sites ont été instrumentés de façon à colliger des données de débit et pallier en partie le peu de données disponibles pour des BV caractérisés par une présence importante de milieux humides. En effet, les intervenants du MTQ ont remarqué depuis quelques années des problèmes récurrents de dépassement de capacité pour les ponceaux situés en aval de BV comprenant des milieux humides. L'intérêt est également de documenter l'influence des milieux humides sur les débits de pointe particulièrement pour des BV situés sur la Côte-Nord. Ainsi, quatre BV, dont deux se trouvant sur la Côte-Nord, ont été instrumentés.

Le présent chapitre a pour objectif de décrire ces BV, l'instrumentation mise en place et de faire un résumé du suivi et des informations ainsi colligées. Il est structuré de la façon suivante. La Section 12.1 localise alors que la Section 12.2 en fait une brève description. La Section 12.3 fournit une description de l'instrumentation mise en place à chacun des sites alors que la Section 12.4 fait un bilan des six campagnes de mesure réalisées depuis le début du projet en 2015. La Section 12.5 explique comment la relation hauteur/débit des deux sites de la Côte-Nord a été établi. Finalement, la Section 2.6 fait un résumé des campagnes de mesure.

12.1 Localisation des sites

Tel que mentionné au paragraphe précédent, deux des sites se trouvent sur la Côte-Nord. Le premier site (S1) est situé près du village de Sault-au-Mouton, dans la municipalité de Longue-Rive qui se trouve elle-même dans la région administrative de la Côte-Nord (Figure 12.1). Le bassin-versant (BV), défini par l'emplacement du limnimètre, est parcouru par le ruisseau des Bacon et son exutoire se situe à quelques mètres de la route 138 qui a été réaménagée en 2014 (Annexe P, Figure P.1).

Le site S2 se trouve sur un affluent de la rivière Riverin. Il est situé à 30 km à l'ouest de Port-Cartier dans la région administrative de la Côte-Nord (09) et à environ 6.5 km de la station de jaugeage 071801 opérée par la DEH (Figure 12.1). L'exutoire du BV est situé en amont d'un ponceau traversant un chemin forestier. Cette section du cours d'eau est encavée et caractérisée par un faible courant (Annexe P, Figure P.2).

Le site S3 se situe dans la partie amont du BV de la rivière La Chevrotière. Il est situé dans la région administrative de la Capitale-Nationale (03) plus précisément dans la Municipalité Régionale de Comté (MRC) de Portneuf (Figure 12.1). La station de jaugeage 050501 de la DEH est à la jonction de la route du Moulin à Saint-Gilbert (Annexe P, Figure P.3).

Finalement, le BV en amont du site S4 se situe à la tête du BV du ruisseau Rouge dans la région administrative de Saguenay – Lac-Saint-Jean et dans la MRC Maria-Chapdelaine (Figure 21.1). La station de jaugeage 062002 de la DEH se trouve à l'exutoire de ce BV à la jonction de la rue Saint-Cyrille, au sud de la municipalité de Normandin (Annexe P, Figure P.4).



Figure 12.1 – Localisation des quatre sites instrumentés

12.2 Description des sites

Cette section donne une brève description des sites instrumentés à savoir les caractéristiques physiographiques (Section 12.2.1), l'occupation du territoire (Section 12.2.2) et le réseau hydrographique (Section 12.2.3).

12.2.1 Caractéristiques physiographiques

Le Tableau 12.1 présente les principales caractéristiques physiographiques des BV instrumentés. La superficie des BV varie d'un peu moins de 3 km² à un peu plus de 26 km². Les BV de la Côte-Nord (S1 et S2) ont des pentes plus élevées que les deux autres BV (5.8 et 8.5 % respectivement). Pour tous les sites, les pentes du cours d'eau principal sont faibles (< 2 %) particulièrement pour le site S2 où elle est de 0.2 % seulement.

Tableau 12.1 – Principales caractéristiques des BV instrumentés

Identifiant	Superficie (km ²)	Longueur du cours d'eau	Pente du bassin (%)	Pente du cours d'eau principal (%)
S1	2.7	3.1	5.8	1.5
S2	6.6	6.6	8.5	0.2
S3	19.4	9.6	1.9	0.6
S4	26.8	14.2	2.1	0.5

12.2.2 Occupation du territoire

Les sites présentent des occupations du territoire très variées. L'occupation du territoire des sites S1, S3 et S4, a été déterminée à partir de l'Inventaire annuel des cultures 2016 (IAC; voir Tableau B.1 de l'Annexe B). Le BV S2 n'est cependant pas couvert par l'IAC. La couverture du sol *circa 2000* a dès lors été utilisée pour caractériser l'occupation du territoire du site S2². Les Figures 12.2, 12.3 et 12.4 montrent le pourcentage de la superficie des BV pour chacune des occupations du territoire.

Le site S1 est en grande majorité forestier (73.7 %) et comprend également de grandes zones avec arbustes (arbustaie à 19.65 %). Les visites de terrain ont permis de constater que les arbustes en question sont majoritairement des cultures de bleuets. Selon l'IAC, les milieux humides recouvrent 2.2 % du BV. Cependant les visites de terrain ont permis d'identifier des zones humides non répertoriées dans l'IAC. Ainsi, selon nos estimations, l'IAC sous-estime d'environ 3 % la surface réelle en milieux humides.

Tout comme le site S1, le site S3 est également majoritairement forestier (81.6 %). Des zones associées aux cultures et aux pâturages sont également présentes (7.9 %). Les milieux humides représentent 8.1 % du BV.

Le site S4 a quant à lui une occupation du territoire beaucoup plus variée bien que le milieu forestier domine encore une fois (41.6 %). Ce BV comprend des zones importantes de pâturages (23.4 %) et de cultures (16.7 %) dominées par les bleuetières. La superficie des milieux humides est similaire au site S3 avec 7.9 %.

Finalement, pour le site S2, les zones humides herbacées, de type tourbière minérotrophe (fen), recouvrent 26.7 % du BV alors que le reste du BV est occupé par des zones forestières diverses (73.3 % : forêt de conifères ouverte ou dense, forêt de feuillus ouverte ou dense et forêt mixte ouverte ou dense).

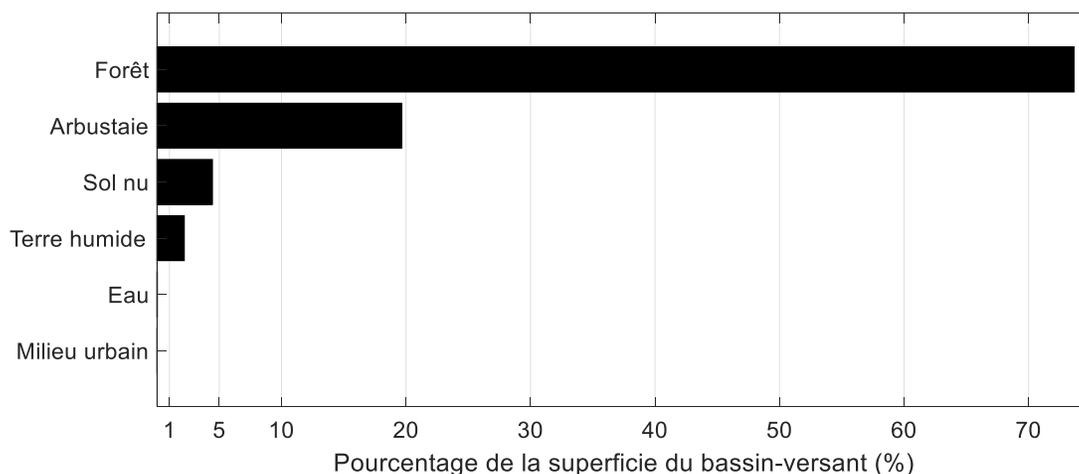


Figure 12.2– Pourcentage de la superficie du BV S1 occupé par les différentes occupations du territoire

² <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/97126362-5a85-4fe0-9dc2-915464cfdbb7>

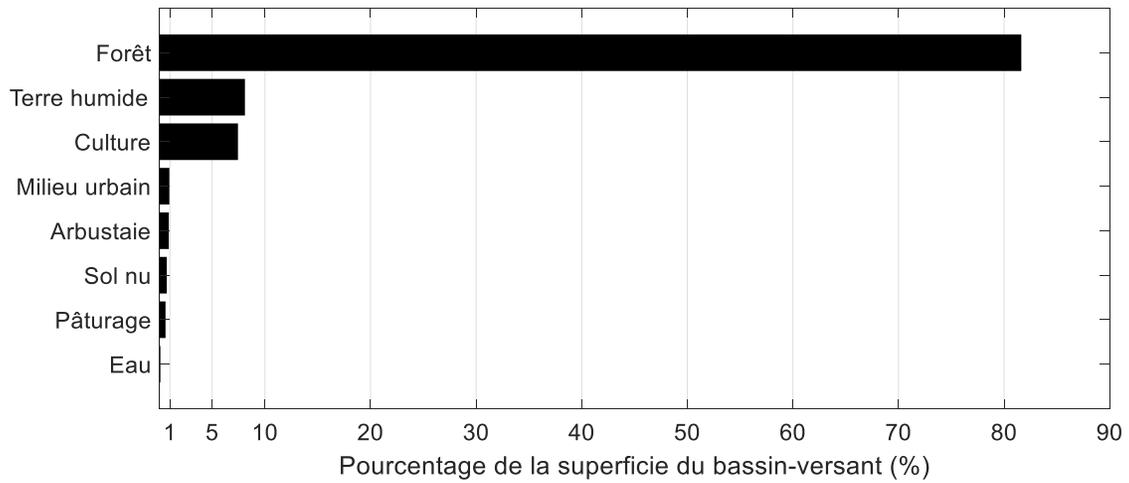


Figure 12.3 – Pourcentage de la superficie du BV S3 occupé par les différentes occupations du territoire

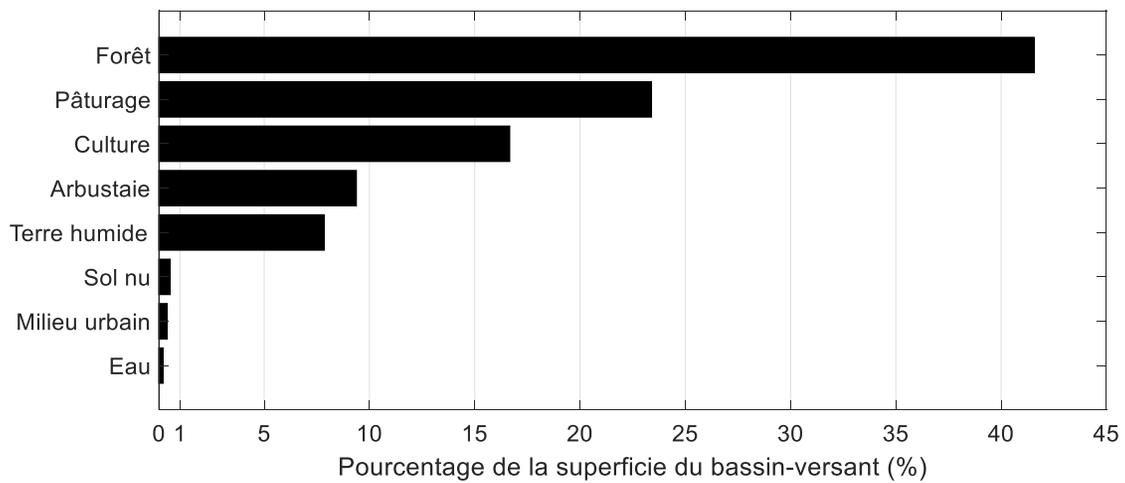


Figure 12.4 - Pourcentage de la superficie du BV S4 occupé par les différentes occupations du territoire

12.2.3 Réseau hydrographique

La Figure 12.5 présente le réseau hydrographique de chaque BV instrumenté. Le réseau hydrographique du site S2 est exclusivement en milieu naturel, alors que pour les sites S1 et S3 l'écoulement se fait également en fossés notamment le long des chemins forestiers et des routes. Pour ces trois sites, la complexité du réseau hydrographique est similaire avec des ramifications d'ordre trois ou quatre. Pour le site S4, le réseau hydrographique est à la fois naturel et anthropique en raison des zones importantes de cultures et de pâturages présentes sur ce bassin. De plus, ce site a un réseau hydrographique complexe où l'on retrouve des cours d'eau jusqu'à l'ordre six.

Pour tous ces sites, la présence des lacs est négligeable. Selon l'IAC, la superficie des lacs pour les sites S1, S3 et S4 représente 0.03, 0.03 et 0.2 % du territoire respectivement. Pour le site S2, il est possible d'apercevoir quelques lacs sur la Figure 12.5, toutefois ceux-ci sont tous inclus dans les zones humides herbacées.

Il est important de mentionner que le site S3 comprend un lac d'une superficie de 14 142 m² se trouvant au milieu du BV (Figure 12.6). Il s'agit d'un lac artificiel formé à la suite de la construction d'un barrage (Identifiant : X0001732) en 1972. Le barrage est utilisé à des fins récréatives et de villégiature, est de faible capacité (13 400 m³ selon DEH, 2003) et n'est pas opéré. Il ne devrait donc pas contrôler les débits en aval. Toutefois, après des discussions avec les propriétaires du lac, la vanne de vidange est parfois ouverte afin de diminuer le niveau du lac. Il serait alors possible d'observer des débits importants à la station de jaugeage sans que des précipitations aient été enregistrées.

12.3 Instrumentation des sites

Au moins un pluviomètre, un capteur d'humidité du sol, un thermomètre et un enregistreur de données ont été installés à chacun des sites. Il est important de mentionner que pour deux sites (S3 et S4), parmi les quatre retenus, les données de débits proviennent de la DEH. Dès lors, il n'était pas nécessaire d'équiper ces sites d'appareil servant à mesurer le niveau de l'eau (voir le Tableau 12.2 pour la liste des instruments installés en chaque site). Pour les BV non jaugés par la DEH, un limnimètre à bulle, gracieusement fourni par la DEH, a été mis en place. Le Tableau 12.2 indique le nombre d'unités achetées et les sites où les appareils ont été installés et l'Annexe Q montre comment les différents appareils de recherche ont été mis en place. Enfin la Figure 12.5 localisent l'endroit où ces appareils ont été installés dans chacun des BV.

Les paragraphes suivants décrivent chacun de ces instruments installés :

- **Pluviomètre** : Le pluviomètre utilisé est le modèle TR-525M de Texas Electronics Inc (voir la fiche technique sur le site <http://texaselectronics.com/products/rainfall.html>). Il s'agit d'un pluviomètre à auget basculant dont la résolution est de 0.1 mm. (i.e. qu'une bascule survient dès que 0.1 mm de pluie s'est accumulé). La précision de l'instrument est de ± 1.0 % à une intensité de pluie de 50 mm/heure;

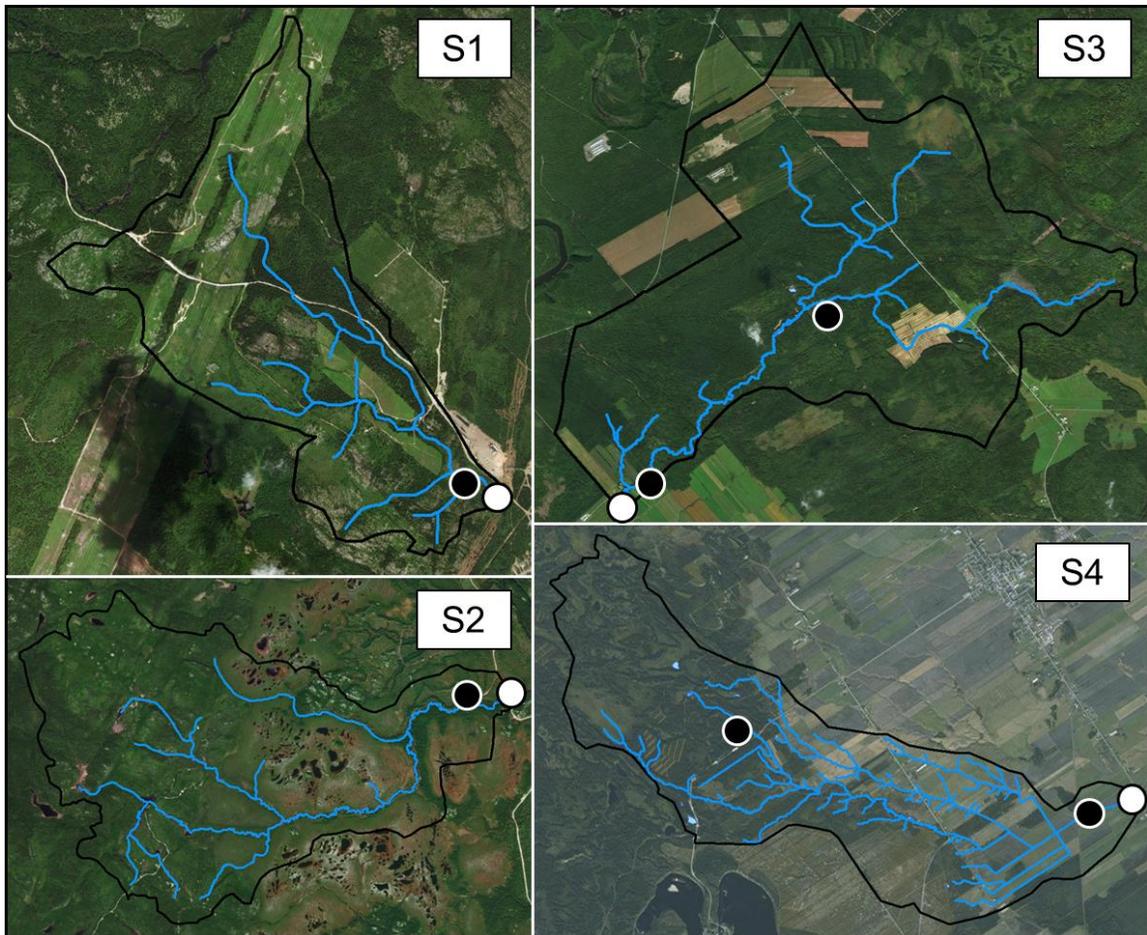


Figure 12.5 – Réseau hydrographique des BV instrumentés et localisation des appareils de mesure (point blanc : station de jaugeage; point noir : station météorologique pouvant comprendre un pluviomètre, un capteur d’humidité du sol et un thermomètre)

Tableau 12.2 - Types et nombre d’instruments installées dans chacun des BV instrumentés.

Appareil	Nombre total d’unités	Nombre d’unités sur chaque site			
		S1	S2	S3	S4
Pluviomètre	6	1	1	2	2
Capteur d’humidité du sol	6	1	1	2	2
Thermomètre	4	1	1	1	1
Enregistreur de données	6	1	1	2	2
Limnimètre ¹	2	1	1	0	0

1. Les appareils des sites S1 et S2 ont été gracieusement fournis par la DEH et installés par l’équipe de l’INRS alors que pour les sites S3 et S4, les données de débits enregistrées aux stations opérées par la DEH ont été utilisées.

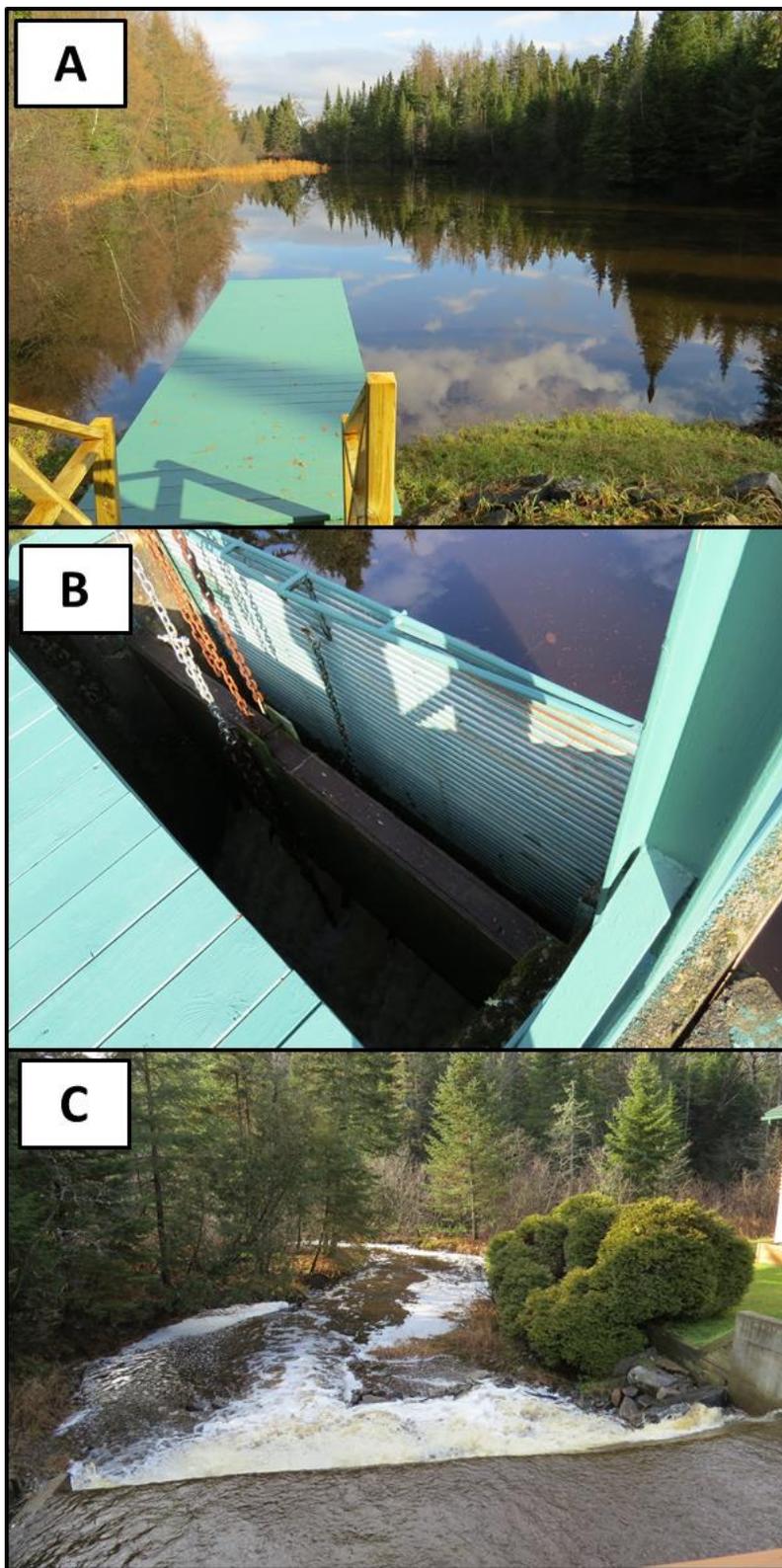


Figure 12. 6 - Lac artificiel (A), vanne de vidange (B) et barrage avec vue vers l'aval (C) situé au milieu du BV du site S3 (Photos : Samuel Bolduc)

- Capteur d'humidité du sol : Le capteur d'humidité du sol est le modèle 10HS de la compagnie Onset Computer (voir la fiche technique sur le site <http://www.onsetcomp.com/products/sensors/s-smd-m005>). Il s'agit d'une sonde de 10 cm de long qui permet d'estimer le contenu en eau (m³) dans un mètre cube de sol avec une précision de 3.3 % ou ± 0.033 m³/m³.
- Thermomètre : La température et l'humidité relative sont mesurées avec l'appareil S-TMB-M006. Cet appareil peut mesurer des températures entre -40 et 100 °C avec une précision de ± 0.2 °C pour des températures allant de 0 à 50 °C (voir la fiche technique sur le site http://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/7105-M%20MAN-S-TMB.pdf).
- Enregistreur de données : L'enregistreur de données est le modèle U30 fabriqué par Onset Computer (voir la fiche technique sur le site <http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/u30-nrc>). Il comprend une batterie 4 Volts alimentée par un panneau solaire de 6 Watts. La mémoire d'enregistrement du modèle U30 est de 512 Kb ce qui donne une autonomie d'environ trois mois pour deux appareils pour une fréquence d'enregistrement aux minutes.
- Limnimètre : Le limnimètre est le modèle LPN 8/3 fabriqué par Hydrologic (voir la fiche technique sur le site <http://www.hydrologic.fr/pdf%20anglais/LPN%208-2%20%20-%20english.PDF>). Il s'agit plus précisément d'un bulleur ou d'un limnimètre à bulle et permet d'estimer la hauteur d'eau. L'instrument est alimenté par une batterie 12 Volts et a une autonomie d'environ 40 jours pour une fréquence d'enregistrement aux cinq minutes. Il est important de mentionner que les limnimètres n'ont pas été achetés. Ils appartiennent au CEHQ et nous ont été gracieusement prêtés pour la durée du projet.

12.4 Calendrier et bilan des campagnes de mesure

Le Tableau 12.3 présente les dates de début et de fin des campagnes de mesure 2015 à 2020 pour les quatre sites instrumentés. Il est important de mentionner que les périodes délimités par les dates indiquées au Tableau 12.3, les données sont complètes avec une résolution d'enregistrement d'une minute de 2015 à 2018 et de cinq minutes pour les années 2019 et 2020. L'Annexe S présente les hauteurs maximales de précipitations reçues, considérant différentes durées, en chaque site et pour chaque année et la période de retour correspondante. L'Annexe T présente quant à elle les totaux mensuels de précipitations en chaque site et pour chaque année et les compare avec les normales climatiques d'une station météorologique située à proximité.

Tableau 12.3 – Date de début et de fin des campagnes de mesure de 2015 à 2020 pour les quatre sites instrumentés

Année	S1		S2		S3		S4	
	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
2015	25/06	13/11	04/06	27/10	28/05	19/11	18/06	18/11
2016	19/05	21/11	19/05	21/11	16/04	11/11	10/05	9/11
2017	13/06	16/11	12/06	15/11	17/04	17/11	9/05	14/11
2018	30/05	08/11	29/05	08/11	01/05	18/11	02/05	11/11
2019	29/05	07/11	28/05	06/11	08/05	08/08	09/05	05/11
2020	05/06	20/11	04/06	29/09	29/05	18/11	27/05	19/11



Figure 12.7 - Mesure de débit le long d'un transect à l'exutoire du site S1 (Photo : Alain Mailhot)

12.5 Mesure de débit et courbes de tarage

Pour les sites S1 et S2, des mesures de débit ont été prise à plusieurs reprises au cours de chaque campagne de mesure afin de construire la courbe de tarage en ces sites. L'appareil *SonTek FlowTracker Handheld Velocity Meter*³ a été utilisée. Cet appareil mesure la vitesse moyenne de l'écoulement des eaux pour une colonne d'eau de profondeur connue, le long d'un transect. Considérant que les mesures de vitesses se font à divers endroits le long du transect, le cours d'eau est divisé en de multiples colonnes d'eau, permettant ainsi à l'appareil d'estimer le débit total transitant par la section (Figure 12.7).

Les Figures 12.8 et 12.9 montrent les débits et de hauteurs d'eau correspondantes mesurées au cours des campagnes de terrain sur les sites S1 et S2 respectivement. Ces figures présentent également les courbes de tarage estimées à partir des couples débits/hauteurs d'eau mesurés. L'Annexe R présente en détails les informations relatives à chacune des mesures de débit et de hauteur d'eau.

Les courbes de tarage ont été obtenues en minimisant les écarts entre les débits observés et estimés en utilisant une équation du type $Q = a H^b$ où Q est le débit (m^3/sec), H est la hauteur d'eau (m) et a et b sont des paramètres à ajuster. Pour le site S1, la courbe de tarage est de la forme ($R^2 = 0.90$) :

$$Q = 10.34 H^{3.92} \quad (12.1)$$

Pour le site S2, la courbe de tarage s'exprimer comme suit ($R^2 = 0.89$) :

$$Q = 0.74 H^{2.85} \quad (12.2)$$

Les Figures 12.8 et 12.9 montrent que ces régressions s'ajustent relativement bien aux données mesurées pour l'ensemble de la gamme des débits et hauteurs.

³ <https://www.sontek.com/flowtracker2>

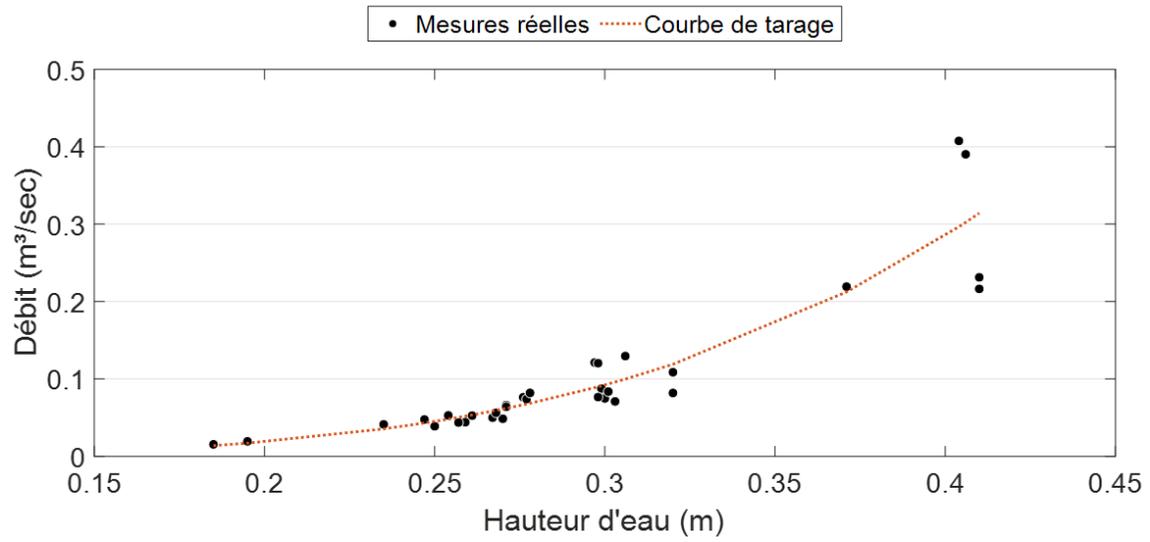


Figure 12.8 – Débits et hauteurs d'eau mesurés et courbe de tarage au site S1

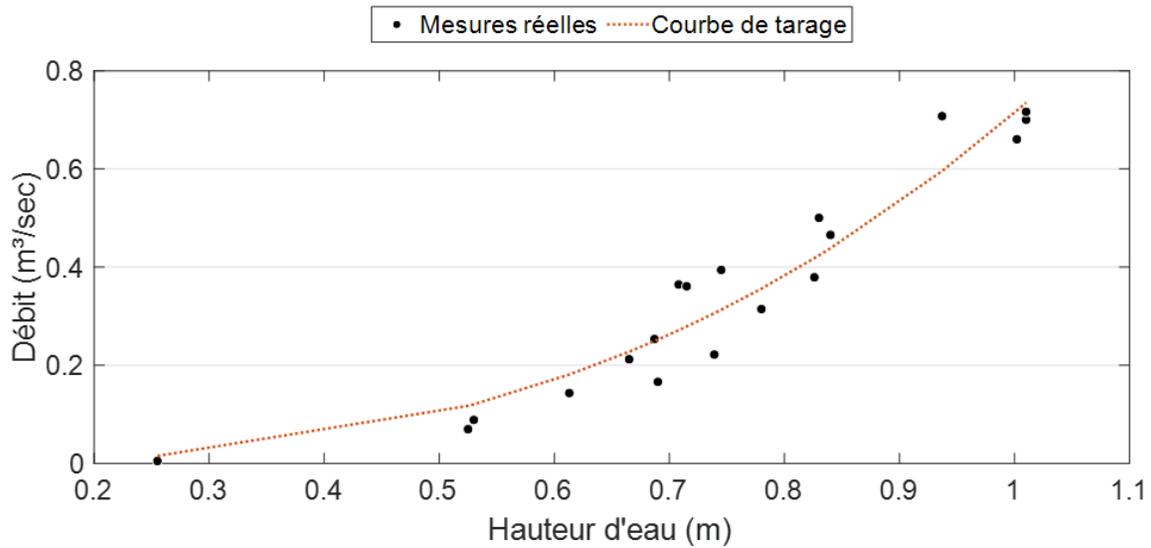


Figure 12.9 - – Débits et hauteurs d'eau mesurés et courbe de tarage au site S2

12.6 Résumé des campagnes de mesures

Cette section vise à résumer les points forts et moins forts tout au long des six années de campagne de mesure.

Les principaux points forts sont les suivants :

- Les données de débit et météorologiques ont été colligées avec rigueur. Ces données sont fiables et complètes à l'intérieur des périodes d'enregistrement (Tableau 12.3). Il est important de rappeler qu'aucune donnée n'a été enregistrée en présence de couvert de neige. Cette fiabilité transparait notamment dans les résultats associés aux modélisations hydrologiques où l'écart entre les débits simulés et observés est généralement plus faible pour les années d'enregistrement utilisées aux fins de calibration du modèle. Ces résultats, pour les sites S3 (Rivière Chevrotière) et S4 (Ruisseau Rouge) sont présentés au Chapitre 9.
- Certains BV ont été touché par des événements de pluie majeurs (Annexe S). Pour le site S1 et le site S2, des périodes de retour supérieures à 10 ans ont été estimées en 2015, 2016 et 2017 (voir Tableau S.1 et Tableau S.2). Considérant l'intérêt de ce projet vis-à-vis les forts débits, des précipitations de cette ampleur sont essentielles.
- Le BV du site S4 est celui pour lequel les périodes de retour les plus élevées ont été estimées. Les années 2016 et 2017 sont caractérisées par quelques périodes de retour supérieures à 10 ans (Tableau S.4). Toutefois, au cours de l'années 2018 des périodes de retour allant jusqu'à 274 ans (70.5 mm en 6 heures) ont été estimés. Considérant, des campagnes de mesure tenues sur six années, la probabilité d'enregistrer des précipitations associées à de telles période de retour reste somme toute très faible.
- Quelques mois particulièrement pluvieux ont été enregistrés surtout au cours des années 2015 à 2017 inclusivement lorsque les cumuls mensuels de pluie sont comparés aux normales climatiques des stations météorologiques les plus proche (Annexe T). Pour le site S1 au cours des mois de septembre et d'octobre des précipitations largement supérieures aux normales climatiques ont été enregistrées représentant une hausse de 59 et 112 % (Tableau T.1). Pour le site S2 les mois de juillet (2015) et juin (2016) ont totalisé 208 et 211 mm de pluie respectivement soit une augmentation de 59 et 101 % par rapport aux normales climatiques. Finalement, pour le site S3, 193 mm de pluie ont été enregistrés au cours du mois d'octobre 2016 ce qui représente une hausse de 103 % comparativement à la normale climatique.
- La station de jaugeage du site S1 est facilement accessible étant situé en bordure de la route 138 (Section 12.1). De plus, l'aval du site présente plusieurs seuils facilitant la mesure de débits. Ainsi, ce site, ayant été repérer par des intervenants de la DEH, pourrait facilement être équipée d'une station de jaugeage fonctionnelle à l'année et dont le suivi pourrait être réalisé par la DEH. Considérant que les données de débit provenant de BV de petite taille sont rares au Québec, l'enregistrement de données sur ce site viendrait combler, dans une certaine mesure, ce manque.

Les principaux points plus négatifs sont les suivants :

- Des bris d'équipements ont écourté à l'occasion les périodes d'enregistrement des données et/ou météorologiques. C'est le cas notamment sur le S1 en 2016 où les données de débits se poursuivre jusqu'au quatre août seulement en raison d'une perforation dans le tuyau du limnimètre à bulle (Section 12.3) et en 2019 en raison d'un limnimètre défectueux qui a dû être remplacé. Pour cette année, les données de débits ont été enregistrées jusqu'au six septembre.
- D'autres facteurs non reliés à des bris d'équipement sont également survenus. C'est le cas pour le site S2 où en 2016 la construction d'un barrage de castor a compromis la relation la hauteur d'eau et les débits. Pour cette année, les données se poursuivent jusqu'au 22 août. À noter que le barrage de castor a par la suite été détruit permettant ainsi de poursuivre les campagnes de mesure au cours des années ultérieures. Pour le site S3 et S4, différents problèmes sont survenus en ce qui concerne les stations météorologiques. Pour le site S3, à deux reprises l'un des pluviomètres était obstrué. Cette obstruction est attribuée au labour des terres en temps sec favorisant la présence de particules fines dans l'air et le dépôt de particules dans l'entonnoir du pluviomètre. Pour le site S4, l'ensemble d'une station météorologique a été arraché en 2015. Pour les sites S3 et S4, la présence de deux stations météorologiques à l'intérieur de chaque BV a toutefois permis d'avoir des données en continu tout au long des campagnes de mesure.
- L'enregistrement de données de débits au cours de la période en eau libre seulement pour les site S1 et S2 n'a pas permis d'utiliser ces données pour l'utilisation d'un modèle hydrologique en raison de problèmes rencontrés avec les conditions initiales du modèle (Chapitre 9).

Chapitre 13. Conclusions et perspectives

Le présent rapport présentait l'ensemble des travaux et résultats 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 - Phase II (CC06.2)*. Ce projet avait pour principal objectif de revoir et mettre à jour la méthode rationnelle (MÉRA) telle que décrite dans le Manuel de conception des ponceaux (MCP) et actuellement utilisée par le Ministère des Transports (MTQ) afin qu'elle soit mieux adaptée aux bassins versants (BV) du Québec méridional. Il visait cinq objectifs spécifiques : 1) poursuivre le suivi de quatre instrumentés dans le cadre de la Phase I du projet; 2) développer une nouvelle approche d'estimation des temps de concentration mieux adaptée aux BV du Québec; 3) revoir la procédure d'estimation des coefficients de ruissellement (CR); 4) mettre en place un modèle hydrologique sur des petits BV du Québec et simuler les conditions hydrologiques en climat actuel et futur; 5) formuler des recommandations sur les majorations à appliquer aux courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et sur la prise en compte des CC dans la procédure de conception.

Suivi des (BV) instrumentés

Quatre BV avaient été instrumentés et faits l'objet d'un suivi lors de la Phase I du projet. L'instauration de ce programme de suivi avait pour principal objectif de colliger des données de débits et des données météorologiques (pluies et températures) afin de mieux comprendre l'hydrologie des petits BV comportant une fraction importante de milieux humides.

Deux des BV instrumentés sont situés sur la Côte-Nord, un premier (S1) sur le ruisseau des Bacon près du village de Sault-au-Mouton, dans la municipalité de Longue-Rive et un second (S2) sur un affluent de la rivière Riverin à 30 km à l'ouest de la ville de Port-Cartier. Le troisième site (S3) se trouve dans la partie amont du BV de la rivière La Chevrotière située dans la région de la Capitale-Nationale, plus précisément dans la Municipalité Régionale de Comté (MRC) de Portneuf. Enfin le quatrième site (S4) se situe à la tête du BV du ruisseau Rouge dans la région administrative de Saguenay – Lac-Saint-Jean.

Les superficies de ces BV vont de 2.6 km² (S1) à 26.8 km² et sont majoritairement forestiers avec une présence de milieux humides relativement importantes (environ 3% pour le site S1, 8% pour les sites S3 et S4 et près de 27% pour le site S2).

Ces sites ont été instrumentés (pluviomètres, capteur d'humidité du sol, thermomètre, enregistreur de données et limnimètre) et ont fait l'objet d'un suivi (visite mensuelle de mai à novembre) de 2015 à 2020. Ces campagnes ont permis de construire des courbes de tarage aux sites 1 et 2 (les données de stations hydrométriques opérées par la DEH étaient utilisées pour les autres sites) et de colliger des données de débits, humidité des sols, pluies de très bonne qualité sur une période de 5 ans. Ces données n'ont malheureusement pas été exploitées à leur juste mesure dans le cadre de ce projet. Cependant elles pourront très certainement être utilisées dans le cadre de projet de recherche visant à mieux comprendre l'hydrologie de ce type de BV. Il serait également souhaitable que les campagnes de mesures se poursuivent dans les années à venir afin

de constituer des séries plus longues permettant une investigation de conditions hydrologiques variées (étiage et crue).

Développement d'une approche d'estimation des temps de concentration adaptée aux BV du Québec méridional

Les travaux portant sur le développement d'une nouvelle approche d'estimation des TC et la révision de la procédure d'estimation des CR ont été réalisés sur la base des analyses de 93 BV de moins de 100 km² situés au Québec, en Ontario et dans certains états du nord-est des États-Unis pour lesquels on dispose de données de débit sous-journalières, souvent aux 15 minutes. Dix années ou plus de débits mesurés (une année valide comportant moins de 20% de données non valides ou manquantes pour la période du 1^{er} juin au 31 octobre) sont disponibles pour chacun de ces BV. Le nombre d'années de débits mesurés disponibles varie de 10 ans à 46 ans pour une moyenne d'environ 20 ans.

Les caractéristiques physiographiques suivantes ont été estimées à tous ces BV :

- superficie;
- pente moyenne du BV;
- longueur du cours d'eau principal;
- pente moyenne du cours d'eau principal;
- longueur totale du réseau hydrographique;
- densité de drainage;
- forme (rapport entre la surface et la superficie);
- occupation du territoire (forestier, agricole, urbain, lacs et milieux humides);
- classification hydrologique des sols (groupe hydrologique A à D);
- connectivité des lacs et milieux humides (proportion de la longueur du réseau hydrographique qui transite directement par les lacs et milieux humides);
- séparation du réseau hydrographique (rapport entre la superficie des BV en amont de points le long du cours principal situées à une certaine distance de l'exutoire et la surface totale du BV);
- position des lacs et milieux humides.

Une majorité des BV est de type forestier bien que pour 16 BV l'occupation agricole soit supérieure à 60 %. Plusieurs BV présentent une occupation urbaine, toutefois, celle-ci ne dépasse jamais 17 % puisque l'un des critères de sélection des BV précisait que l'occupation urbaine devait être inférieure à 20 %. Enfin, l'occupation en lacs et milieux humides (LMH) peut atteindre jusqu'à 30 % et est supérieure à 10 % pour 30 BV.

Les débits maximums enregistrés sur la période du 1^{er} juin au 31 octobre de chaque année ont été extraits des séries de débits disponibles en chaque BV. Ces séries sont désignés comme les séries des débits maxima annuels (DMA) et ont été utilisées pour estimer les quantiles de débits de diverses périodes de retour (PdR).

Trois distributions ont été considérées pour ce faire : 1) *Generalized Extreme Value* (GEV); 2) Gumbel; et 3) log-normale. Ces distributions sont couramment utilisées pour la représentation des valeurs extrêmes de débits. Rappelons que la distribution Gumbel est

un cas particulier de la distribution GEV où le paramètre de forme est nul. La distribution GEV comporte trois paramètres (paramètres de position, d'échelle et de forme) alors que les distributions Gumbel et Log-normale en comptent deux (paramètres de position et d'échelle).

L'ajustement des paramètres des distributions pour chacun des sites a été réalisé en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance. La distribution offrant le meilleur ajustement aux séries de DMA observées a été retenue et les quantiles DMA de PdR 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans et les intervalles de confiance (95%) correspondants ont été estimés à partir de cette distribution. Ces quantiles estimés à partir des séries observées serviront de valeurs de référence pour l'ajustement de la MÉRA.

Le TC est un concept important en hydrologie bien que l'évaluation de sa valeur pour un BV donné reste difficile et montre que ce concept demeure, dans une certaine mesure, ambigu. Plusieurs définitions ont été proposées dont celle, la plus généralement utilisée, qui veut que le TC corresponde au temps entre le début de la pluie et le moment où tout le BV contribue au débit à l'exutoire ou, de façon équivalente, le temps pour que l'eau transite du point le plus en amont du bassin jusqu'à l'exutoire. Le TC peut donc être vu comme un temps 'caractéristique' de la réponse hydrologique d'un BV donné et c'est de cette façon qu'il faut l'interpréter dans le cadre de la MÉRA. Dans ce contexte, le TC est considéré comme une valeur intrinsèque du BV c'est-à-dire une valeur qui ne dépend que des caractéristiques physiographiques du BV.

Cette définition 'théorique' demande toutefois d'être 'opérationnalisée' c'est-à-dire que pour être utilisable dans un contexte pratique, elle puisse être estimée à partir de données mesurées tels que les hydrogrammes et les hyétogrammes. Plusieurs méthodes d'estimations et plusieurs paramètres ont été proposés dans la littérature pour estimer le TC (p. ex. durée entre le temps associé au centroïde, ou centre de masse, de la pluie effective et le centroïde de l'hydrogramme) mais aucune ne s'est réellement imposée puisqu'il n'existe pas de définition unique et universellement acceptée du TC.

Si la durée caractéristique de la réponse hydrologique d'un BV, que l'on assimile au TC, dépend des caractéristiques physiographiques de ce BV, elles sont également dépendantes de la distribution spatio-temporelle de la pluie, des conditions antérieures d'humidité, de la rétention sur le bassin et des stades végétatifs des plantes à l'échelle de chaque événement hydrologique. Dans ce cas, on voit que l'identification d'un TC unique pour un BV exige de lier cette valeur à une 'statistique' (moyenne, médiane ou autre) représentative du temps de réponse de ce BV. Dans le cas présent, comme on le verra la médiane des distributions des temps de montée (TM) des hydrogrammes d'un BV est utilisée pour estimer le TC à ce BV.

La méthode *Smoothed Minima Baseflow Separation* (SMBS), une méthode simple, automatique et éprouvée, a été retenue pour extraire les hydrogrammes des séries de débit. Cette méthode permet d'identifier le début de l'hydrogramme, i.e. le début du ruissellement et du temps de montée et la fin de l'hydrogramme où le débit revient au débit de base. Le TM est défini par la durée entre le début et le temps où survient le débit de pointe de l'hydrogramme. Quelques modifications ont été apportés à cette méthode et

chaque hydrogramme retenu a été l'objet d'un examen visuel afin de s'assurer que les temps de début et de fin des hydrogrammes retenus étaient réalistes. Ces hydrogrammes ont été classés en fonction de leur structure (hydrogramme avec un ou plusieurs débits de pointe) et seuls les hydrogrammes permettant une estimation du TC ont été retenus pour son estimation. Ainsi la médiane des TM des hydrogrammes associés aux débits les plus importants enregistrés a été retenue pour estimer le TC de chacun des 93 BV.

Les analyses suivantes ont cherché à lier ces valeurs de TC aux caractéristiques hydrographiques des BV. Plusieurs équations empiriques ont été proposées dans la littérature à cet effet. Les TM médians ont donc d'abord été comparés aux valeurs estimées à partir de 13 équations empiriques proposées dans la littérature. Aucune de ces équations ne permet une estimation adéquate du TM médian aux 93 BV sous étude. En ce qui concerne plus spécifiquement les équations FAA et Williams proposées dans le Manuel de conception des ponceaux (MCP), les résultats montrent qu'elles sous-estiment quasi-systématiquement, et parfois de façon importante, les TM médians aux BV. Il faut rappeler que ces équations ont été développées à partir de données de BV dont les caractéristiques physiographiques sont vraisemblablement très différentes des BV du Québec et qui se trouvent dans des régions climatiques aussi très différentes. La transposabilité de ces équations empiriques à d'autres BV, et notamment à ceux du Québec, est questionnable et peut s'avérer problématique comme les résultats de la présente étude le montrent.

Certaines de ces équations empiriques du TC ont été reprises et leurs paramètres ajustés pour reproduire au mieux les TM médians des BV sous étude. Cette analyse a permis de montrer que même après ajustement des paramètres afin de réduire au minimum les écarts entre TC estimés et observés aux BV sous étude, aucune ne donne de résultats satisfaisants et ne permet d'estimer adéquatement les TM médians des BV. Il convient de noter toutefois qu'aucune de ces équations n'a comme variable explicative la fraction de LMH qui serait le facteur dominant permettant d'expliquer les TC des BV sous étude.

Des régressions linéaires entre TM médians et les caractéristiques physiographiques dont la liste a été présentée plus haut a permis de montrer que la fraction de LMH est le principal facteur influençant la réponse hydrologique des BV à l'étude ($R^2 = 0.28$). Le rapport $L_C/\sqrt{S_C}$, qui s'apparente à un temps de propagation des écoulements le long du cours d'eau principal, se classe deuxième ($R^2 = 0.13$). Le pouvoir explicatif des autres caractéristiques diminue rapidement.

Ces résultats suggèrent donc que les BV avec une forte présence de LMH présentent des TM médians plus longs. Ceci n'exclut toutefois pas que certains BV avec peu de LMH ont des TM médians très longs et que, vice-versa, des BV avec beaucoup de LMH présentent des TC anormalement courts. Un constat similaire s'applique au rapport $L_C/\sqrt{S_C}$.

De fait, un examen plus minutieux confirme que, dans beaucoup de cas, la réponse hydrologique est conditionnée par diverses caractéristiques physiographiques spécifiques aux BV en question. Ceci montre la difficulté d'identifier un ou quelques facteurs physiographiques qui pourraient expliquer à eux seuls les TM pour l'ensemble des BV

sous étude. La diversité et l'hétérogénéité physiographique des BV (pente, milieux humides, occupation du territoire, etc.), représentatives des BV du Québec méridional, montrent qu'une multiplicité de facteurs peuvent jouer et conditionner plus ou moins le TC.

Ce même constat explique d'ailleurs pourquoi la superficie n'apparaît pas comme un facteur explicatif du TC. En effet aucune corrélation significative entre le TC et la superficie des BV n'est observée. Ce résultat peut sembler en contradiction avec plusieurs études et équations proposées dans la littérature. Deux éléments expliquent toutefois ce résultat : 1) les BV considérés dans les études rapportées couvrent des gammes de valeurs très larges (p. ex. de 1 km² à plusieurs milliers de km²); 2) les BV sont souvent très homogènes (p. ex. pente ou occupation du territoire très similaire d'un BV à l'autre). Ces conditions contribueront à faire de la superficie un facteur clef conditionnant le TC. Dans le cas présent les BV sont tous de moins de 100 km² et présentent une grande diversité de caractéristiques.

La méthode par arbre de classification ou par arbre de régression (*classification and regression trees*) a été utilisée pour identifier les facteurs clés à considérer pour l'estimation du TC. Ce type de méthode permet de construire un modèle de prédiction à partir de différents jeux de données et d'identifier les principales catégories ou caractéristiques physiographiques à considérer pour l'estimation des TC. Le résultat se présente sous la forme d'un arbre composée de plusieurs niveaux correspondant à différentes caractéristiques physiographiques. Une telle approche permet une classification systématique et hiérarchique des facteurs explicatifs clefs. Elle offre l'avantage d'être simple, tant dans sa mise en place, sa mise à jour et son utilisation.

L'application de l'approche par arbre de régression aux 93 BV sous étude résulte en un arbre (appelé arbre D-4) de deux niveaux (voir Figure 6.1). Le premier niveau est associé à la fraction de LMH et deux groupes sont définis (LMH ≥ 10% ou LMH < 10%). Le deuxième niveau est associé au rapport $L_C/\sqrt{S_C}$. où chaque groupe du premier niveau est subdivisé en deux groupes. Cet arbre comprend donc au final quatre groupes, désignés par G-1 (LMH < 10% et $L_C/\sqrt{S_C} < 21$ km), G-2 (LMH < 10% et $L_C/\sqrt{S_C} \geq 21$ km), G-3 (LMH ≥ 10% et $L_C/\sqrt{S_C} < 33$ km) et G-4 (LMH ≥ 10% et $L_C/\sqrt{S_C} \geq 33$ km). Le TC attribué à chacun de ces quatre groupes correspond au temps moyen des TM médians des BV appartenant à ces groupes soient respectivement 9 heures (G-1), 13 heures (G-2), 17 heures (G-3) et 28 heures (G-4).

Les groupes G-1 à groupe G-4 définissent des types de BV très différents. Le groupe G-1 correspond aux BV avec peu de LMH et un temps de parcours plus court, ces deux facteurs favorisant des TC courts. À l'autre bout du spectre, les BV du groupe G-4 comprennent beaucoup de LMH et les temps de parcours sont plus longs, résultant en des TC très longs. Les groupes G-2 et G-3 sont intermédiaires avec, pour le groupe G-2 peu de LMH mais de longs temps de parcours et, pour le groupe G-3 beaucoup de LMH mais des temps de parcours courts. Cette analyse sommaire confirme la plausibilité de l'arbre D-4 d'un point de vue hydrologique.

L'arbre D-4 est donc recommandé pour estimer les TC des BV du Québec méridional. L'utilisation de l'arbre D-4 pour l'estimation du TC à un BV donnée exige toutefois de s'assurer que ce BV ne se distingue pas de façon marquée des 93 BV utilisés pour construire l'arbre D-4. Ainsi il est recommandé de s'assurer que : 1) sa superficie est comprise entre 1 et 100 km²; 2) sa pente moyenne est inférieure à 25%; 3) son occupation urbaine est inférieure à 20%; 4) son pourcentage de LMH est inférieur à 30%. Ces prescriptions valent de façon plus générale pour l'application de la version proposée de la MÉRA.

Les valeurs de TC estimés à certains BV s'écartent de façon importante des valeurs estimés à partir de l'arbre D-4. Un examen minutieux de ces cas (Annexe L) confirme ce qui avait été avancé plus haut, à savoir que, dans la plupart de ces cas, la réponse hydrologique est conditionnée par certaines caractéristiques physiographiques particulières (p. ex. séparation du BV en deux sous-bassins près de l'exutoire avec des caractéristiques physiographiques très différentes) que l'arbre D-4 ne prend pas en compte. Plusieurs BV présentent par exemple des hydrogrammes de structure complexe caractérisés par plusieurs pointes de débits distincts, certains plus rapides associés à des parties plus urbaines ou agricoles du BV et d'autres à des parties dominées par les forêts.

L'arbre D-4 ne permet pas d'attribuer de TC plus petit que 9 heures. Or la MÉRA est fréquemment appliquée à des BV de moins de 1 km², voire 0.5 km², et dont la longueur du cours d'eau principal n'est que de quelques centaines de mètres (tout au plus un kilomètre). Dans de tels cas, il est raisonnable de se questionner sur la vraisemblance d'attribuer un TC de 9 heures pour ce type de BV. Très peu de petits BV font partie de l'échantillon des 93 BV sous étude et seulement trois ont une longueur de cours d'eau principal de moins de 2 km d'où a difficulté de fournir des recommandations spécifiques pour ce type de BV.

Considérant la nécessité de fournir des valeurs de TC pour les très petits BV, une équation développée dans le cadre d'un projet antérieur réalisé pour le compte du MAPAQ à partir de l'analyse des données de six parcelles agricoles du Québec méridional (0.03 et 0.11 km² et longueurs du cours d'eau principal entre 0.27 et 1.33 km) a été retenue (équation 8.1). Celle-ci utilise comme variable physiographique la longueur du cours d'eau principal (L_c). Son utilisation est recommandée pour les BV où $L_c < 2$ km. L'utilisateur doit toutefois être conscient que cette équation pourra conduire à des sous-estimations importantes des TC et donc à des surestimations des débits de conception et ce, en raison du caractère agricole des BV ayant servis à développer cette équation.

Révision de la procédure d'estimation des coefficients de ruissellement (CR)

La procédure d'estimation du coefficient de ruissellement (CR) a ensuite été mise à jour. Bien qu'il existe plusieurs interprétations possibles du CR selon la littérature, celle adoptée dans le cadre de la présente étude est dite probabiliste et consiste à dire qu'elle est définie par le rapport du débit de pointe spécifique et de l'intensité maximale de pluie de durée égale au temps de concentration (TC) du BV de même période de retour (PdR) tel que défini par l'équation de la MÉRA. On parle également dans ce cas de CR rationnel.

Le CR ainsi défini intègre à la fois les impacts hydrologiques de l'infiltration et de la rétention (réduction des volumes disponibles pour le ruissellement) et les impacts du laminage (apports distribués dans le temps).

Plusieurs valeurs de CR ont été proposées dans la littérature pour différents types de territoire et en fonction de différentes caractéristiques (végétation, pente et classification hydrologique). Ces valeurs semblent toutefois souvent subjectives et basées sur l'expertise de divers utilisateurs. Peu d'étude ont été réalisées où des valeurs de CR ont été proposées sur la base d'analyse de données observées. La revue de littérature a permis de montrer également toute la difficulté d'estimer des valeurs de CR ce qui explique sans doute pourquoi si peu d'étude y ont été consacrées. Par ailleurs, les études publiées sur le sujet sont souvent réalisées à partir d'un nombre restreint de BV présentant souvent des caractéristiques très homogènes. Les CR ainsi proposées ne permettent pas de fixer des valeurs représentatives de la grande diversité des occupations du territoire et des caractéristiques physiographiques. Dans ce contexte, il est tout-à-fait justifié d'estimer de nouvelles valeurs de CR mieux adapté aux conditions des BV du Québec méridional.

Le nombre de classe pour le milieu urbain et les valeurs associées de CR suggérées dans le Manuel de conception des ponceaux présentent un niveau de précision et de détail beaucoup élevé compte tenu des incertitudes importantes associées à ces valeurs. Ainsi trois classes sont proposés pour le milieu urbain : 1) faible densité (CR = 0.20); 2) moyenne densité (CR = 0.50); 3) densité élevée (CR = 0.90).

Les CR aux 93 BV sous étude associés aux DMA de PdR 10, 25, 50 et 100 ans ont été estimés à partir de l'équation suivante dérivée de l'équation de la MÉRA :

$$CR = 360 \frac{Q_T}{A I_T}$$

où A est la superficie du BV (ha), I_T est l'intensité de la pluie de durée TC et de PdR T donnée (mm/h) et Q_T est le débit maximal annuel (DMA) de PdR T (m^3/sec). L'estimation de ce CR repose sur l'utilisation du DMA estimés à partir des séries de débits observés et du TC estimés à partir de l'arbre D-4. L'intensité de pluie de durée égale au TC et de PdR T est ensuite estimés à partir de différents outils et courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) disponibles.

Trois constats importants découlent de l'examen des valeurs de CR obtenus : 1) les valeurs de CR augmentent avec la PdR; 2) la dispersion des valeurs de CR obtenus à partir des tables du MCP est beaucoup moins étendue que celle des valeurs estimées aux BV sous étude ; 3) certaines valeurs de CR sont supérieures à un (résultat déjà rapporté dans la littérature que certains auteurs attribuent à l'interprétation 'statistique' du CR).

La dépendance du CR en fonction de la PdR observée dans le cadre de cette étude est beaucoup moins marquée que ce qui est généralement rapporté dans la littérature, notamment pour les grandes PdR. Ainsi, par exemple, si les plages de valeurs des facteurs à appliquer aux CR en milieu naturel de PdR 10 ans pour estimer les CR de PdR 25, 50 et 100 ans proposées dans la littérature sont de 1.2-1.4 (25 ans), 1.4-1.7 (50 ans)

et 1.6-1.8 (100 ans), les valeurs correspondantes obtenus sont 1.11, 1.18 et 1.22. Ces valeurs suggèrent que les capacités d'infiltration, de rétention et de laminage des BV sous étude pour les pluies de PdR 10 ans ne sont pas très différentes pour les pluies plus extrêmes. Ce point n'a pas cependant pas été investigué davantage dans le cadre de cette étude. Considérant le CR de PdR 25 ans comme valeur de référence, les facteurs de correction recommandés pour estimer les CR de PdR 10, 50 et 100 ans sont 0.89, 1.07 et 1.12 respectivement.

Les valeurs de CR ainsi estimés (PdR 25 ans) ont ensuite été corrélées les diverses caractéristiques physiographiques présentées plus haut. Ces résultats montrent que la pente moyenne du BV (SB) est la caractéristique qui explique le mieux les CR aux BV avec un coefficient de détermination (R^2) de 0.40. Ainsi un BV de plus forte pente aura un CR plus élevé ce qui semble logique d'un point de vue hydrologique. Deux autres caractéristiques se démarquent également avec des R^2 plus élevées à savoir la pente du cours d'eau principal (S_c) et l'occupation forestière. Ces deux variables sont toutefois assez fortement corrélées avec la pente du BV. Ainsi un BV avec de fortes pentes sera plus souvent forestier et aura une pente du cours d'eau principal plus élevée. Ces corrélations expliquent sans doute le résultat apparemment contre-intuitif selon lequel le CR des BV plus forestiers seraient plus élevé.

Trois approches sont proposées afin d'estimer les valeurs de CR : 1) la première ne considère que la pente du BV comme variable physiographique et utilise une équation de régression (approche S-1); 2) la seconde propose une table similaire à celle du MCP où les valeurs de CR dépendent de la pente du BV et de l'occupation du territoire (agricole et forestier) et de la présence de milieux urbains et des LMH (approche S-2); 3) la troisième reprend la seconde mais considère également les groupes hydrologiques des sols (approche S-3).

Les équations de régression 7.2 à 7.5 sont utilisées pour l'estimation des CR selon l'approche S-1, chaque équation correspondant à une PdR différentes (10, 25, 50 et 100 ans). Les Tableaux 7.8 et 7.10 présentent les tables à utiliser pour estimer les valeurs de CR selon les approches S-2 et S-3 respectivement. A noter que dans ces deux derniers cas, les facteurs de correction présentés précédemment pour estimer les CR de PdR 10, 50 et 100 ans, 0.89, 1.07 et 1.12 respectivement, sont recommandés.

Les CR calculés à partir des tables du MCP ont été comparés aux CR estimés aux 93 BV sous étude (PdR 25 ans et TC estimés à l'aide de l'arbre D-4). Ces résultats montrent d'abord que la fourchette de valeurs obtenues en utilisant la table du MCP est très restreinte par rapport à la dispersion des CR aux BV. Ainsi si les CR estimés varient de 0.1 à près de 1.4, les CR obtenus en appliquant la table du MCP conduit à des valeurs comprises entre 0.2 et 0.6. Ainsi les faibles CR seraient surestimés par les CR du MCP et sous-estimés pour les CR plus élevés.

Chacune des approches proposées présentes des avantages et des inconvénients. L'approche S-1 présente l'avantage d'être plus simple et rapide à mettre en place puisqu'elle ne nécessite que la détermination de la pente du BV. Son principal désavantage est qu'elle ne tient compte que de la pente du BV et dès lors n'offre aucune

flexibilité (p. ex. deux BV de même pente mais présentant des occupations du territoire très différentes se verront attribuer le même CR).

L'approche S-2 présente l'avantage d'intégrer l'occupation du territoire (ce qui peut être plus satisfaisant d'un point de vue hydrologique) et est plus simple que l'approche S-3 qui intègre les groupes hydrologiques.

L'approche S-3 tient compte des types de sols et permet d'attribuer des CR à des BV dont les types de sols sont sensiblement différents (p. ex. BV avec des argiles et des limons versus un BV caractérisé par la présence de loams et de loams sableux).

Il est important de souligner que pour les deux dernières approches (S-2 et S-3), plusieurs classes des tables de CR proposées sont sous-représentées dans l'échantillon des 93 BV sous étude. Les valeurs proposées demeurent donc dans une certaine mesure fondée sur une appréciation incomplète, bien qu'hydrologiquement fondée, de leur impact réel sur les débits de crue.

Quatre versions de la MÉRA ont été considérées et appliquées aux 93 BV sous étude et les débits de conception ainsi estimés comparés aux DMA estimés à partir des séries de débits mesurés : 1) la version Williams-MTQ utilise les TC estimés à partir de l'équation de Williams et la procédure du Manuel de conception des ponceaux (MCP); 2) la version D-4/S-1 utilise l'arbre D-4 pour estimer les TC et l'approche S-1 pour calculer les CR; 3) la version D-4/S-2 utilise l'arbre D-4 pour estimer les TC et l'approche S-2 pour calculer les CR; 4) la version D-4/S-3 utilise l'arbre D-4 pour l'estimation du TC et l'approche S-3 pour estimer les CR. Ces différentes versions de la MÉRA seront désignées par Williams-MTQ, D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3.

Les versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3 conduisent à une amélioration appréciable des estimations des DMA par rapport à la version Williams-MTQ. La version Williams-MTQ tend en effet à surestimer les plus faibles débits ($\text{DMA} < 50 \text{ m}^3/\text{sec}$), parfois de façon importante, et à surestimer les débits plus importants ($\text{DMA} > 150 \text{ m}^3/\text{sec}$) pour cinq BV sur six. Les surestimations s'expliquent en partie par la sous-estimation des TC par l'équation de Williams qui entraîne une surestimation des débits.

Les performances des versions D-4/S-1, D-4/S-2 et D-4/S-3 sont très similaires et se dégradent légèrement lorsque la PdR augmente. Seulement trois des 30 BV de moins de 25 km^2 ont des débits de conception 25 ans estimés par la MÉRA (version D-4/S-2) inférieurs à la borne inférieure de l'intervalle 95% des DMA estimés à partir des débits mesurés, suggérant une sous-estimation significative dans ces cas. Pour les BV de 25 km^2 à 100 km^2 , six des 63 BV présentent des débits de conception 25 ans MÉRA (version D-4/S-2) inférieurs au DMA estimés à partir des débits mesurés.

Mise en place d'un modèle hydrologique et simulations des conditions hydrologiques en climat actuel et futur

La mise en place d'un modèle hydrologique visait deux objectifs spécifiques : 1) permettre la simulation de longue série de débit afin d'améliorer l'estimation des quantiles de débits extrêmes considérant que les séries de précipitations disponibles sont souvent beaucoup

plus longues que les séries de débits; 2) développer des projections futures sur l'évolution des DMA en climat futur.

Ces travaux ont d'abord permis de mettre en lumière les énormes défis que représentent la modélisation hydrologique des BV de moins de 200 km². Ces défis sont essentiellement de deux ordres. D'abord peu de modèles ont été appliqués à des BV de moins de 200 km² et ensuite peu de données de précipitations et de températures sous-journalières nécessaires au calage et à l'utilisation de ces modèles sont disponibles.

Le modèle GRH5 a été retenu. Ce modèle simple ne comporte que cinq paramètres de calage et simule à un pas de temps horaire. Le module CemaNeige a été intégré au modèle GR5H pour simuler les conditions hydrologiques hivernales. Ce modèle a été mis en place sur six BV (Des Aulnaies 051004; Des Eaux Volées 051002; Des Eaux Volées 051003; Rivière Chevrotière 062002; Ruisseau Rouge 062002; Rivière Montmorency 051005) situés au Québec de superficies allant de 1.6 à 264.6 km². Ces BV sont principalement forestier (un seul BV a une occupation agricole importante) et compte de 0 à 8% de lacs et milieux humides. Le nombre d'années de données disponibles pour le calage du modèle hydrologique varie de 10 à 18 ans selon les BV.

Le calage du modèle hydrologique a permis de mettre en lumière de nombreuses incohérences entre les précipitations et les débits mesurés (p. ex. précipitations importantes sans augmentations des débits ou augmentations notables des débits sans précipitations) et de procéder à un contrôle de qualité rigoureux de ces données. Ce travail a également montré l'importance de procéder à un contrôle de qualité rigoureux, certes fastidieux mais essentiel, des données disponibles avant de procéder au calage du modèle hydrologique.

Le critère Nash-Sutcliffe (NSE) a été retenu pour évaluer la performance du modèle. Après calage, il a été conclu que le modèle GR5H simule de façon réaliste les débits observés avec des NSE annuels variant entre 0.69 et 0.77 pour les six BV. La performance du modèle en période estivale (1er juin au 31 octobre) est supérieure à la performance annuelle sauf pour l'un des BV (Rivière Montmorency). La performance du modèle est cependant très variable d'une année à l'autre et souvent plus mauvaise les années de faible hydraulicité.

Ces résultats ont mis en lumière, l'importance de disposer de données météorologiques locales de bonne qualité pour la modélisation hydrologique pour des BV de petites dimensions. L'utilisation de données météorologiques de mauvaises qualités ou donnant une représentation incomplète de la réalité sur le BV (p. ex. provenant d'une station plus éloignée du BV) mine de façon marquée la performance du modèle.

L'investigation des impacts hydrologiques potentiels des CC sur les DMA du BV du ruisseau Rouge a été réalisée en utilisant le grand ensemble du *Canadian Regional Climate Model* (CRCM5-LE) composé de 50 simulations climatiques sur la période 1954 à 2099 considérant le RCP 8.5 (point de grille de résolution spatiale de 12 km x 12 km). Les séries de précipitations horaires et de températures simulées ont été extraites au point de grille couvrant le BV du ruisseau Rouge.

Les DMA estimés à partir des débits simulés sont en assez bon accord avec les valeurs correspondantes estimées à partir des séries de débits mesurés pour les PdR de 5 ans et moins alors que les DMA simulés tendent à surestimer les DMA mesurés pour les PdR 10 et 25 ans, cette surestimation s'accroissant avec la PdR.

Une comparaison des précipitations et températures simulées par le modèle climatique aux valeurs observées révèle toutefois l'existence de biais parfois importants dans les valeurs simulées (résultat maintes fois rapporté dans la littérature). Ces biais doivent être toutefois 'corrigés' avant de pouvoir utiliser les séries climatiques simulées pour la modélisation des conditions hydrologiques futures.

L'application de méthodes de correction de biais *à priori* adaptées à la problématique présente n'a pas permis d'obtenir de résultats concluants. Ce faisant les simulations hydrologiques en climat futur sont trop incertaines pour être exploitables ou d'une quelconque utilité pour le développement de projections futures. Des analyses complémentaires devront être conduites pour valider ces résultats et consolider les approches utilisées.

Majorations des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et prise en compte des CC

La dernière partie du projet visait à mettre à jour les recommandations précédemment formulées sur les majorations à appliquer aux courbes IDF actuelles afin de tenir compte de l'impact des CC sur les pluies extrêmes. Une révision de ces recommandations s'imposait considérant les avancées très importantes en matière de modélisation climatique.

L'approche retenue a consisté à procéder à une revue de littérature des travaux les plus récents sur le sujet. Elle reprend l'approche utilisée dans le cadre des travaux ayant conduit aux recommandations formulées dans Mailhot *et al.* (2014). La revue de littérature s'est intéressée aux études couvrant en tout ou en partie l'est du Canada.

Si l'augmentation des pluies extrêmes en climat futur est jugée très probable, l'ampleur des changements escomptés reste pour une bonne part incertaine. L'idée de recenser les principales études sur le sujet visent deux objectifs : 1) vérifier la cohérence des projections obtenues de différents modèles et selon différentes approches ; 2) combiner ces résultats afin de proposer des majorations qui s'appuient sur les connaissances les plus récentes. Ainsi, même s'il subsiste toujours une part importante d'incertitudes quant au devenir des précipitations extrêmes, les majorations proposées sont les plus vraisemblables actuellement et celles qui permettront une conception d'ouvrages qui minimiseront les risques posés par les CC. Des recommandations similaires ont été formulées à la Communauté Urbaine de Québec et à la ville de Québec dans le cadre d'un projet visant à mettre à jour leurs courbes IDF.

Six groupes de projections climatiques relatifs aux extrêmes de précipitations ont été analysés et comparés. Trois sont basés sur l'utilisation de modèle régionaux du climat, deux sur l'utilisation de modèles globaux du climat et enfin un qui utilise une relation entre les variations des pluies extrêmes et les variations de températures.

Les résultats issus de la comparaison de ces différentes études a permis de mettre en lumière les importantes différences entre les valeurs proposées par ces sources. Malgré ces différences, toutes indiquent que les précipitations extrêmes augmenteront de façon progressive au cours du siècle à venir. Ces augmentations seront d'autant plus importantes pour les concentrations de gaz à effet (GES) présents dans l'atmosphère seront élevés.

Les majorations ont été établies sur la base de l'analyse et de la synthèse des études consultées. Les majorations proposées s'appuient donc sur les connaissances actuelles les plus à jour.

Les majorations recommandées à appliquer aux courbes IDF actuelles (période de référence 1990-2020) sont fonctions de la période future considérée (2020-2040, 2040-2060, 2060-2080, 2080-2100), de la durée (1, 2, 6, 12, 24, 48, 72 heures) et du scénario d'évolution future des GES (RCP 4.5 : scénario modéré RCP 8.5 : scénario pessimiste). À titre d'exemple, dépendant de la période future considérée, elles s'échelonnent de 7 à 21% pour les MAP 24 heures selon le RCP 4.5 et de 8.5 à 48.5% pour le RCP 8.5.

Un scénario 'intermédiaire', qui correspond approximativement à une hausse des températures estivales de l'ordre de 3.0 à 3.5°C à l'horizon 2080, a également été considéré, considérant que les majorations associées au RCP 8.5 (scénario pessimiste) et 4.5 (scénario modéré) sont très différentes. Les majorations pour ce scénario à l'horizon 2040-2050 sont de l'ordre de 12.5 à 25.5% selon la durée et augmentent de façon marquée pour les horizons 2060-2080 et 2080-2100.

Le choix du RCP à retenir dans un cas spécifique d'application dépend de l'appréciation du niveau de risque et d'optimisme face à la réponse de nos sociétés devant le défi climatique. À terme, les majorations associées au RCP 8.5 aux horizons 2070 et 2090 sont très élevées et possiblement très coûteuses à mettre en place (40% en moyenne à l'horizon 2070 et 60% à l'horizon 2090) alors que les majorations associées au RCP 4.5 demeurent élevées mais encore réalistes d'un point de vue opérationnel (21% en moyenne à l'horizon 2070 et 26% à l'horizon 2090).

Le choix de la majoration effective à appliquer dans un cas spécifique demandera de préciser : 1) la durée de vie utile de l'ouvrage (horizon future à considérer); 2) la durée des MAP (p. ex. temps de concentration du BV); 3) le RCP retenu (appréciation du niveau de risque et application du principe de précaution).

Il faut se rappeler que les incertitudes sur les majorations proposées demeurent très importantes. Elles intègrent celles associées à l'évolution future des concentrations de GES (scénarios RCP), aux modèles climatiques et à la variabilité naturelle du climat (lié au caractère chaotique du climat). Ces incertitudes augmentent avec l'horizon future considéré.

Les majorations proposées doivent être vues et utilisées comme des valeurs 'guides' pour la prise en compte de l'impact des CC lors de la conception d'ouvrages dont la durée de vie utile s'échelonnent sur les décennies à venir. L'utilisateur doit être conscient des incertitudes associées à ces valeurs et devra faire preuve de jugement et de discernement

face à une application particulière pour adapter ces valeurs en fonction du contexte d'application et des éléments de risque et de vulnérabilité en présence.

Bibliographie

Asadieh B., Krakauer N.Y. (2015). Global trends in extreme precipitation: climate models versus observations, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19: 877–891. DOI: 10.5194/hess-19-877-2015.

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.

Asong, Z.E., Khaliq, M.N., Wheeler, H.S. (2016). Multisite multivariate modeling of daily precipitation and temperature in the Canadian Prairie Province using generalized linear models. *Clim. Dyn.* 47(9-10), DOI: 10.1007/s00382-016-3004-z

Breiman, L., Friedman, J.H., Olshen, R.A., Stone, C.J. (1984). Classification and Regression Trees. Chapman & Hall, Boca Raton, FL, 368 p.

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

Burnham, K.P., Anderson, D.R. (2010). Model Selection And Multimodel Inference - A practical Information-Theoretic Approach, 2nd Edition, Springer, 388 p.

Bush E., Lemmen D.S. (2019). Rapport sur le climat changeant du Canada, Gouvernement du Canada, Ottawa, Ontario, 446 p.

Cannon A.J., Innocenti S. (2019). Projected intensification of sub-daily and daily rainfall extremes in convection-permitting climate model simulations over North America: implications for future intensity-duration-frequency curves, *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19(2): 421-440. DOI: 10.5194/nhess-19-421-2019.

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). Applied hydrology. McGraw-Hill, New York, 572 p.

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] Consulté en novembre 2020 : www.techmrt.ttu.edu/reports.php

Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values, Springer Series in Statistic, Springer, 208 p.

Coxon, G., J. Freer, I. K. Westerberg, T. Wagener, R. Woods et P. J. Smith (2015). A novel framework for discharge uncertainty quantification applied to 500 UK gauging stations, *Water Resour. Res.*, 51, 5531–5546, DOI:10.1002/2014WR016532.

CSA (2019). Technical Guide - Development, interpretation, and use of rainfall intensity-duration-frequency (IDF) information: Guideline for Canadian water resources practitioners. Canadian Standard Association, Mississauga Ontario, 126 p.

Dhakal, N., Fang, X., Asquith, W.H., Cleveland, T.G., Thompson, D.B. (2013a). 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., Asquith, W.H., Cleveland, T.G., Thompson, D.B. (2013b). Return period adjustment for runoff coefficients based on analysis in undeveloped Texas watersheds. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 139(6), 476-482. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000571.

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.

Dingman, S.L. (2008). Physical hydrology. Second Edition, University of New Hampshire, Waveland press Inc., Long Grove, Illinois, 646 p.

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

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

Efstratiadis, A., Koussis, A.D., Koutsoyiannis, D., Mamassis, N. (2014). Flood design recipes vs. reality: Can predictions for ungauged basins be trusted? *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14(6), 1417-1428, doi: 10.5194/nhess-14-1417-2014.

Espey, W.H.Jr., Morgan, C.W., Masch, F.D. (1966). A study of some effects of urbanization on storm runoff from a small watershed. Texas water development board, Report 23, Texas University, 110 p.

FAA (1970). Airport drainage. AC 150/5320-5B, Department of transportation, United-States federal aviation administration, Washington, D.C., 80 p.

Fenicia, F., Savenije, H.,H.,G., Matgen, P., Pfister, L. (2006). Is the groundwater reservoir linear? Learning from data in hydrological modelling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10(1), 139-150.

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.

Gericke O.J., Smithers J.C. (2017). Direct estimation of catchment response time parameters in medium to large catchments using observed streamflow data. *Hydrol. Process.*, 31(5), 1125-1143, DOI: 10.1002/hyp.11102.

Gericke O.J., Smithers J.C. (2016a). Derivation and verification of empirical catchment response time equations for medium to large catchments in South Africa. *Hydrol. Proces.*, 30(23), 4384-4404. DOI: 10.1002/hyp.10922.

Gericke O.J., Smithers J.C. (2016b). Are estimates of catchment response time inconsistent as used in current flood hydrology practice in South Africa? *J. South African Intitution of Civil Engineering*, 58(1), 2-15. DOI: 10.17159/2309-8775/2016/v58n1a1.

Gericke O.J., Smithers J.C. (2014). Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. *Hydrolog. Sci. J.*, 59(11), 1935-1971. DOI: 10.1080/02626667.2013.866712.

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] Consulté en novembre 2020 : <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.

Grimaldi S., Petroselli A., Tauro F., Porfiri M. (2012). Time of concentration: a paradox in modern hydrology. *Hydrol. Sci. J.*, 57(2), 217-228. DOI: 10.1080/02626667.2011.644244.

Hingray, B., Picouet, C., Musy, A. (2009). Hydrologie: 2 Une science pour l'ingénieur. Presses polytechniques et universitaires romandes, Science & Ingénierie de l'environnement, 600 p.

Hoang, V. D. (1979), Étude du coefficient de ruissellement sur des petits bassins versants des régions de l'Estrie et des Bois-francs. Service de l'hydrométrie, Gouvernement du Québec, Ministère des Richesses naturelles, Directions générales des eaux, H.P.-49, REP-64-80, 10 p.

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., McCallum, B.E. (1995). Peak Discharge for small agricultural watersheds. *J. Hydraul. Eng.-ASCE*, 121(1), 36-48.

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.

Huber, W.C. (1987). Discussion of "Estimating urban time of concentration" by R.H. McCuen *et al.*, 1984, *J. Hydraul. Eng.*, 113(1), 122-124.

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.

Innocenti S., Mailhot A., Frigon A., Cannon A.J., Leduc M. (2019b). Observed and Simulated Precipitation over Northeastern North America: How Do Daily and Subdaily Extremes Scale in Space and Time? *J. Climate* 32(24):8563-8582. DOI: 10.1175/jcli-d-19-0021.1.

Institute of hydrology (1980). Low flow studies, Report No 1. Research report, Crowmarsh Gifford, Wallingford, Oxon, 42 p.

IPCC (2014). Changements climatiques 2014 : Incidences, adaptation et vulnérabilité – Résumé à l'intention des décideurs. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Organisation météorologique mondiale, Genève (Suisse), 34 pages.

Kay J.E., Deser C., Phillips A., Mai A., Hannay C., Strand G., Arblaster J.M., Bates S.C., Danabasoglu G., Edwards J., Holland M., Kushner P., Lamarque J.F., Lawrence D., Lindsay K., Middleton A., Munoz E., Neale R., Oleson K., Polvani L., Vertenstein M. (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.

Kirpich Z.P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Eng.*, 10(6), 362, DOI: 10.1155/2013/214140.

Kjeldsen T.R., Kim H., Jang C.H., Lee H. (2016). Evidence and Implications of Nonlinear Flood Response in a Small Mountainous Watershed. *J. Hydrol. Eng.*, 21(8), 04016024, DOI: 10.1061/(asce)he.1943-5584.0001343.

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.

Kunkel, K.E. (2003). North American trends in extreme precipitation, *Natural Hazards*, 29(2): 291-305. DOI: 10.1023/a:1023694115864.

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, C., Zwiers F., Zhang X., Li G. (2019): How much information is required to well constrain local estimates of future precipitation extremes?, *Earth's Future*, 7(1):11-24. DOI:10.1029/2018EF001001.

Liu C.H., Ikeda K., Rasmussen R., Barlage M., Newman A.J., Prein A.F., Chen F., Chen L., Clark M., Dai A.G., Dudhia J., Eidhammer T., Gochis D., Gutmann E., Kurkute S., Li Y.P., Thompson G., Yates D. (2017). Continental-scale convection-permitting modeling of the current and future climate of North America. *Clim. Dynam.*, 49(1-2):71-95. DOI: 10.1007/s00382-016-3327-9.

Loh, W.-Y. (2011). Classification and regression trees. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, 1, 14-23, DOI: 10.1002/widm.8.

Madramootoo, C. A. (1989). Some observations of the rational method for peak flow prediction on flat rural watersheds in Quebec. *Can. Water Resour. J.*, 15(1), 5-11.

Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G., Vaittinada Ayar, P. (2020a). 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., Talbot G., Bolduc S. (2020b). Analyse des pluies extrêmes pour la région de Québec et de leur évolution en climat futur. Rapport final, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, novembre 2020, 267 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. (2018a). 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. Lien : <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1220191.pdf>.

Mailhot A., Talbot G., Bolduc S. (2018b). Évolution des régimes de précipitations en climat futur pour la région de Montréal. Travaux réalisés pour le compte de la ville de Montréal. Rapport de recherche No AM03-2018, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, septembre 2018, 105 p.

Mailhot, A., Bolduc, S. Guillou, 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.

Mailhot A., Talbot G., Panthou G. (2014). Recommandations sur les majorations à considérer pour les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) aux horizons 2040-2070 et 2070-2100 pour l'ensemble du Québec - PHASE II. Rapport de recherche No R1515. Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau. Terre et Environnement. Québec. 28 p.

- Martel J.-L., Mailhot A., Brissette F. (2020). Global and Regional Projected Changes in 100-yr Subdaily, Daily, and Multiday Precipitation Extremes Estimated from Three Large Ensembles of Climate Simulations, *J. Climate* 33(3): 1089-1103. DOI: 10.1175/jcli-d-18-0764.1.
- Martinkova M., Kysely J. (2020). Overview of Observed Clausius-Clapeyron Scaling of Extreme Precipitation in Midlatitudes, *Atmosphere* 11, 786. DOI:10.3390/atmos11080786.
- 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.
- Maraun D., Wetterhall F., Ireson A.M., Chandler R.E., Kendon E.J., Widmann M., Brienen S., Rust H.W., Sauter T., Themessl M., Venema V.K.C., Chun K.P., Goodess C.M., Jones R.G., Onof C., Vrac M., Thiele-Eich I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Rev. Geophys.*, 48, RG3003. DOI:10.1029/2009RG000314
- McCuen R.H. (2009). Uncertainty analyses of watershed time parameters. *J. Hydrol. Eng.*, 14(5), 490-498. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000011.
- McCuen R.H., Wong S.L., Rawls W.J. (1984). Estimating urban time of concentration. *J. Hydraul. Eng.-ASCE*, 110(7), 887-904.
- 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).
- McMillan, H., J. Seibert, A. Petersen- Overleir, M. Lang, P. White, T. Snelder, K. Rutherford, T. Krueger, R. Mason et J. Kiang (2017). How uncertainty analysis of streamflow data can reduce costs and promote robust decisions in water management applications, *Water Resour. Res.*, 53, 5220–5228. DOI : 10.1002/2016wr020328
- 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.
- Mendoza J.G.G. (2013). Lag time characteristic of small arid and semiarid watersheds in the southwestern United States. Department of agricultural and biosystems engineering, University of Arizona, 241 p. Lien: <http://arizona.openrepository.com/arizona/handle/10150/311345>.
- Meylan, P., Favre, A.-C., Musy, A. (2008). Hydrologie fréquentielle – Une science prédictive, Collection Science et ingénierie de l'environnement, Presses polytechniques et universitaires romandes, 174 p.

Michailidi E. M., Antoniadis S., Koukouvinos A., Bacchi B., Efstratiadis A. (2018). Timing the time of concentration: shedding light on a paradox. *Hydrol. Sc. J.*, 63(5), 721-740. DOI: 10.1080/02626667.2018.1450985.

Michaud, A.R., Rocha Medrano, N.-R., Lagacé, R., Drouin, A. (2014). Développement et validation de méthodes de prédiction du ruissellement et des débits de pointe en support à l'aménagement hydro-agricole. Rapport final. Projet réalisé dans le cadre du Programme canadien d'adaptation agricole (PCAA) en collaboration avec le Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Québec, Canada, 142 pp.

Mulvany, T. J. (1851). On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. *Proc. Institution of Civil Engineers of Ireland*, 4(2), 18–33.

Nathan, R.J., McMahon, T.A. (1990). Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses. *Wat. Resour. Res.*, 26(7), 1465-1473. DOI: 10.1029/WR026i007p01465.

NERC (1975). Flood studies report. London: Natural Environment Research Council, Volume 1 et 4.

Ouranos (2014). Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. Partie 1 : Évolution climatique au Québec. Édition 2014. Montréal, Québec : Ouranos, 79 p.

Pierre A., Jutras S., Smith C., Kochendorfer J., Fortin V., Anctil F. (2019). Evaluation of Catch Efficiency Transfer Functions for Unshielded and Single-Alter-Shielded Solid Precipitation Measurements, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 36(5): 865–881. DOI :10.1175/JTECHD-18-0112.1

Piggottt, A.R., Moin, S., Southam, C. (2005). A revised approach to the UKIH method for the calculation of baseflow. *Hydrolog. Sci. J.*, 50(5), 911-920, DOI: 10.1623/hysj.2005.50.5.911.

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

Plamondon, A.P., Jutras, S. (2020). Fonctions hydrologiques des milieux humides boisés en relation avec l'aménagement forestier. Laboratoire d'hydrologie forestière, Université Laval, Ministère de l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques et Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, 115 p.

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

Rao R.A., Delleur J.W. (1974). Instantaneous unit hydrographs, peak discharges and time lags in urban basins. *Hydrol. Sc. Bull.*, 19(2), 185-198. DOI: 10.1080/02626667409493898.

Rasmussen K.L., Prein A.F., Rasmussen R.M., Ikeda K., Liu C (2020). Changes in the convective population and thermodynamic environments in convection-permitting regional climate simulations over the United States, *Clim. Dynam.* 55:383–408 DOI: 10.1007/s00382-017-4000-7, 2017.

Réméniéras, G. (1986). L'hydrologie de l'ingénieur. Collection de la direction des études et recherches d'électricité de France, 2^e édition revue et augmentée, Éditions Eyrolles, 61, Bd saint-Germain, Paris 5^e, 460 p.

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.

Sandink D., Simonovic S.P., Schardong A., Srivastav R. (2016). A Decision Support System for Updating and Incorporating Climate Change Impacts into Rainfall Intensity-Duration-Frequency Curves: Review of the Stakeholder Involvement Process, *Environmental Modelling & Software Journal*, 84:193-209. DOI: 10.1016/j.envsoft.2016.06.012.

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, John Wiley & Sons, Inc., Toronto, 356 p.

Schwab, G. O. (1957). Elementary soil and water engineering. John Wiley & Sons, New York, 292 p.

Šeparović, L, Alexandru, A, Laprise, R, Martynov, A, Sushama, L, Winger, K, Tete, K, Valin, M. (2013). Present climate and climate change over North America as simulated by the fifth-generation Canadian regional climate model (CRCM5). *Clim Dynam.*, 41(11– 12), 3167–3201, DOI: 10.1007/s00382-013-1737-5.

Shephard M.W., Mekis E., Morris R.J., Feng Y., Zhang X., Kilcup K., Fleetwood R. (2014). Trends in Canadian Short-Duration Extreme Rainfall: Including an Intensity-Duration-Frequency Perspective, *Atmosphere-Ocean* 52(5): 398-417. DOI: 10.1080/07055900.2014.969677.

Sheridan J.M. (1994). Hydrograph time parameters for flatland watershed. *Transactions of the ASCE*, 37(1), 103-113.

Sillmann J., Kharin V.V., Zwiers F.W., Zhang X., Bronaugh D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *J. Geophys. Res.: Atm.*, 118(6):2473-2493. DOI: 10.1002/jgrd.50188.

Simonovic S.P., Schardong A., Sandink D., Srivastav R. (2016). A Web-based Tool for the Development of Intensity Duration Frequency Curves under Changing Climate,

Singh, V.P. (1997). Effect of spatial and temporal variability in rainfall and watershed characteristics on stream flow hydrograph. *Hydrol. Process.*, 11(12), 1649-1669, DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(19971015)11:12<1649::AID-HYP495>3.0.CO;2-1.

Singh, V.P. (1988). *Hydrologic systems: Volume 1, Rainfall-runoff modeling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 480 p.

Singh, V.P. (1984). *Mathematical models for ungagged watersheds with potential for quantifying the effect of land use changes on streamflow*. Technical completion report, Louisiana Water Resources Research Institute. Louisiana State University. Baton Rouge. LA 70803. 143 p.

Snyder, F.F. (1938). Synthetic units hydrographs. *Transactions of the American Geophysical Union*, 19, 447-454.

Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design, *B. Am. Meteorol. Soc.*, 93, 485–498. DOI:10.1175/bams-d-11-00094.1.

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

Vaittinada Ayar P., Vrac M., Mailhot A. (2020). Ensemble bias correction of climate simulations: preserving internal variability, *manuscrit soumis à Scientific Reports*.

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.

Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Dynam.*, 109(1-2), 5-31, DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.

Viessman, W., Lewis, G. L. (2003). *Introduction to hydrology*. 5th Ed., Pearson Education, Upper Saddle River, NJ.

Villarini, G., Smith, J.A. (2010). Flood peak distributions for the eastern United States. *Water Resour. Res.*, 46, W06504, doi:10.1029/2009WR008395.

Watt, W.E., Chow, K.C.A. (1985). A general expression for basin lag time. *Can. J. Civ. Eng.*, 12(2), 294-300, DOI: 10.1139/l85-031.

Westra S., Fowler H.J., Evans J.P., Alexander L.V., Berg P., Johnson F., Kendon E.J., Lenderink G., Roberts N.M. (2014). Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall, *Reviews of Geophysics* 52: 522-555. DOI:10.1002/2014RG000464

Williams, G. B. (1922). Flood discharge and the dimensions of spillways in India. *The Engineer*, Sept. 29, 321-322.

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.

Young, C. B., McEnroe, B. M., Rome, A. C. (2009). Empirical determination of rational method runoff coefficient. *J. Hydrol. Eng.*, 14(12), 1283-1289, DOI : 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000114.

