

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 (CC06.1)

PAR
Alain MAILHOT
Samuel BOLDUC
Guillaume TALBOT

RAPPORT FINAL

MARS 2018

*Transports,
Mobilité durable
et Électrification
des transports*

Québec 


Fondsvert

Table des matières

LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XVII
SOMMAIRE EXÉCUTIF	XIX
CHAPITRE 1. INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2. BASSINS-VERSANTS À L'ÉTUDE	3
2.1 BASSINS-VERSANTS : LOCALISATION ET PROVENANCE DES DONNÉES DE DÉBIT	3
2.2 BASSINS-VERSANTS : CARACTÉRISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES	5
2.3 BASSINS-VERSANTS : OCCUPATION DU TERRITOIRE	11
CHAPITRE 3. DONNÉES DE DÉBIT ET DE PRÉCIPITATION	15
3.1 TRAITEMENT DES DONNÉES DE DÉBIT	15
3.2 EXTRACTION DES SÉRIES DES MAXIMA ANNUELS ET ANALYSE DE TENDANCES	15
3.3 ESTIMATIONS DES QUANTILES DE DÉBITS POUR DIVERSES PÉRIODES DE RETOUR	16
3.4 STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET DONNÉES DE PRÉCIPITATION	17
CHAPITRE 4. MÉTHODE RATIONNELLE : ORIGINES ET HYPOTHÈSES	19
4.1 LA MÉTHODE RATIONNELLE, 125 ANS PLUS TARD	19
4.2 HYPOTHÈSES DE BASE DE LA MÉTHODE RATIONNELLE	21
CHAPITRE 5. SUPERFICIE DES BASSINS-VERSANTS	23
5.1 APPLICATION DE LA MÉTHODE RATIONNELLE	23
5.2 ESTIMATION DE LA SUPERFICIE DES BASSINS-VERSANTS	25
5.3 RECOMMANDATIONS	28

CHAPITRE 6. TEMPS DE CONCENTRATION	29
6.1 ÉQUATION DE LA <i>FEDERAL AIRPORT ASSOCIATION</i> (FAA).....	30
6.2 ÉQUATION DE KIRPICH.....	36
6.3 ÉQUATION DE WILLIAMS	37
6.4 ÉQUATION DU MTQ.....	37
6.5 SÉLECTION DES ÉQUATIONS EMPIRIQUES	38
6.6 COMPARAISON DES ÉQUATIONS EMPIRIQUES DU TEMPS DE CONCENTRATION	39
6.7 RECOMMANDATIONS	43
CHAPITRE 7. COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT	45
7.1 CLASSIFICATION HYDROLOGIQUE DES SOLS.....	45
7.1.1 <i>Cartes pédologiques</i>	46
7.1.2 <i>Cartes des dépôts de surface</i>	53
7.1.3 <i>Mise à jour de la classification hydrologique des dépôts de surface</i>	54
7.1.3.1 Procédure de mise à jour des dépôts de surface.....	56
7.1.3.2 Épaisseur des dépôts de surface	60
7.1.4 <i>Cartes pédologiques versus cartes de dépôts de surface</i>	60
7.2 PENTE MOYENNE DES BASSINS-VERSANTS	61
7.3 OCCUPATION DU TERRITOIRE	64
7.4 COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT EN MILIEU URBAIN	69
7.5 COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT EN MILIEU RURAL	69
7.5.1 <i>Modification du Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux</i>	71
7.6 COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT POUR LES LACS ET LES MILIEUX HUMIDES	72
7.7 COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT POUR LES DÉPÔTS ROCHEUX.....	74

7.8 IMPACT DE LA PÉRIODE DE RETOUR SUR LE COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT	74
7.8.1 <i>Considération en milieu urbain</i>	77
7.8.2 <i>Considération en milieu rural</i>	77
7.9 RECOMMANDATIONS	78
CHAPITRE 8. VALIDATION DE LA MÉRA AUX BASSINS-VERSANTS SOUS ÉTUDE	81
8.1 COMPARAISON DES DÉBITS MÉRA ET DES DÉBITS OBSERVÉS	81
8.2 INFLUENCE DES LACS ET LES MILIEUX HUMIDES.....	89
8.3 INFLUENCE DU TEMPS DE CONCENTRATION	92
8.4 INFLUENCE DE L'OCCUPATION DU TERRITOIRE, DES CLASSES HYDROLOGIQUES ET DE LA PENTE DU BASSIN.....	93
8.5 SYNTHÈSES ET RECOMMANDATIONS	94
CHAPITRE 9. SITES INSTRUMENTÉS	99
9.1 LOCALISATION DES SITES	99
9.2 DESCRIPTION DES SITES.....	105
9.2.1 <i>Caractéristiques physiographiques générales</i>	105
9.2.2 <i>Occupation du territoire</i>	105
9.2.3 <i>Réseau hydrographiques</i>	108
9.3 INSTRUMENTATION DES SITES	111
9.4 BILAN DES CAMPAGNES DE MESURE	112
9.5 EXTRÊMES DE PLUIE	119
CHAPITRE 10. RECOMMANDATIONS	121
BIBLIOGRAPHIE	125
ANNEXE A. LOCALISATION DES STATIONS HYDROMÉTRIQUES DES BASSINS-VERSANTS	137
ANNEXE B. CARACTÉRISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES	143

ANNEXE C. OCCUPATION DU TERRITOIRE	151
ANNEXE D. CARACTÉRISTIQUES DES SÉRIES DISPONIBLES.....	155
ANNEXE E. QUANTILES DE DÉBIT.....	159
ANNEXE F. ASSOCIATION ENTRE STATIONS HYDROMÉTRIQUES ET STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET DONNÉES DE PRÉCIPITATION DISPONIBLES.	165
ANNEXE G. COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT PROPOSÉS DANS LA LITTÉRATURE.....	171
ANNEXE H. TEMPS DE CONCENTRATION.....	175
ANNEXE I. COEFFICIENTS DE RUISSELLEMENT ESTIMÉS À PARTIR DES DIFFÉRENTES ÉQUATIONS EMPIRIQUES DU TEMPS DE CONCENTRATION RETENUES	179
ANNEXE J. SUPERFICIES ET POSITIONS DES LACS ET MILIEUX HUMIDES ET FACTEURS DE LAMINAGE CORRESPONDANTS (FIGURE 3.6 DE TRANSPORTS QUÉBEC, 2017) POUR LES BASSINS SOUS ÉTUDE. ...	183
ANNEXE K. INSTALLATION DES ÉQUIPEMENTS DE RECHERCHE SUR LES SITES INSTRUMENTÉS	187
ANNEXE L. ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES.....	191

Liste des tableaux

<i>Tableau 2.1 - Localisation des bassins-versants retenus aux fins d'analyses, sources des données de débit et nombre de bassins correspondant à chaque source.....</i>	<i>4</i>
<i>Tableau 2.2 – Sources d'information utilisées pour réaliser la caractérisation physiographique des bassins-versants à l'étude.</i>	<i>6</i>
<i>Tableau 2.3 – Classes de pente des bassins-versants et nombre de bassins appartenant à chaque classe.</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 6.1 – Variables des équations du temps de concentration et abréviations utilisées.</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 6.2 – Résumé des principales informations sur les équations empiriques du temps de concentration retenues.</i>	<i>31</i>
<i>Tableau 6.3 - Liste des formulations considérées (pour toutes les équations, T_C est en heure, L en km, S_b et S_C en m/m et A en km²).....</i>	<i>34</i>
<i>Tableau 6.4 - Définition de la pente de l'équation de la FAA selon différentes sources (cette variable est exprimée comme un rapport de deux distances, p. ex. m/m ou pi/pi, ou encore en pourcentage).</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 6.5 – Méthode MTQ quant au choix de l'équation de temps de concentration.</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 7.1 - Description des classes hydrologiques A, B, C et D selon USDA-NRCS (1986, 2009).....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 7.2 – Nom de sols du Tableau 3.4.2c de Transports Québec (2017) ne se trouvant pas dans la classification hydrologique des sols de l'IRDA (Gagné et al., 2013).</i>	<i>49</i>
<i>Tableau 7.3 – Comparaison entre les classes hydrologiques attribuées à différentes séries de sols par le MTMDET (Transports Québec, 2017) et l'IRDA (Gagné et al., 2013). Les cases bleues correspondent aux séries de sols où les deux classifications sont en accord. Les cases rouges correspondent aux séries de sols pour lesquelles les capacités d'infiltration sont inférieures selon la classification de l'IRDA alors que les cases vertes identifient les séries de sols où les capacités d'infiltration sont supérieures selon la classification de l'IRDA.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 7.4 – Nombre de polygones pour chaque classe de drainage associée au dépôt de surface 1AAM.....</i>	<i>55</i>

<i>Tableau 7.5 - Lien entre les classes de drainage et les classes hydrologiques.</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 7.6 - Classes hydrologiques attribuées aux dépôts de surface principaux à partir des classes de drainage. Les cases bleues indiquent aucune modification par rapport aux classes suggérées dans Transports Québec (2017) alors que les cases vertes et oranges indiquent une diminution et une augmentation respectivement de la classe hydrologique par rapport aux valeurs de Transports Québec (2017). Les lettres entre parenthèses correspondent aux classes hydrologiques de Transports Québec (2017). 58</i>	
<i>Tableau 7.7 - Classes hydrologiques attribuées aux dépôts de surface principaux</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 7.8 – Occupations du territoire selon l’inventaire annuel des cultures d’AAC. ..</i>	<i>67</i>
<i>Tableau 7.9 - Facteurs de correction à appliquer aux valeurs de coefficient de ruissellement en milieu urbain et rural (la valeur de référence est pour la période de retour 10 ans).....</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 8.1 - Liste des six bassins-versants présentant les plus grandes sous-estimations absolues des débits observés par la MÉRA-MTQ pour la période de retour de 25 ans.</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 8.2 - Liste des sept bassins-versants présentant les plus grandes surestimations relatives des débits observés par la MÉRA-MTQ pour la période de retour de 25 ans.</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 9.1 – Principales caractéristiques des bassins-versants instrumentés.....</i>	<i>105</i>
<i>Tableau 9.2 - Types et nombre d’instruments pour les différents bassins-versants instrumentés</i>	<i>112</i>
<i>Tableau 9.3 – Date de début et de fin des campagnes de mesure 2015, 2016 et 2017 sur les quatre sites instrumentés.</i>	<i>113</i>
<i>Tableau A.1 – Localisation des stations hydrométriques et provenance des données de débit pour les 101 bassins-versants à l’étude (DEH : direction de l’expertise hydrique, IRDA : Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement, ECCC : Environnement et Changement Climatique Canada, USGS : United States Geological Survey).....</i>	<i>140</i>
<i>Tableau B.1 – Principales caractéristiques physiographiques des 101 bassins-versants à l’étude</i>	<i>143</i>

<i>Tableau B.2 – Répartition des classes hydrologiques des sols par rapport à la superficie totale des bassins-versants (%)</i>	<i>147</i>
<i>Tableau C.1 – Répartition de l’occupation du territoire par rapport à la superficie totale des bassins-versants (%)</i>	<i>151</i>
<i>Tableau D.1 - Caractéristiques des séries disponibles aux 101 stations hydrométriques retenues et p-value du test de tendance (Mann-Kendall).</i>	<i>155</i>
<i>Tableau E.1 - Distributions sélectionnées, valeurs des paramètres et débits maximum annuel de périodes de retour 2, 5, 10 et 25 ans estimés.</i>	<i>159</i>
<i>Tableau F.1 - Association entre les stations hydrométriques et les stations météorologiques les plus près (O : signifie que ces durées sont disponibles pour les courbes IDF aux stations météorologiques).</i>	<i>165</i>
<i>Tableau G.1 - Coefficients de ruissellement en milieu urbain (ASCE et WPCF, 1969)</i>	<i>171</i>
<i>Tableau G.2 - Coefficients de ruissellement associés aux cultures</i>	<i>172</i>
<i>Tableau G.3 - Coefficients de ruissellement associés aux prairies et terres en pâturage</i>	<i>173</i>
<i>Tableau G.4 - Coefficients de ruissellement associés au milieu boisé.....</i>	<i>174</i>
<i>Tableau H.1 – Estimation des temps de concentration pour les 101 bassins-versants à l’étude considérant les 14 équations empiriques retenues et détaillées au Chapitre 6 ainsi que la Méthode MTQ (EMM : Espey-Morgan-Masch, FM : Folmar et Miller, HS : Haktanir-Sezen, K : Kirpich, M : Mimikou, S : Sheridan, WC : Watt-Chow, Will : Williams, MTQ : MTMDET).....</i>	<i>175</i>
<i>Tableau I.1 - Coefficients de ruissellement pour les 101 bassins-versants à l’étude estimés selon les 14 équations empiriques retenues et décrites au Chapitre 7 ainsi que la méthode du MTMDET (EMM : Espey-Morgan-Masch, FM : Folmar et Miller, HS : Haktanir-Sezen, K : Kirpich, M : Mimikou, S : Sheridan, WC : Watt-Chow, Will : Williams, MTQ : MTMDET).....</i>	<i>179</i>
<i>Tableau J.1 – Superficie des lacs et milieux humides (%), par rapport à la superficie du bassin-versant, position des lacs et milieux humides à l’intérieur des bassins-versants et facteur de laminage provenant de la Figure 3.6 de Transports Québec (2017).</i>	<i>183</i>
<i>Tableau L.1 – Hauteurs maximales de pluie enregistrées et période de retour correspondante pour le site S1.....</i>	<i>191</i>

Tableau L.2 – Hauteurs maximales de pluie enregistrées et période de retour correspondante pour le site S2..... 191

Tableau L.3 - Hauteurs maximales de pluie enregistrées et période de retour correspondante pour le site S3..... 192

Tableau L.4 - Hauteurs maximales de pluie enregistrées et période de retour correspondante pour le site S4..... 192

Liste des figures

<i>Figure 2.1 – Localisation des stations hydrométriques des bassins-versants à l'étude (États américains : MA; Massachusetts, ME; Maine, New York; NY et Vermont; VT) Source : Samuel Bolduc.</i>	4
<i>Figure 2.2 – Caractéristiques physiographiques des bassins-versants à l'étude (A : aire, L : longueur du cours d'eau, S_b : pente du bassins-versant, S_c : pente du cours d'eau, M : Sinuosité). Les bornes inférieures et supérieures des boîtes représentent le 1^{er} (Q1) et le 3^e quartile (Q3) alors que la ligne à l'intérieur des boîtes définit la médiane. La longueur des « moustaches » vaut 1,5 fois l'écart interquartile (Q3-Q1).</i>	5
<i>Figure 2.3 – Relation entre la longueur du cours d'eau (km) et l'aire (km²) des bassins-versants à l'étude.</i>	7
<i>Figure 2.4 – Comparaison des pentes des bassins-versants (%) et des pentes des cours d'eau (%) correspondantes.</i>	8
<i>Figure 2.5 – Représentation grossière du bassin-versant associé à la station hydrométrique 01022294 située dans le Maine (Lat. 44.859, Long. -68.104) et cours d'eau correspondant (Courbes de niveau : 10 pieds, Carte topographique : https://viewer.nationalmap.gov), Source : Samuel Bolduc.</i>	9
<i>Figure 2.6 - Relation entre la sinuosité des cours d'eau et la pente des bassins-versants (%) à l'étude.</i>	9
<i>Figure 2.7 – Exemple de bassin-versant avec une sinuosité élevée (1.8 pour le bassin 050812 situé au Québec) et avec une sinuosité faible (1.1 pour le bassin 1174565 situé au Massachusetts), la ligne pointillée noire représente longueur des bassins-versants et passe par l'exutoire, le centroïde et l'intersection entre la partie amont du cours d'eau et l'extrémité du bassin-versant.</i>	10
<i>Figure 2.8 – Fraction de la superficie totale des bassins-versants (%) occupée par chacune des classes hydrologiques des sols (ligne rouge : médiane; boîte : 1^{er} (Q1) et 3^e (Q) quartile; moustache : 1.5 fois la distance interquartile (Q3-Q1)).</i>	11
<i>Figure 2.9 – Fraction de la superficie des bassins appartenant à chacune des classes d'occupations du territoire (ligne rouge : médiane; boîte : 1^{er} (Q1) et 3^e quartile (Q3); moustache : moustache : 1.5 fois la distance interquartile (Q3-Q1)).</i>	12
<i>Figure 2.10 – Bassin-versant (01109070) où les zones urbanisées représentent 17 % de la superficie totale (Source : Samuel Bolduc).</i>	13

<i>Figure 2.11 – Exemple de bassins-versants où les lacs (bleu) représentent 5, 11 et 18 % de la superficie totale (Source : Samuel Bolduc).</i>	14
<i>Figure 2.12 - Exemple de bassins-versants où les milieux humides (vert) représentent 20 et 30 % de la superficie totale (Source : Samuel Bolduc).</i>	14
<i>Figure 5.1 - Bassin-versant délimité à partir de l'outil Info-Sol du MAPAQ et couches d'information disponibles.</i>	26
<i>Figure 5.2 – Territoire couvert par la couche détaillée des milieux humides du MDDELCC et de Canards Illimités (Source : Samuel Bolduc).</i>	27
<i>Figure 5.3 – Territoire couvert par l'inventaire annuel des cultures d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (Source : Samuel Bolduc).</i>	28
<i>Figure 6.1 – Méthode d'estimation du temps de concentration pour établir les équations de temps de concentration retenues (Pour FAA-1, FAA-2 et Williams, cette information est inconnue, voir Tableau 6.1).</i>	33
<i>Figure 6.2 – Box plots des temps de concentration estimés aux différents bassins selon chacune des équations empiriques retenues (EMM : Espey-Morgan-Masch, FM : Folmar et Miller, HS : Haktanir-Sezen, K : Kirpich, M : Mimikou, S : Sheridan, WC : Watt-Chow, Will : Williams, MTQ : méthode MTQ).</i>	40
<i>Figure 6.3 – Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne relative (Root Mean Square Error, RMSE relatif) entre les différentes équations du temps de concentration retenues (EMM : Espey-Morgan-Masch, FM : Folmar et Miller, HS : Haktanir-Sezen, K : Kirpich, M : Mimikou, S : Sheridan, WC : Watt-Chow, Will : Williams, MTQ : méthode MTQ).</i>	40
<i>Figure 7.1 -Couverture des cartes pédologiques du Québec. Le point rouge indique la localisation de la carte 32H02102 présentée à la Figure 7.2. (Source : IRDA; https://www.irda.qc.ca/assets/documents/P%C3%A9dologie/Index_pedo_oct08.pdf) ...</i>	50
<i>Figure 7.2 – Pédologie de la carte 32H02102 située dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Source : IRDA, https://www.irda.qc.ca/assets/documents/P%C3%A9dologie/%C3%89tudes_p%C3%A9dologiques/Pedo_32h02102.pdf), cette carte est identifiée par un point rouge à la Figure 7.1.</i>	51
<i>Figure 7.3 – Répartition spatiale des ponceaux transversaux de l'inventaire des ponceaux du MTMDDET (ligne rouge : 47^e parallèle).</i>	61

<i>Figure 7.4 – Application de la grille pour l’estimation de la pente moyenne d’un bassin-versant selon Linsley et al. (1949).</i>	63
<i>Figure 7.5 - Facteur de correction du coefficient de ruissellement fonction de la période de retour de la pluie selon différentes études. La période de retour de référence est 10 ans.</i>	76
<i>Figure 8.1 - Débits observés (Q_o) en fonction de la surface des bassins-versants pour les périodes de retour (a) 5 ans et (b) 25 ans.</i>	83
<i>Figure 8.2 - Distribution des écarts relatifs entre débits observées (Q_o) et les débits MÉRA-MTQ ($(Q_o - Q_{MTQ})/Q_o$) pour les périodes de retour 5 ans (courbe bleue) et 25 ans (courbe rouge). Les points en vert sur la courbe 25 ans correspondent aux bassins présentant les plus grandes sous-estimations des débits observés (Tableau 8.1).</i>	84
<i>Figure 8.3 - Écarts absolus entre débits observés (Q_o) et MÉRA-MTQ ($Q_{MTQ} - Q_o$) en fonction de la surface des bassins-versants pour les périodes de retour (a) 5 ans et (b) 25 ans. Les points en rouge correspondent aux six bassins présentant les écarts absolus les plus importants (voir Tableau 8.1).</i>	85
<i>Figure 8.4 Écarts relatifs entre débits observés (Q_o) et MÉRA-MTQ [$(Q_{MTQ} - Q_o)/Q_o$] en fonction de la surface des bassins-versants pour les périodes de retour (a) 5 ans et (b) 25 ans. Les points rouges correspondent aux sept bassins présentant les écarts relatifs les plus importants (voir Tableau 8.2).</i>	86
<i>Figure 8.5 - Écarts relatifs entre débits estimés à partir des séries observées (Q_o) et estimés par la MÉRA-MTQ [$(Q_o - Q_{MTQ})/Q_o$] en fonction du pourcentage de la superficie occupée par les lacs et les milieux humides (MH) pour la période de retour 25 ans. L’effet du laminage (Section 3.6 du Manuel de conception des ponceaux) n’a pas été pris en compte dans l’estimation des débits MÉRA-MTQ.</i>	90
<i>Figure 8.6 - Écarts relatifs entre débits MÉRA-MTQ (Q_{MTQ}) et observés (Q_o) [$(Q_{MTQ} - Q_o)/Q_o$] sans (axe des x) et avec (axe des y) prise en compte du laminage résultant de la présence de lacs et milieux humides (Section 3.6 du Manuel de conception des ponceaux) pour la période de retour 25 ans. Les points ayant les écarts relatifs les plus élevés (Tableau 8.2) sont indiqués en vert. Les points rouges correspondent aux bassins pour lesquels l’ajout du laminage a conduit à une sous-estimation des débits observés par la MÉRA-MTQ et les points mauves au maintien de la sous-estimation initiale sans laminage. Les autres points correspondent aux situations où la surestimation initiale persiste après introduction du laminage.</i>	91
<i>Figure 8.7 - Distribution spatiale des lacs et milieux humides dans le bassin 02GA031 (voir Tableau 8.2).</i>	92

<i>Figure 8.8. Fonction de répartition empirique des écarts relatifs entre débits MÉRA-MTQ et observés de période de retour 25 ans $[(Q_{MTQ}-Q_o)/Q_o]$ pour les quatre classes de pente (voir Tableau 2.3).</i>	93
<i>Figure 8.9 - Écarts relatifs entre débits MÉRA-MTQ et observés de période de retour 25 ans $[(Q_{MTQ}-Q_o)/Q_o]$ en fonction du pourcentage de la superficie du bassin : (a) boisé; (b) en culture; (c) en pâturage.</i>	95
<i>Figure 9.1 – Localisation des quatre sites instrumentés</i>	100
<i>Figure 9.2 - Exutoire du bassin-versant du site S1 et emplacement de la station de jaugeage dans le ruisseau des Bacon. (A : Ruisseau des Bacon en amont de la station de jaugeage; B : Ruisseau des Bacon en aval de la station de jaugeage; Photos : Samuel Bolduc).</i>	101
<i>Figure 9.3 - Exutoire du site S2 (A : Emplacement de la station de jaugeage en amont du ponceau; B : Cours d'eau en aval du ponceau; Photos : Samuel Bolduc).</i>	102
<i>Figure 9.4 - Exutoire du site S3 (A : Rivière La Chevrotière en amont du ponceau sur la route du Moulin; B : Cours d'eau en aval de la station et à l'entrée du ponceau; Photos : Samuel Bolduc).</i>	103
<i>Figure 9.5 - Exutoire du site S4 (A : Ruisseau Rouge en amont du ponceau sur la route Saint-Cyrille; B : Cours d'eau en aval de la station et à l'entrée du ponceau; Photos : Samuel Bolduc).</i>	104
<i>Figure 9.6 – Pourcentage de la superficie du bassin-versant S1 occupé par les différentes occupations du territoire.</i>	106
<i>Figure 9.7 – Pourcentage de la superficie du bassin-versant S3 occupé par les différentes occupations du territoire.</i>	107
<i>Figure 9.8 - Pourcentage de la superficie du bassin-versant S4 occupé par les différentes occupations du territoire.</i>	107
<i>Figure 9.9 – Réseau hydrographique des sites 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).</i>	109
<i>Figure 9.10 - Lac artificiel (A), vanne de vidange (B) et barrage avec vue vers l'aval (C) situé au milieu du bassin-versant du site S3 (Photos : Samuel Bolduc).</i>	110

<i>Figure 9.11 – Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S1 en 2015</i>	113
<i>Figure 9.12 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S1 en 2016</i>	114
<i>Figure 9.13 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S1 en 2017</i>	114
<i>Figure 9.14 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S2 en 2015</i>	115
<i>Figure 9.15 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S2 en 2016</i>	115
<i>Figure 9.16 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S2 en 2017</i>	116
<i>Figure 9.17 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S3 en 2015</i>	116
<i>Figure 9.18 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S3 en 2016</i>	117
<i>Figure 9.19 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S3 en 2017</i>	117
<i>Figure 9.20 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S4 en 2015</i>	118
<i>Figure 9.21 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S4 en 2016</i>	118
<i>Figure 9.22 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S4 en 2017</i>	119
<i>Figure A.1 - Localisation des stations hydrométriques des bassins-versants à l'étude et superficie correspondante pour le Québec.</i>	137
<i>Figure A.2 - Localisation des stations hydrométriques des bassins-versants à l'étude et superficie correspondante pour l'Ontario.</i>	138

<i>Figure A.3 - Localisation des stations hydrométriques des bassins-versants à l'étude et superficie correspondante pour les États-Unis (États : MA; Massachusetts, ME; Maine, NY; New York et VT; Vermont).....</i>	<i>139</i>
<i>Figure K.1 - Instrumentation du site S1 (A et B : Limnimètre et boîtier ; C : Pluviomètre ; D : Emplacement du limnimètre ; Photos : Samuel Bolduc).....</i>	<i>187</i>
<i>Figure K.2 - Instrumentation du site S2 (A : Emplacement du limnimètre ; B et C : Limnimètre et boîtier ; D : Pluviomètre ; Photos : Samuel Bolduc).....</i>	<i>188</i>
<i>Figure K.3 - Pluviomètres installés sur le site S3 (A : Pluviomètre situé près de la station de jaugeage du CEHQ; B : Pluviomètre en bordure de la route d'Irlande; Photos : Samuel Bolduc).....</i>	<i>189</i>
<i>Figure K.4 - Pluviomètres installés sur le site S4 (A : Pluviomètre situé près du chemin de fer en bordure du ruisseau Rouge; B : Pluviomètre localisé dans la forêt de démonstration Normandin; Photos : Samuel Bolduc).</i>	<i>190</i>

Liste des abréviations

A : Aire

AAC : Agriculture et Agroalimentaire Canada

DEH : Direction de l'Expertise Hydrique

C_R : Coefficient de ruissellement

C_V : Coefficient de ruissellement volumétrique

ECCC : Environnement et Changement Climatique Canada

IAC : Inventaire annuel des cultures

IDF : Intensité-Durée-Fréquence

IRDA : Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement

L : Longueur du cours d'eau

MAPAQ : Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec

MDDELCC : Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques

MNT : Modèle numérique de terrain

MTMDET : Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports

S_b : Pente moyenne du bassin-versant

S_c : Pente 85-10 du cours d'eau

T_c : Temps de concentration

USGS : United States Geological Survey

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Au début de l'année 2015, le professeur Alain Mailhot et son équipe (Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement), a été mandaté par la Direction de l'hydraulique du Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) pour réviser les critères de conception des ponceaux pour des bassins-versants de moins de 25 km² dans un contexte de changements climatiques.

La conception des ponceaux pour les petits bassins-versants est réalisée à partir de la méthode rationnelle et les différentes étapes sont décrites dans le Manuel de conception des ponceaux (Transports Québec, 2017). Cette méthode repose sur plusieurs hypothèses et comprend certaines limites. Elle est d'ailleurs confrontée à deux problématiques importantes : 1) des différences sont observées entre les débits de conception et les débits observés et 2) les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF), utilisées dans la conception, sont estimées à partir des pluies historiques et pourraient ne pas être représentatives des régimes pluviométriques en climat futur compromettant ainsi la pérennité des infrastructures.

Ce projet se divise en deux phases. La première phase d'une durée de trois ans (2015-2018) porte sur la première problématique. L'objectif principal de cette phase est de mettre à jour les différentes étapes de la méthode rationnelle de façon à minimiser les écarts entre les débits de conception et les débits observés. La seconde phase (2018-2021) visera, quant à elle, à établir les balises concernant les ajustements à apporter à la méthode rationnelle pour tenir compte des changements climatiques et de leurs influences sur les débits de pointe.

La réalisation de la première phase repose sur deux approches : 1) la caractérisation de bassins-versants et l'estimation des débits associés à différentes périodes de retour et 2) l'instrumentation et la modélisation de bassins-versants présentant des milieux humides.

En ce qui concerne la première approche, 101 bassins-versants, avec au moins 10 années de débits, ont été caractérisés de façon à estimer les débits de conception à partir de la méthode rationnelle. Ces bassins-versants proviennent du Québec, de l'Ontario et des États-Unis (Maine, Massachusetts, New York et Vermont) et ont une superficie variant entre 0.5 et 100 km². De plus, pour qu'une année de débit soit considérée comme «valide», au moins 80 % des données de débit devaient être disponibles entre le premier juin et le 31 octobre. Parallèlement à ce travail, les maxima annuels des données de débit ont été extraits pour estimer les débits observés associés à différentes périodes de retour et faire des comparaisons avec les débits de conception. Finalement, 14 équations empiriques du temps de concentration, développées dans des contextes variés et dans différentes régions du monde, ont été

comparées entre elles et à la méthode MTQ. La méthode MTQ consiste à sélectionner l'équation FAA-1 (FAA, 1970) ou Williams (Williams, 1922) selon le coefficient de ruissellement attribué au bassin-versant.

La caractérisation des bassins-versants a permis d'émettre une série de recommandations visant une mise à jour des différentes étapes de la méthode rationnelle :

1. Superficie des bassins-versants;
 - Il est recommandé d'utiliser un système d'information géographique afin d'automatiser la délimitation des lignes de contour des bassins-versants. Une validation est toutefois nécessaire notamment en présence de zones agricoles et de milieux humides.
2. Classification hydrologique des sols
 - Les cartes pédologiques, associées à la classification hydrologique de l'IRDA (Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement, Gagné *et al.*, 2013) sont à privilégier lors de l'estimation de classification hydrologique moyenne d'un bassin-versant. Si le bassin-versant n'est pas couvert par les cartes pédologiques, les cartes de dépôts de surface, associées à la mise à jour de la classification hydrologique des dépôts de surface réalisée dans le cadre de ce projet, doivent être utilisées.
3. Pente moyenne du bassin-versant
 - Il est suggéré d'estimer la pente moyenne d'un bassin-versant via un système d'information géographique et les modèles numériques de terrain (MNT). Dans la mesure où les MNT ne sont pas disponibles, il est recommandé de continuer d'utiliser la technique de la grille décrite dans le Manuel de conception des ponceaux.
4. Occupation du territoire
 - Il est recommandé d'utiliser l'inventaire annuel des cultures du Canada pour caractériser l'occupation du territoire en raison de sa précision et de sa mise à jour annuel. Si un bassin-versant n'est pas couvert par cet inventaire, la couverture du sol «circa 2000» doit être retenue.
5. Coefficient de ruissellement en milieu urbain
 - Il est recommandé de conserver les valeurs de coefficients de ruissellement présentés au Tableau 3.4.1b du Manuel de conception des ponceaux pour les zones urbaines.
6. Coefficient de ruissellement en milieu rural
 - Il est recommandé de poursuivre avec les valeurs du Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux pour les zones rurales. Il est également suggéré de modifier ce tableau de sorte qu'il soit cohérent avec la classification hydrologique des cartes pédologiques et des dépôts de surface. Ainsi, les classes hydrologiques AB et BC devraient être éliminées et les valeurs associées à la classe CD devraient être attribuées à la classe

D. Finalement, il n'est pas recommandé d'appliquer un facteur de correction aux coefficients de ruissellement de ce tableau et ce, peu importe la période de retour considérée.

7. Coefficient de ruissellement pour les lacs et les milieux humides
 - Il est suggéré d'utiliser un coefficient de ruissellement commun pour les lacs et les milieux humides. Un coefficient de 0.90 est recommandé considérant que l'impact des lacs et milieux humides sur la réduction des volumes de ruissellement est faible.
8. Coefficient de ruissellement pour les dépôts rocheux
 - Un coefficient de ruissellement de 0.90 est recommandé pour tous les dépôts rocheux.

La comparaison entre les débits de conception et observés a quant à elle permit de tirer les conclusions suivantes :

1. Les débits de conception, basés sur les équations de temps de concentration décrites dans le Manuel de conception des ponceaux, sont majoritairement plus élevés que les débits observés considérant une même période de retour. Des écarts relatifs médians importants s'observent tant pour la période de retour 5 ans que 25 ans. Tout de même, les débits de conception peuvent être sous-estimés, donc inférieurs aux débits observés pour certains bassins-versants. Cette sous-estimation peut aller jusqu'à 76 %. Il est important de noter que le nombre de bassins-versants présentant une sous-estimation est moins élevé pour la période de retour 5 ans que 25 ans.
2. Les surestimations et sous-estimations pourraient s'expliquer par un ou une combinaison des facteurs suivants : 1) les coefficients de ruissellement à ces bassins sont sous- ou surestimés, 2) les temps de concentration à ces bassins sont sous ou surestimés et 3) les débits observés à ces bassins sont sous ou sur-surestimés.
3. Sur la base des analyses effectuées, il n'est pas possible d'identifier le principal facteur responsable des écarts les plus importants entre les débits estimés et les débits observés. L'absence d'estimation indépendante du temps de concentration s'avère être une contrainte majeure pour quantifier le niveau de sous- ou de surestimation des temps de concentration estimés à partir des différentes équations empiriques retenues.
4. Les valeurs de coefficients de ruissellement du Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux sont cohérentes entre elles et, pour une majorité de bassins, conduisent à des coefficients de ruissellement réalistes et plausibles en regard des débits de conception.
5. Les lacs et les milieux humides, en fonction de leur distribution spatiale et de leur importance, peuvent avoir un impact majeur sur les débits de pointe. Cet impact se traduit par une réponse hydrologique plus lente et par conséquent, un laminage des débits de pointe.

Finalement, les analyses portant sur les équations empiriques du temps de concentration ont permis de faire les recommandations suivantes :

1. Remplacer, à court et moyen termes, la méthode MTQ qui comprend une incohérence concernant la sélection des équations FAA-1 et Williams. En effet, le Manuel de conception des ponceaux propose d'utiliser l'équation FAA-1 lorsque le coefficient de ruissellement est inférieur à 0.4 alors que cette équation a été développée pour des secteurs majoritairement imperméables où les coefficients de ruissellement sont élevés;
2. Remplacer les équations FAA-1 et Williams par l'équation NERC (NERC, 1975). Cette équation présente une formulation nécessitant la longueur et la pente du cours d'eau et reposant sur des bases hydrauliques. De plus, elle est basée sur un grand nombre d'événements (environ 1 500) provenant de plusieurs bassins-versants (138).
3. Procéder au développement d'une équation du temps de concentration adaptée au contexte québécois. L'utilisation des équations empiriques développées et calibrées ailleurs dans le monde est difficilement justifiable et demeure la seule approche possible lorsque l'on ne dispose pas d'équation développée à partir d'un échantillon de bassins représentatifs de ceux auxquels on s'intéresse.

Pour la seconde approche, quatre petits bassins-versants (superficie inférieure à 26 km²) ont été instrumentés de façon à colliger des données de débit et pallier le manque de données pour des bassins-versants caractérisés par la présence de milieux humides. Ces bassins-versants sont localisés sur la Côte-Nord (Longue-Rive et Port-Cartier), dans la région du Lac-Saint-Jean (Normandin) et dans la région de Portneuf (Saint-Gilbert). Pour tous ces bassins, les hauteurs d'eau/débit sont enregistrées ainsi que la précipitation et la température de l'air. Au cours de la phase I du projet, trois campagnes de mesure ont été complétées (2015, 2016 et 2017). Ces campagnes de mesure débutent au printemps (avril-mai) et se terminent au début du mois de novembre. Il est important de mentionner que lors de la phase I du projet, seules des analyses très partielles ont été réalisées en matière de modélisation des bassins-versants instrumentés.

La phase II du projet, en plus de porter sur les ajustements à apporter à la méthode rationnelle dans un contexte de changements climatiques, comprendra les points suivants :

1. Le développement d'une équation empirique du temps de concentration mieux adaptée aux bassins québécois;
2. La mise à jour éventuelle du Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux;
3. La validation de la procédure du Manuel de conception des ponceaux relativement à la prise en compte des lacs et des milieux humides.

4. La poursuite des campagnes de mesure des quatre sites instrumentés pour les trois prochaines années (2018, 2019 et 2020).
5. La modélisation et la calibration des sites instrumentés et les analyses visant à quantifier l'impact des lacs et les milieux humides sur la réponse hydrologique des bassins-versants.

Chapitre 1. Introduction

Le présent rapport constitue le rapport final 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* (CC06.1). Ce projet a été financé par le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) et par le Fonds vert. Ce rapport dresse un bilan des travaux réalisés depuis le début du projet en janvier 2015.

Les objectifs spécifiques de ce projet de recherche sont les suivants :

- Valider les différents paramètres de la méthode rationnelle et les ajuster afin que les débits calculés représentent avec plus de précision les valeurs observées sur le terrain.
- Évaluer l'impact des changements climatiques sur la conception des ponceaux et faire des recommandations quant aux critères de conception à appliquer dans un contexte de changements climatiques.

Le premier objectif du projet était examiné dans le cadre de la Phase I du projet, dont le présent rapport rend compte, alors que la Phase II du projet s'intéressera au deuxième objectif.

La Phase I comportait essentiellement deux volets majeurs. Le premier consistait à colliger les informations sur une centaine de bassins-versants de 100 km² ou moins pour lesquels des données de débits sont disponibles sur une période suffisamment longue pour l'estimation des débits maxima annuels de période de retour 25 ans. Ces débits ont ensuite été comparés aux débits estimés par la Méthode Rationnelle (MÉRA) selon la procédure décrite dans le *Manuel de conception des ponceaux*. Les bassins retenus, localisés au Québec, en Ontario et dans les états du nord-est des États-Unis, comportaient une variété de caractéristiques physiographiques (pente de bassins, occupation du territoire, classes hydrologiques, etc.) permettant d'explorer une variété importante de réponse hydrologique et d'évaluer la performance de la MÉRA sous diverses conditions. Le deuxième axe concernait l'instrumentation et le suivi de quatre bassins-versants. Il s'agit de bassins-versants comportant une fraction importante de milieux humides. De plus, deux d'entre eux se trouvent sur la Côte-Nord, une région où le MTMDET a constaté de nombreux problèmes qui semblent suggérer que les critères de conception sont moins bien adaptés aux bassins de cette région.

Les travaux relatifs au premier volet sont présentés aux Chapitres 2 à 8. Le Chapitre 2 présente les bassins-versants retenus et décrit le processus de sélection de ces derniers. Les séries de débits mesurées à ces bassins sont présentés au Chapitre 3

ainsi que l'analyse statistique ayant conduit à l'estimation des débits maxima annuels. Les Chapitres 4 à 7 reprennent en partie certains chapitres et sections du *Manuel de conception des ponceaux*. Ainsi la MÉRA est l'objet du Chapitre 4 où une perspective historique est adoptée, expliquant ses origines et les raisons de son relatif succès (ce Chapitre fait écho à la Section 3.2 du *Manuel de conception des ponceaux*). La question de l'estimation des superficies des bassins et du domaine d'application de la MÉRA est ensuite abordée au Chapitre 5 (Section 3.3 du *Manuel de conception des ponceaux*). L'estimation des temps de concentration est discutée au Chapitre 6 où diverses équations empiriques sont décrites et commentées en détails (Section 3.5.2 du *Manuel de conception des ponceaux*). Le Chapitre 7 aborde la question de l'estimation des coefficients de ruissellement (Section 3.4 du *Manuel de conception des ponceaux*). Une revue de la littérature est présentée de même qu'une discussion des différents facteurs (p. ex. présence de lacs et milieux humides, période de retour) ayant une incidence sur ces coefficients. La comparaison entre les débits maxima annuels estimés à partir des séries mesurées et ceux estimés à partir de la MÉRA est détaillée au Chapitre 8.

Le deuxième volet du projet (instrumentation et suivi des bassins-versants) est traité au Chapitre 9. Les bassins-versants instrumentés sont d'abord présentés (Section 9.1, Section 9.2 et Section 9.3) suivi d'un bilan des trois années de campagnes (Section 9.4) et d'un ensemble d'observations préliminaires sur les extrêmes de pluie enregistrées (Section 9.5).

La conclusion (Chapitre 10) reprend les diverses recommandations énoncées au fil des divers chapitres du rapport et présente une perspective sur les travaux à compléter dans le cadre de la Phase II du projet.

Si dans l'ensemble les travaux réalisés dans le cadre de la Phase I sont conformes à la proposition initiale du projet, il convient toutefois de souligner que la proposition initiale du projet prévoyait la mise en place d'un modèle hydrologique sur plusieurs bassins-versants dont ceux ayant été instrumentés dans le cadre de la Phase I. Ce modèle aurait été calé et ensuite utilisé pour générer de longues séries de débits à partir de séries de précipitations. L'analyse statistique des débits maxima annuels simulés devaient ensuite permettre de déterminer les débits de périodes de retour 2 à 25 ans qui seraient ensuite comparés aux débits estimés à partir de la méthode rationnelle. Cependant, en accord avec la Direction de l'hydraulique du MTMDET, il a été jugé plus pertinent de se concentrer, dans le cadre de la Phase I, sur la caractérisation du plus grand nombre de bassins-versants possibles quitte à augmenter la taille des bassins considérés de façon à parvenir à un échantillon de bassins significatifs où la MÉRA pourrait être évaluée. C'est ce à quoi la Phase I du projet s'est attardée. L'application du modèle hydrologique se fera dans le cadre de la Phase II du projet.

Chapitre 2. Bassins-versants à l'étude

Le présent chapitre dresse le portrait des bassins-versants¹ retenus pour l'évaluation de la Méthode Rationnelle (MÉRA). La Section 2.1 aborde leur localisation et explique la provenance des données de débit. La Section 2.2 et la Section 2.3 décrivent les bassins-versants en ce qui concerne leurs caractéristiques physiographiques et l'occupation du territoire.

2.1 Bassins-versants : localisation et provenance des données de débit

Afin d'évaluer la MÉRA, 101 bassins-versants pour lesquels des données de débit sont disponibles, ont été considérés. Pour tous ces bassins-versants, au moins dix années de débit, couvrant la période entre le premier juin et 31 octobre, sont disponibles. Pour qu'une année soit considérée comme valide, au moins 80 % des données devaient être disponibles entre le premier juin et le 31 octobre. Plus de détails seront donnés à ce sujet au Chapitre 3. De plus, la superficie de ces bassins-versants varie de 0.3 à 100 km². Bien que la MÉRA soit utilisée par le MTMDET pour des bassins-versants dont la superficie est de 25 km² ou moins, des bassins-versants de plus grandes dimensions ont été retenus pour deux raisons. Premièrement, la littérature suggère que la MÉRA peut être appliquée à des bassins-versants de superficie allant jusqu'à 80 (Young et McEnroe, 2014), 250 (French *et al.*, 1974) voire 320 km² (Dhakal *et al.*, 2012). La revue de littérature de la Section 5.1 donne plus de détails à ce sujet. 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 bassins-versants de 25 km² ou moins avaient été considérés. Dès lors, des bassins-versants se trouvant en Ontario et dans les états du nord-est des États-Unis (Maine, Massachussets, New York et Vermont) ont été également sélectionnés. Le Tableau 2.1 présente le nombre de bassins-versants retenus pour chaque province et état alors que la carte de la Figure 2.1 localise la station hydrométrique à l'exutoire de chacun de ces bassins. Les Figures A.1, A.2 et A.3 de l'Annexe A présentent une localisation à plus petite échelle des stations hydrométriques des bassins-versants retenus alors que le Tableau A.1 dresse la liste complète des stations hydrométriques.

¹ Bassin-versant et bassins-versants : orthographes retenues et suggérées par le *Grand Dictionnaire Terminologique* (<http://www.granddictionnaire.com/>) et proposée par l'Office québécois de la langue française.

Tableau 2.1 - Localisation des bassins-versants retenus aux fins d'analyses, sources des données de débit et nombre de bassins correspondant à chaque source.

Province/État	Organisme/Source	Nombre de bassins
Québec	DEH ¹	11
	IRDA ²	3
Ontario	ECCC ³	43
Maine	USGS ⁴	5
Massachusetts		5
New York		28
Vermont		6
Total		101

- 1 - Direction de l'Expertise Hydrique du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques (MDDELCC)
- 2 - Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement
- 3 - Environnement et Changement Climatique Canada
- 4 - United States Geological Survey

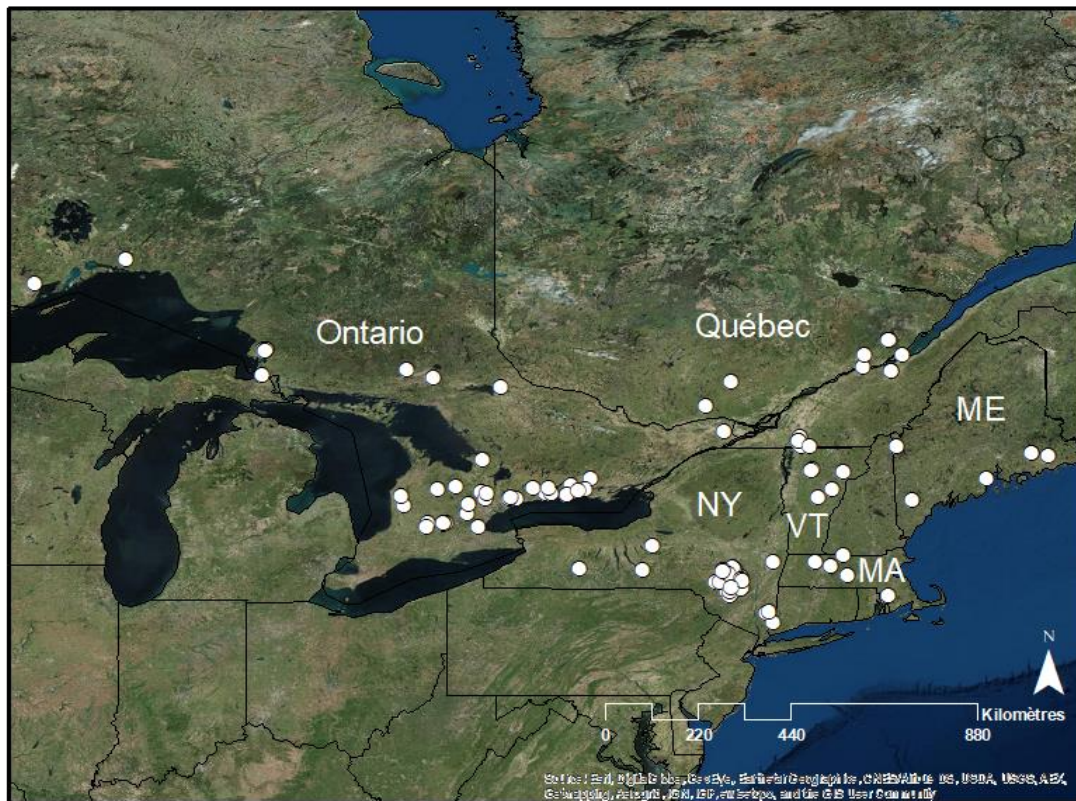


Figure 2.1 – Localisation des stations hydrométriques des bassins-versants à l'étude (États américains : MA; Massachusetts, ME; Maine, New York; NY et Vermont; VT)
Source : Samuel Bolduc.

2.2 Bassins-versants : Caractéristiques physiographiques

Les 101 bassins-versants retenus ont des caractéristiques physiographiques variées comme en témoigne la Figure 2.2. L'Annexe B présente les caractéristiques physiographiques de chacun des bassins-versants sous étude. Puisque les bassins-versants retenus proviennent de provinces et de pays différents, plusieurs sources d'information ont été utilisées pour réaliser la caractérisation physiographique des bassins-versants. Le Tableau 2.2 donne les détails à ce sujet.

La superficie des bassins (A) varie de 0.5 à 100 km². Pour 50 % de ces bassins-versants la superficie est inférieure à environ 40 km². La superficie est inférieure à la limite officielle d'application de la MÉRA au sein du MTMDET (25 km²) pour 35 bassins-versants. Les coefficients de ruissellement varient majoritairement entre 0.25 et 0.45. Pour des bassins-versants entièrement forestiers avec une forte présence de milieux humides les coefficients de ruissellement peuvent atteindre 0.11 alors que pour des bassins-versants très pentus et des sols favorisant le ruissellement il peut monter jusqu'à 0.55.

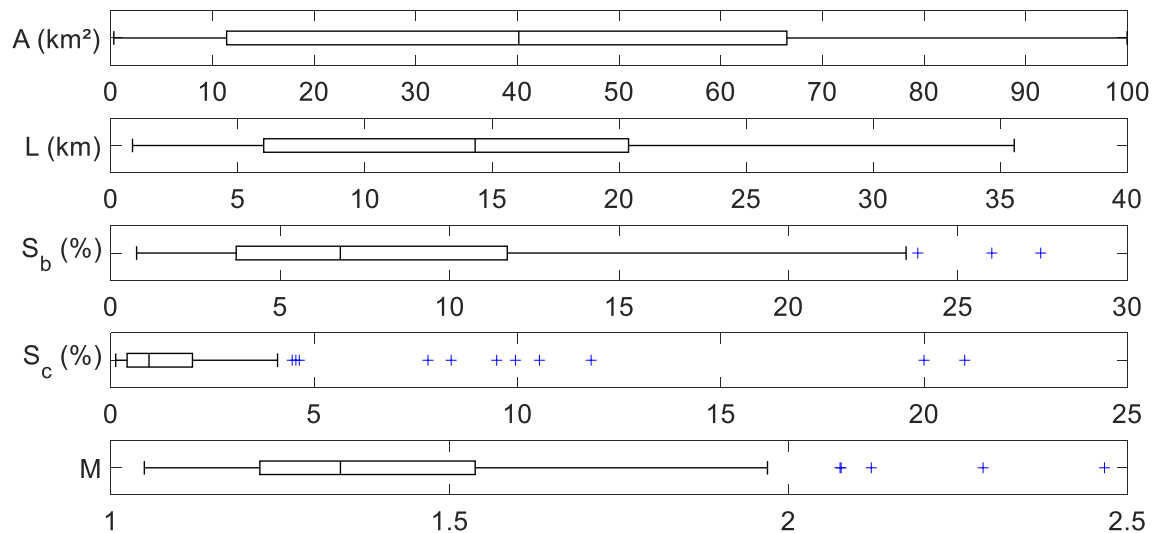


Figure 2.2 – Caractéristiques physiographiques des bassins-versants à l'étude (A : aire, L : longueur du cours d'eau, S_b : pente du bassin-versant, S_c : pente du cours d'eau, M : Sinuosité). Les bornes inférieures et supérieures des boîtes représentent le 1^e (Q1) et le 3^e quartile (Q3) alors que la ligne à l'intérieur des boîtes définit la médiane. La longueur des « moustaches » vaut 1,5 fois l'écart interquartile (Q3-Q1).

Tableau 2.2 – Sources d'information utilisées pour réaliser la caractérisation physiographique des bassins-versants à l'étude.

Caractérisation hydrologique	Province/Pays	Source	Fournisseur
Délimitation des bassins-versants	Québec	Modèle numérique de terrain	MTMDET
		World Topographic Map	ESRI-ArcGIS
	Ontario	Provincial digital elevation model v3.0	Land Information Ontario
	Ontario	World Topographic Map	ESRI-ArcGIS
	États-Unis	National Map Viewer	USGS
Hydrographie linéaire	Québec	Cadre de référence hydrologique du Québec du MDDELCC	MTMDET
		GéoCatalogue gouvernemental du MERN	MTMDET
	Ontario	Ontario Watercourse	Land Information Ontario
	États-Unis	National Map Viewer	USGS
Hydrographie de surface	Québec	Cadre de référence hydrologique du Québec du MDDELCC	MTMDET
		GéoCatalogue gouvernemental du MERN	MTMDET
	Ontario	Ontario Waterbody	Land Information Ontario
	États-Unis	National Map Viewer	USGS
Classification hydrologique des sols	Québec	Cartes pédologiques de l'IRDA	IRDA
		Carte des dépôts de surface du MFFP	MTMDET
	Ontario	Soil Survey Complex	Land Information Ontario
	États-Unis	Web Soil Survey	USDA
Occupation du territoire	Québec	Inventaire annuel des cultures d'AAC	Agriculture et Agroalimentaire Canada
	Ontario		
	États-Unis	NLCD 2011 Land Cover	National Land Cover Database
Milieux humides	Québec	Couche détaillée des milieux humides du MDDELCC et de Canards Illimités	MDDELCC Canards Illimités
	Ontario	Wetland Unit	Land Information Ontario
	États-Unis	National wetland inventory	U.S. Fish and wildlife service

La longueur des cours d'eau (L) correspond au plus long parcours de l'eau, prolongé jusqu'aux limites des contours des bassins-versants. Cette caractéristique varie d'un peu moins d'un kilomètre (0.85 km) à plus de 35 km. Il est intéressant de noter que la relation entre la longueur du cours d'eau et l'aire d'un bassin-versant n'est pas, comme on peut s'y attendre, linéaire (Figure 2.3).

Les pentes des bassins-versants (S_b) varient considérablement allant de 0.76 à 27.4 %. Considérant les classes de pente utilisées par le MTMDET et qui sont présentées dans Transports Québec (2017), un nombre assez similaires de bassins se retrouvent dans chacune des classes de pente (Tableau 2.3). Il est important de noter qu'une classe supplémentaire a été ajoutée (> 13 %). Les pentes des cours d'eau (S_c) sont très majoritairement plus petites que les pentes des bassins comme en témoigne la Figure 2.4. Seul un bassin-versant fait exception à la règle. Ce bassin se trouve en montagne dans une section très escarpée (Figure 2.5).

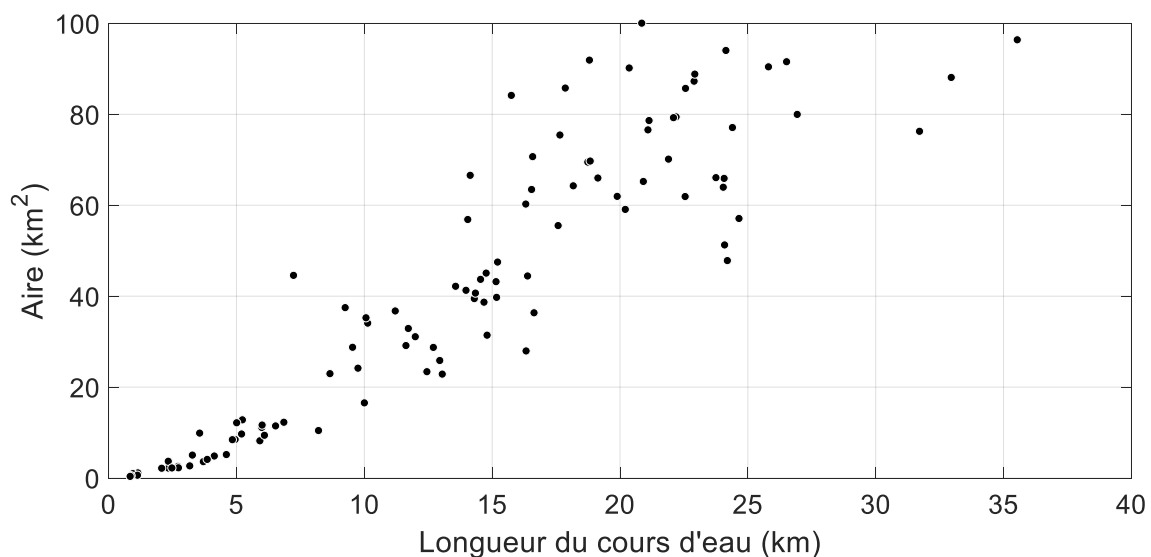


Figure 2.3 – Relation entre la longueur du cours d'eau (km) et l'aire (km²) des bassins-versants à l'étude.

Tableau 2.3 – Classes de pente des bassins-versants et nombre de bassins appartenant à chaque classe.

Classe de pente S_b (%)	Nombre de bassins
< 3	22
3 > 8	36
8 > 13	27
> 13	16
Total	101

Finalement, la sinuosité correspond au rapport entre la longueur du cours d'eau (km) et la longueur du bassin-versant (km). Il s'agit d'une caractéristique permettant d'établir le caractère méandrique d'un cours d'eau. La longueur de bassin-versant est estimée en traçant une ligne passant par l'exutoire, le centroïde et l'intersection entre la partie amont du cours d'eau et l'extrémité du bassin-versant. Elle est généralement utilisée pour estimer la largeur caractéristique (*Width*) d'un bassin (Fang *et al.*, 2008; James *et al.*, 2010). Une valeur de sinuosité de 1 signifie que le cours d'eau s'écoule en ligne droite. La Figure 2.6 montre que les bassins-versants ayant une forte sinuosité sont généralement caractérisés par des pentes faibles alors que les bassins-versants ayant une pente très forte ont généralement une faible sinuosité. La Figure 2.7 présente, quant à elle, deux bassins-versants avec un indice de sinuosité élevé et faible.

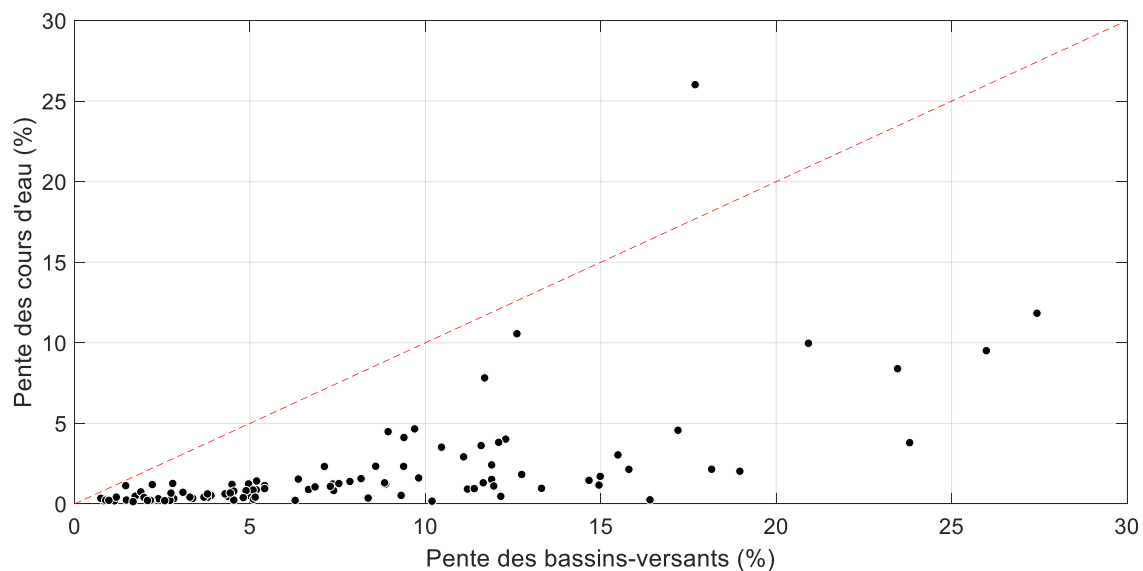


Figure 2.4 – Comparaison des pentes des bassins-versants (%) et des pentes des cours d'eau (%) correspondantes.

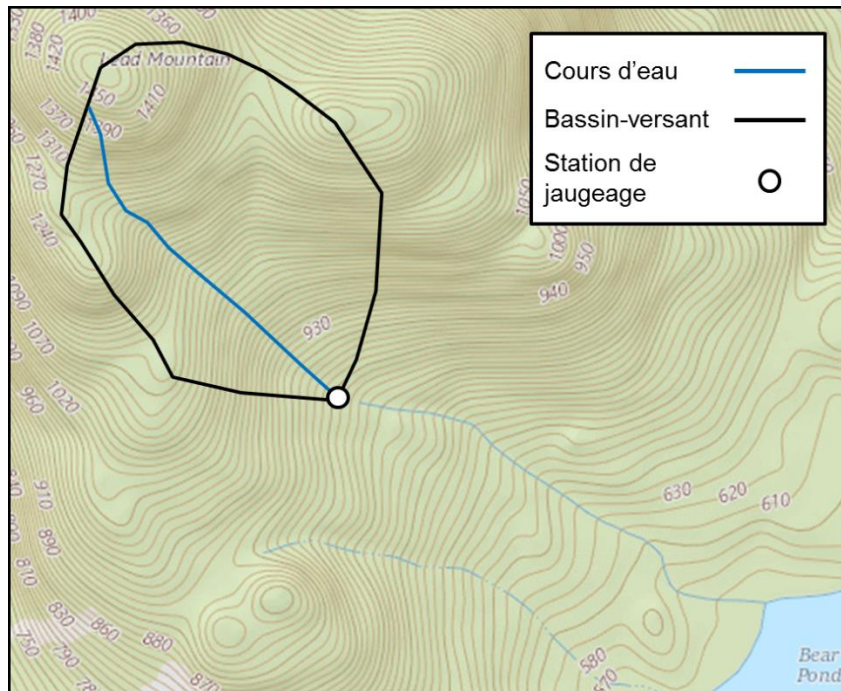


Figure 2.5 – Représentation grossière du bassin-versant associé à la station hydrométrique 01022294 située dans le Maine (Lat. 44.859, Long. -68.104) et cours d'eau correspondant (Courbes de niveau : 10 pieds, Carte topographique : <https://viewer.nationalmap.gov>), Source : Samuel Bolduc.

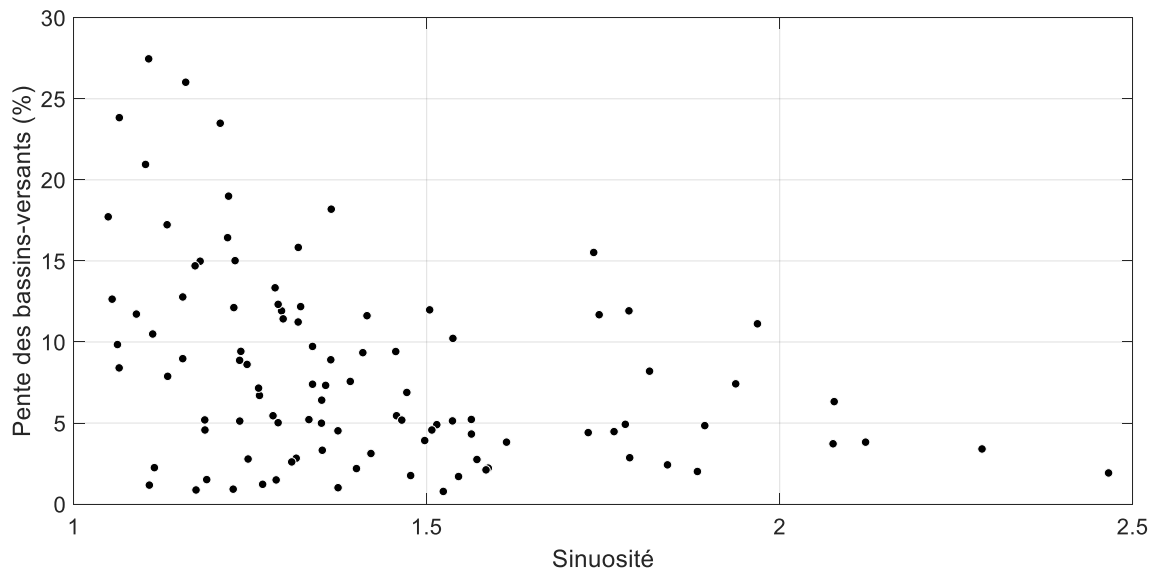


Figure 2.6 - Relation entre la sinuosité des cours d'eau et la pente des bassins-versants (%) à l'étude.

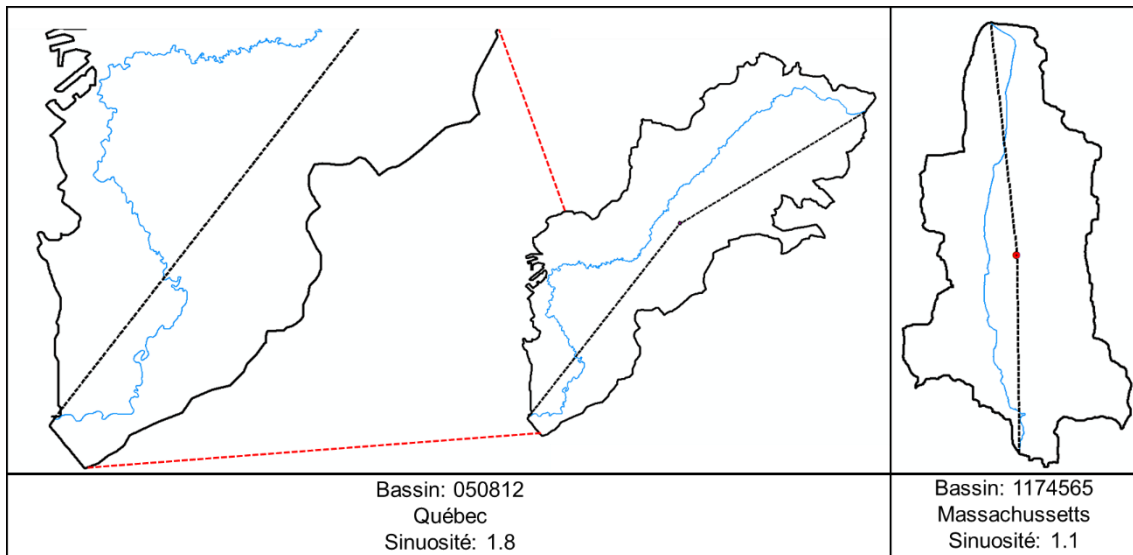


Figure 2.7 – Exemple de bassin-versant avec une sinuosité élevée (1.8 pour le bassin 050812 situé au Québec) et avec une sinuosité faible (1.1 pour le bassin 1174565 situé au Massachusetts), la ligne pointillée noire représente longueur des bassins-versants et passe par l'exutoire, le centroïde et l'intersection entre la partie amont du cours d'eau et l'extrémité du bassin-versant.

Les types de sols présents dans chaque bassin-versant sont très diversifiés tel que le montre la Figure 2.8 (le Tableau B.2 de l'Annexe B présente la répartition des types de sols de chacun des bassins-versants sous étude). Cette figure présente sous forme de boîte à moustaches (*box-plot*) la distribution des fractions des superficies associées à chaque classe hydrologique pour tous les bassins-versants.

Ainsi, aucun bassin ne contient qu'une seule classe hydrologique (Figure 2.8). Les classes hydrologiques les plus représentées sont CD et C suivi de près par A. Bien que globalement sous-représentées, les classes B et BC occupent une fraction importante du territoire sur certains bassins. La classe AB est quant à elle sous-représentée comparativement aux autres.

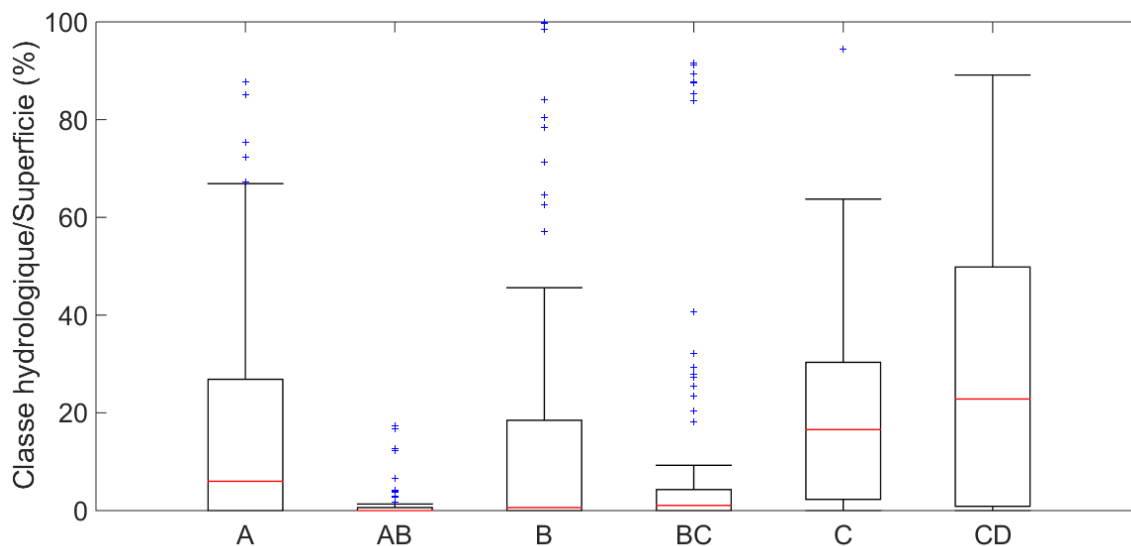


Figure 2.8 – Fraction de la superficie totale des bassins-versants (%) occupée par chacune des classes hydrologiques des sols (ligne rouge : médiane; boîte : 1^{er} (Q1) et 3^e (Q) quartile; moustache : 1.5 fois la distance interquartile (Q3-Q1))

2.3 Bassins-versants : Occupation du territoire

En matière d'occupation du territoire, les bassins-versants sont majoritairement divisés en zones forestières (boisées) et agricoles (cultures et pâturages) (Figure 2.9; l'Annexe C présente l'occupation du territoire de chacun des bassins-versants sous étude). Cette figure présente sous forme de boîte à moustache (*box plot*) la distribution des fractions des superficies associées à chaque occupation du sol pour tous les bassins-versants. L'occupation du territoire qui domine globalement est forestière. Quatre bassins-versants sont entièrement forestiers et 50 % des bassins ont une couverture forestière supérieure à 74 %. Pour certains bassins, la culture occupe une place importante. Dix bassins-versants ont d'ailleurs une occupation du territoire de type culture couvrant plus de 50 % de leur superficie. Les zones de pâturages sont quant à elles globalement moins présentes que les cultures bien que les médianes des distributions pour ces deux occupations soient similaires. La superficie associée au milieu urbain n'occupe jamais plus de 20 % de la superficie totale pour aucun des bassins. Il est important de mentionner qu'il s'agit majoritairement de zones urbaines de faible densité. La Figure 2.10 montre en exemple le bassin-versant où la superficie associée au milieu urbain est la plus élevée (17 %).

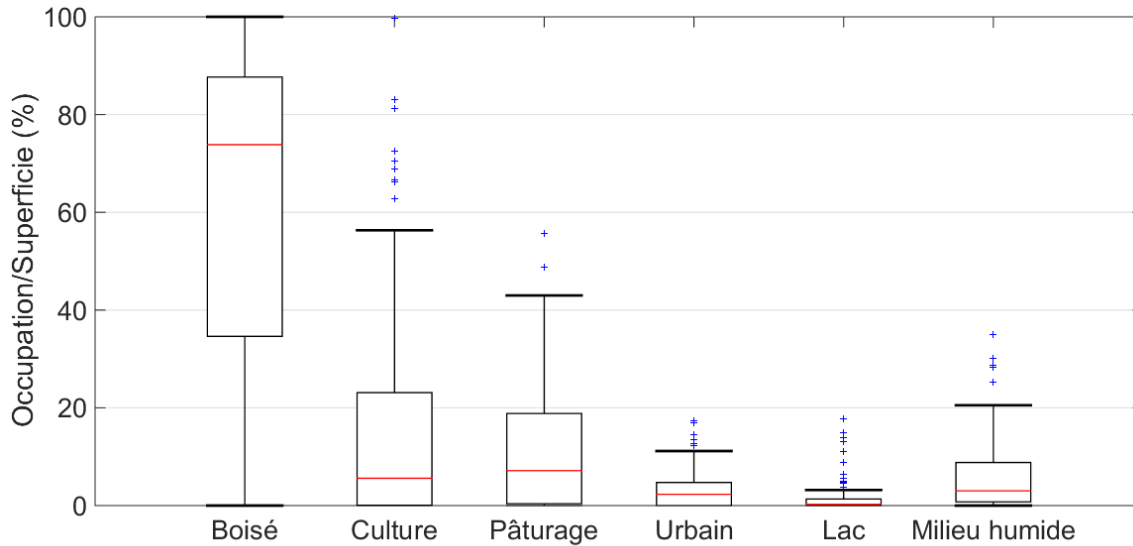


Figure 2.9 – Fraction de la superficie des bassins appartenant à chacune des classes d’occupations du territoire (ligne rouge : médiane; boîte : 1^{er} (Q1) et 3^e quartile (Q3); moustache : 1.5 fois la distance interquartile (Q3-Q1)).

Tout comme pour les zones urbaines, les superficies associées aux lacs ne dépassent jamais 20 %. Pour la majorité des bassins-versants (72/101), les lacs représentent moins de 1 % de la superficie totale. Tout de même, pour 11 bassins-versants les lacs couvrent plus de 5 % du territoire. La Figure 2.11 donne un exemple de bassins-versants pour lesquels les lacs représentent 5, 11 et 18 % de la superficie totale. Les milieux humides (MH) sont quant à eux mieux représentés. Pour un peu plus de 20 % des bassins à l’étude, les MH couvrent une superficie supérieure à 10 %. De plus, pour certains bassins, cette couverture peut atteindre jusqu’à plus de 20 %. La Figure 2.12 montre deux bassins-versants où les MH représentent 20 et 30 % de la superficie totale.

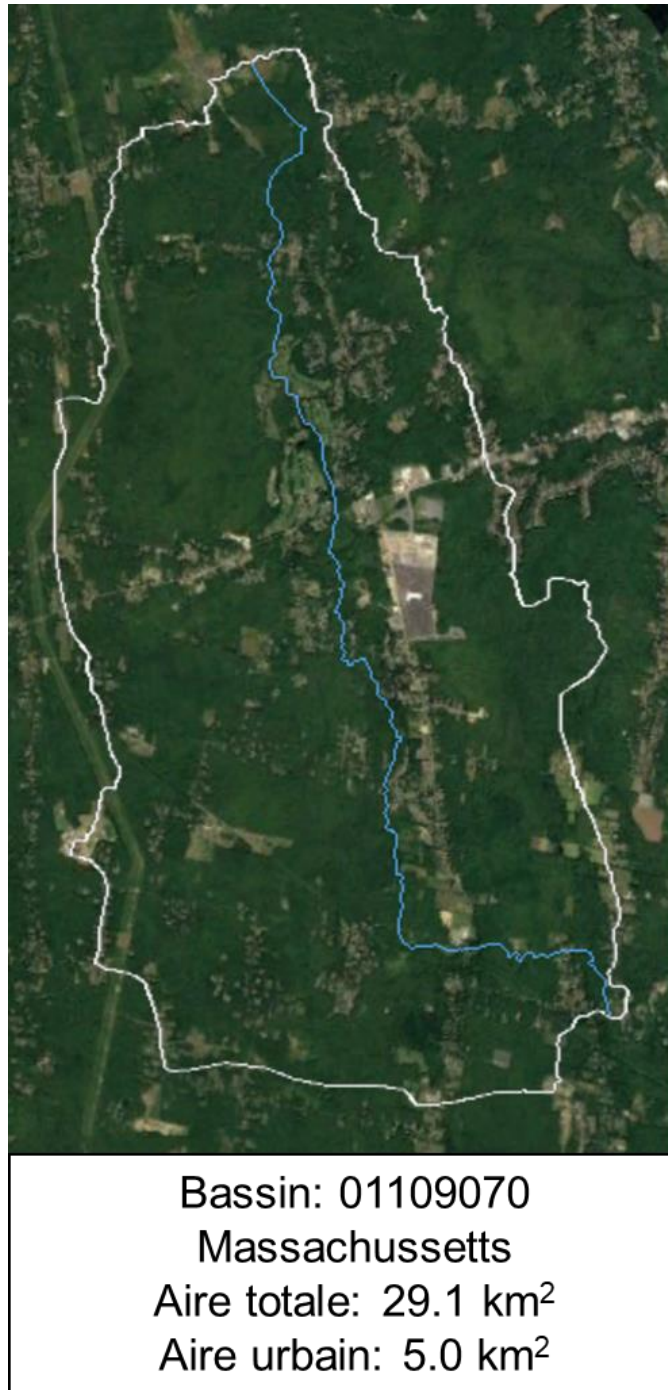


Figure 2.10 – Bassin-versant (01109070) où les zones urbanisées représentent 17 % de la superficie totale (Source : Samuel Bolduc).

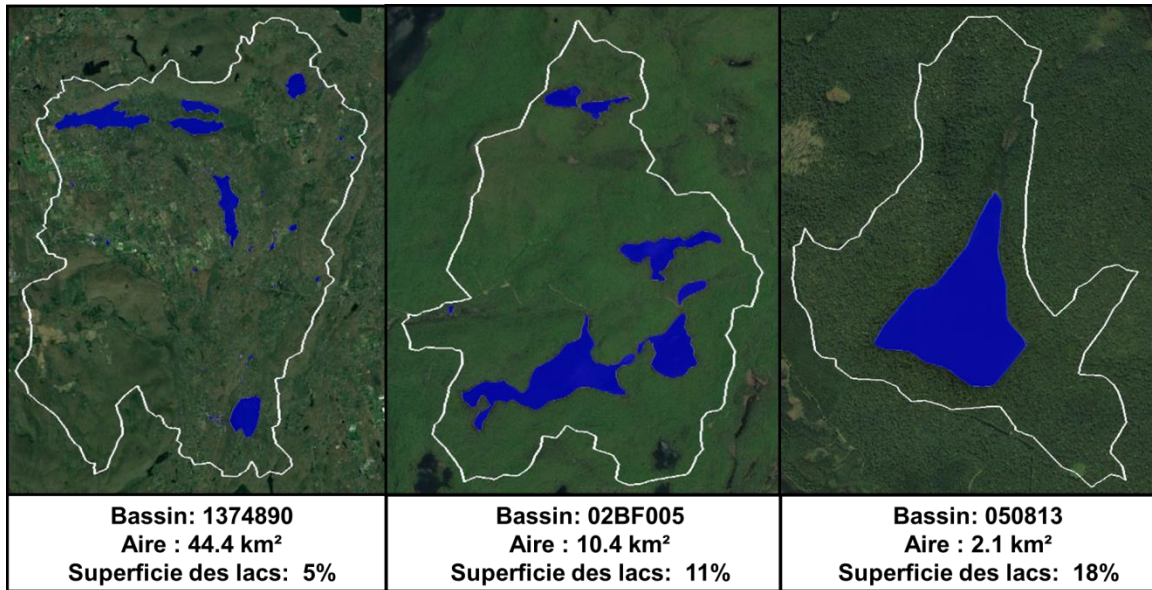


Figure 2.11 – Exemple de bassins-versants où les lacs (bleu) représentent 5, 11 et 18 % de la superficie totale (Source : Samuel Bolduc).

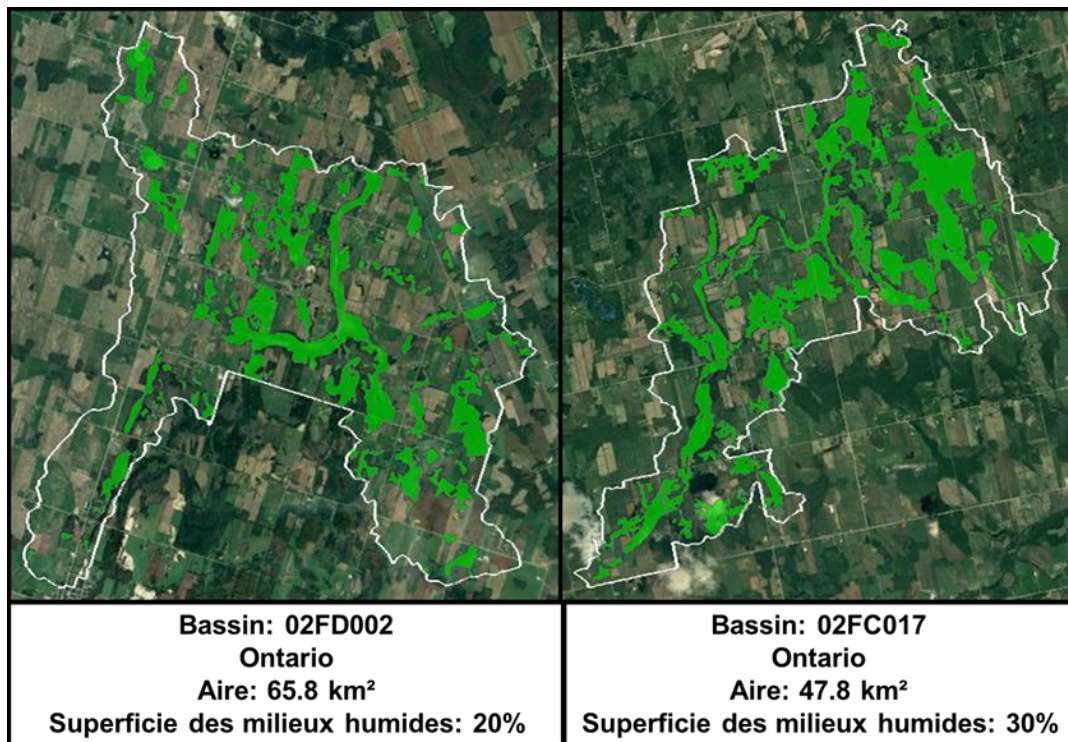


Figure 2.12 - Exemple de bassins-versants où les milieux humides (vert) représentent 20 et 30 % de la superficie totale (Source : Samuel Bolduc).

Chapitre 3. Données de débit et de précipitation

Le Chapitre 3 présente l'ensemble des données de débit et de précipitation utilisées pour les analyses présentées dans les chapitres ultérieurs. La Section 3.1 présente les critères de sélections des données de débit et la Section 3.2 explique comment les maxima annuels ont été extraits. La Section 3.3 explique comment les quantiles de débit ont été estimés pour diverses périodes de retour et finalement, la Section 3.4 présente les stations météorologiques retenues et associées à chacun des bassins-versants à l'étude.

3.1 Traitement des données de débit

Les séries de débit des 101 bassins-versants présentés au Chapitre 2 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 au mois de mai comparativement 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 se fait en eaux libres. Un minimum de 10 années valides se justifie considérant les périodes de retour généralement utilisées pour la conception de ponceaux (10, 25 et 50 ans). L'Annexe D présente les caractéristiques des séries disponibles aux 101 bassins-versants à l'étude.

3.2 Extraction des séries des maxima annuels et analyse de tendances

Les débits maxima annuels ont ensuite été extraits des séries de débits disponibles en chaque site pour les années valides. Les maxima annuels ainsi extraits correspondent donc aux séries des débits maximum enregistrés pendant la période du 1^{er} juin au 31 octobre de chaque année valide à un site donné.

L'analyse fréquentielle permettant d'estimer les débits maxima annuels de différentes période de retour 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 a été vérifiée en utilisant le test de Mann-Kendall (voir Meylan *et al.*, 2008 pour une description de ce test). 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 maxima annuels disponibles et l'hypothèse de stationnarité vérifiée en appliquant le test de Mann-Kendall au seuil de 95 %. Le Tableau D.1 de l'Annexe D présente le résultat du test de Mann-Kendall pour les 101 sites. Aucune des séries des maxima annuels à ces stations ne présente de tendances significatives au seuil de 5% puisque les stations et les bassins correspondants, présentant de telles tendances n'ont pas été retenus dans l'étude (voir Mailhot *et al.*, 2016b pour les résultats de ces analyses).

3.3 Estimations des quantiles de débits pour diverses périodes de retour

Les séries des débits maximums annuels disponibles aux différents bassins retenus ont été analysées afin d'estimer les quantiles correspondants pour les périodes de retour 2, 5, 10 et 25 ans qui seront par la suite comparés aux débits estimés à partir de la méthode rationnelle. Le Tableau E.1 de l'Annexe E résume les informations pertinentes sur les séries des maxima annuels disponibles aux différents sites retenus.

Trois distributions ont été considérées pour représenter les séries des débits maximum annuels : 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 E.1 présente pour chacun des sites la distribution sélectionnée, les valeurs de paramètres estimées et les débits maximum annuels correspondant aux périodes de retour 2, 5, 10 et 25 ans. Il est important de noter que des modifications pourraient être apportées quant à la distribution retenue puisque dans certains cas, les débits de pointe pour les grandes périodes de retour semblent être surestimés (voir Section 8.1).

L'examen du Tableau E.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 101 bassins-versants retenus ont été soumis à un examen visuel à partir des graphiques quantile-quantile (aussi connus sous leur dénomination anglaise *Q-Q plots*). 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).

3.4 Stations météorologiques et données de précipitation

Pour les analyses ultérieures, notamment celles associées au temps de concentration (Chapitre 6), les stations météorologiques les plus près de ces sites et pour lesquelles on dispose de courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) ont été identifiées. Ces courbes IDF ont été estimées dans le cadre du projet *Mise à jour de certains paramètres du Manuel de conception des ponceaux et des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF)* (voir Mailhot *et al.*, 2014a,b). Le Tableau F.1 de l'Annexe F présente les stations météorologiques associées à chacun des sites retenus et la distance qui sépare les stations hydrométriques des stations météorologiques.

Chapitre 4. Méthode rationnelle : origines et hypothèses

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 4.1 détaille l'origine de la MÉRA, les critiques à son égard et les raisons qui font que cette méthode est encore utilisée en 2017. La Section 4.2 présente les hypothèses qui sous-tendent cette approche et discute du bien-fondé de son utilisation en milieu naturel par opposition au milieu urbain.

4.1 La méthode rationnelle, 125 ans plus tard

L'origine de la MÉRA, bien qu'elle reste 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 :

$$Q = \frac{C I_p A}{360} \quad (4.1)$$

où Q est le débit (en m³/s), I_p l'intensité de la précipitation (en mm/h), A la superficie du bassin-versant considéré (en hectares) et C est le coefficient de ruissellement (adimensionnel). L'interprétation que l'on peut donner du coefficient de ruissellement varie selon les auteurs. L'approche traditionnelle ou déterministe veut que le coefficient de ruissellement exprime la relation entre le volume de ruissellement et le volume de pluie pour chaque événement de pluie (coefficient de ruissellement volumétrique, C_v; Wong 2002; Dhakal *et al.*, 2012). Une seconde interprétation, dite probabiliste, consiste à dire que cette valeur correspond au rapport du débit de pointe de ruissellement et de l'intensité maximale sur une durée égale au temps de concentration du bassin-versant (Dhakal *et al.*, 2012) :

$$C = \frac{Q}{I_p} \quad (4.2)$$

Il est alors question du coefficient de ruissellement rationnel (C_R). L'interprétation que l'on donne au coefficient de ruissellement conditionne donc le sens et l'utilisation que l'on peut faire de l'équation (4.1) et des variables qu'elle contient, de même que la façon dont on peut évaluer ce coefficient.

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 coefficient de ruissellement est interprété dans un sens probabiliste. C'est également ce qui est mentionné dans Pilgrim et Cordery (1993) et la MÉRA aurait d'ailleurs été initialement développée dans cet esprit (Kuichling, 1889 ; French *et al.*, 1974 ; Dhakal *et al.*, 2012). Cette interprétation probabiliste de la MÉRA qui établit une relation entre le débit de pointe de période de retour donnée et le produit de l'intensité de la précipitation, de même périodes de retour, et la superficie d'un bassin-versant, aurait été initialement proposée par Horner et Flynt (1936). Elle aurait été un peu oubliée par la suite jusqu'aux travaux de Schaake *et al.* (1967), portant sur des bassins-versants en milieu urbain, et de French *et al.* (1974), qui se sont intéressés à des bassins-versants 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 coefficient de ruissellement est dit volumétrique (C_V) 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 bassins-versants 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.

Plus récemment, Grimaldi et Petroselli (2015) ont publié un article questionnant l'utilité de la MÉRA considérant les avancées dans plusieurs champs d'expertise, notamment l'analyse de terrain à partir de couches d'information géographiques. Ceux-ci ont alors proposé une nouvelle procédure qui nécessite globalement les mêmes informations que la MÉRA. Selon Grimaldi et Petroselli (2015), leur approche permettrait de remplacer la MÉRA et diminuerait la subjectivité associée à l'évaluation du coefficient de ruissellement (voir Section 6.1). Il est important toutefois de mentionner que les conclusions de ces auteurs ne sont basées que sur les résultats obtenus pour un seul bassin-versant. De plus, Grimaldi et Petroselli (2015) mentionnent que la méthodologie qu'ils proposent est plus complexe que la MÉRA et qu'elle implique, elle aussi, certains

choix de la part de l'utilisateur. Il est dès lors justifié de se questionner sur la pertinence de nouvelles approches en regard des efforts supplémentaires nécessaires pour leur mise en œuvre.

4.2 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 d'une distribution uniforme sur un bassin-versant, 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, la période de retour du débit de pointe est identique à celle de la précipitation.
- Le taux maximal de ruissellement est une fraction du taux de précipitation. La relation est donc linéaire entre le débit et la précipitation.
- Le coefficient de ruissellement est le même pour des précipitations de différentes périodes de retour et pour tout événement de précipitation sur un même bassin-versant.
- Le temps de concentration est toujours le même pour un bassin-versant donné.
- La MÉRA ne tient pas compte de l'emmagasinement des eaux en surface (TDT, 2014).

Il est important de mentionner que ces hypothèses sont valides pour des petits bassins-versants 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 coefficient de ruissellement 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 coefficient de ruissellement, 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.

Ainsi :

- Le coefficient de ruissellement peut varier en fonction de l'intensité de la pluie et il sera d'autant plus grand que la période de retour est élevée, mais également en fonction des conditions antérieures d'humidités et des saisons (voir Section 7.8).
- L'influence des conditions hydrologiques antérieures et des saisons sur le coefficient de ruissellement implique que des événements de même période de retour et de

même durée ne généreront pas nécessairement des débits de pointe semblables (voir Section 7.8).

- Les milieux naturels sont souvent caractérisés par la présence de lacs et milieux humides qui ont un impact important sur le régime hydrologique d'un bassin-versant (voir Section 7.6).
- Il n'existe pas de temps de concentration unique pour un bassin-versant donné. Le temps de concentration peut varier selon les caractéristiques de la précipitation (durée, intensité, répartition spatiale et temporelle, etc.; voir Chapitre 6).

Chapitre 5. Superficie des bassins-versants

Ce chapitre présente le cadre d'application de la MÉRA en ce qui concerne la taille des bassins-versants (Section 5.1) et compare par la suite différentes approches pour estimer la superficie d'un bassin-versant (Section 5.2). La Section 5.3 présente quant à elle les recommandations relatives à l'estimation des superficies des bassins versants dans le cadre de l'application de la MÉRA.

5.1 Application de la méthode rationnelle

Plusieurs auteurs mentionnent que la MÉRA ne devrait être utilisée que pour de petits bassins-versants. Ainsi selon ASCE et WPCF (1969), la MÉRA, correctement appliquée, permet de donner des résultats satisfaisants pour les petits bassins-versants. Wanielista *et al.* (1997) affirment quant à eux que les hypothèses de la MÉRA sont raisonnables pour des bassins-versants dont le temps de concentration est inférieur à 20 minutes.

L'un des principaux arguments en faveur de l'utilisation de la MÉRA pour de petits bassins-versants, provient du fait que la répartition spatiale des précipitations sur de grands bassins-versants a une plus grande probabilité de ne pas être uniforme (Rossmiller, 1980; Ponce, 1989). Ainsi, la MÉRA, qui considère une distribution uniforme de la précipitation, pourrait conduire à une surestimation des débits de pointe (Hoang, 1979, Pilgrim et Cordery, 1993). À ce sujet, Cleveland *et al.* (2011) affirment que l'assertion selon laquelle la MÉRA surestime les débits de pointe fait presque consensus. Madramootoo (1989) a d'ailleurs rapporté le même constat au Québec pour un bassin-versant rural de 8,1 km².

Concernant la superficie des bassins-versants, ASCE et WPCF (1969) indiquent que les principes de base de la MÉRA peuvent s'appliquer à de grands bassins-versants mais que les guides pratiques limitent généralement son application à des bassins-versants de moins de 13 km². C'est le cas notamment du guide provenant de *Colorado State University* (Heimstra et Reich, 1967). Brutsaert (2005), abonde dans le même sens en affirmant qu'en pratique, la MÉRA est généralement utilisée pour des bassins-versants de moins de 15 km².

D'autres sources suggèrent une application encore plus restreinte de la MÉRA. Selon Hannon (1980), la MÉRA peut être appliquée à des bassins-versants de superficies généralement comprises entre 0,9 et 1,4 km² en fonction du degré d'urbanisation. Ceux-ci mentionnent que plus un bassin-versant est urbanisé, plus sa superficie devrait être petite et qu'un bassin-versant entièrement urbain ne devrait pas avoir une superficie supérieure à 0,3 km². Dans le même ordre d'idée, TDT (2014) restreint l'utilisation de la MÉRA à des bassins-versants urbains et ruraux dont la superficie ne dépasse pas 1 km² (200 acres).

Pour Young et McEnroe (2014), l'application limitée de la MÉRA à de très petits bassins-versants provient d'une mauvaise perception. À l'origine, Kuichling (1889) ne suggère aucune limite quant à la superficie des bassins-versants. À cet effet, celui-ci mentionne que pour les grands bassins-versants, une analyse plus élaborée, visant à identifier les conditions sous lesquelles les débits de pointe surviennent, est nécessaire, mais que la méthode reste la même. Pilgrim et Cordery (1993) affirment pour leur part que plusieurs études ont démontré l'applicabilité de la MÉRA à de plus gros bassins-versants. Young *et al.* (2009) appuie cette dernière affirmation en précisant toutefois que les bassins-versants ne doivent pas être régulés.

French *et al.* (1974) ont démontré que lorsque la MÉRA est utilisée pour estimer des débits de pointe avec une approche à base fréquentielle, elle pouvait être appliquée sur des bassins-versants ruraux dont la superficie peut être supérieure à 250 km². Selon Pilgrim et Cordery (1993), la MÉRA est largement utilisée pour estimer des débits de pointe sur de petits (< 25 km²) et moyens (< 500 km²) bassins-versants ruraux. De plus, de multiples études récentes ont porté sur l'amélioration de l'utilisation de la MÉRA pour des bassins-versants pouvant atteindre 80, 320 voire 440 km² (Young *et al.*, 2009; Dhakal *et al.*, 2012; Dhakal *et al.*, 2013a,b).

Il est important également de mentionner les résultats de McEnroe *et al.* (2007) et Young *et al.* (2009). Ces derniers ont observé une très faible corrélation entre le coefficient de ruissellement et la superficie de bassins-versants de moins de 78 km². Ce constat, également rapporté par Young et McEnroe (2014), suggère que la MÉRA peut être appliquée sur des bassins-versants dont la superficie peut atteindre environ 80 km². Ceux-ci ont développé des équations fréquentielles régionales des débits de pointe (*regional flood-frequency equations*) au Kansas (E.U.) qui ont une forme similaire à l'équation de la MÉRA. Une régression entre les valeurs de coefficients de ruissellement et les précipitations annuelles moyennes a ensuite été estimée. Ces régressions prennent la forme suivante pour la période de retour 25 ans :

$$C_R = a P^K \quad (5.1)$$

où a et K sont des constantes et P est la précipitation annuelle moyenne. Young et McEnroe (2014) concluent que cette équation peut être utilisée pour des bassins-versants ruraux, situés au Kansas, avec un écoulement non régulé et dont la superficie est inférieure à 80 km².

Toutes les études n'arrivent toutefois pas aux mêmes conclusions. Ainsi, Nouh (1989), cité dans Cleveland *et al.* (2011), ont montré que la MÉRA ne s'appliquait pas, tant pour des bassins-versants de moins de 200 km² que pour de très grands bassins-versants (> 4000 km²) situés en régions montagneuses de l'Arabie Saoudite.

En résumé, de nombreuses sources suggèrent d'appliquer la MÉRA à des bassins-versants dont la superficie ne dépasse pas environ 15 km² et même dans certains cas 1 km². Toutefois, les arguments avancés pour imposer une pareille limite sont discutables. Plusieurs arguments jouent en faveur d'une utilisation de la MÉRA pour des bassins-versants plus grands. L'absence de relation entre le coefficient de ruissellement et la superficie du bassin-versant en est certainement un. Il reste tout de même difficile d'établir une limite précise à partir des informations actuelles et ce que les différentes sources suggèrent (15, 25, 80, 250, 320, 440 et 500 km²).

5.2 Estimation de la superficie des bassins-versants

Dans le cadre de ce projet, plus d'une centaine de bassins-versants ont été délimités. Il est important de noter que le bassin-versant correspond dans ce contexte à la délimitation topographique des surfaces alimentant une section considérée d'un cours d'eau (Roche *et al.*, 2012). Il regroupe alors toutes les surfaces qui, par ruissellement, vont contribuer à l'écoulement du cours d'eau. Le bassin-versant topographique peut être différent du bassin-versant d'alimentation qui lui inclut également les approvisionnements provenant des nappes phréatiques (Roche *et al.*, 2012). Ces bassins-versants ont été délimités par différentes personnes, de façon manuelle et/ou automatique et un même bassin-versant peut avoir été tracé par différentes personnes à des fins de comparaisons. Les points suivants décrivent les principaux constats suite à ce travail :

1. Malgré les différentes techniques existantes visant à délimiter automatiquement un bassin-versant, la délimitation manuelle ne doit pas être exclue catégoriquement. Elle oblige notamment l'estimateur à porter une attention particulière aux différentes particularités inhérentes à chaque bassin-versant.
2. Bien que le Lidar ait une résolution plus fine que le modèle numérique de terrain (MNT) et les cartes topographiques, ces dernières ne doivent pas être laissées pour compte. Dans certains cas, où la topographie est très complexe, une résolution plus grossière permet de mieux visualiser les lignes de contour d'un bassin-versant. Dans des zones au relief plat, par exemple, en présence de milieux humides, les cartes topographiques peuvent s'avérer très utiles. L'utilisation du MNT et des cartes topographiques pour valider une délimitation réalisée à partir du Lidar peut également être très utile.
3. L'utilisation d'un modèle pour délimiter un bassin-versant doit être suivie d'une vérification des limites produites, notamment en présence de milieux humides, de routes ou de chemins forestiers et de fossés de drainage. Il est important également de mentionner que de nombreuses irrégularités peuvent se glisser dans les MNT et les données Lidar, lesquelles peuvent mener à des erreurs générées par le modèle.

4. L'utilisation du Lidar, dans la délimitation automatique d'un bassin-versant, peut demander beaucoup de temps, en raison de la fine résolution spatiale, sans que le résultat soit nécessairement meilleur qu'avec le MNT.
5. En zones agricoles, l'outil Info-Sol du Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ)² s'avère très utile en cas de questionnement quant aux délimitations réelles du bassin-versant qui peuvent aller à l'encontre de la topographie en raison du drainage anthropique. Cet outil permet d'accéder à plusieurs couches d'information (p. ex. les plans de drainage et le cadastre) sur le territoire agricole pour l'ensemble des régions du Québec. Il fonctionne à l'échelle de la parcelle agricole et comprend des fonctions permettant notamment de délimiter un bassin-versant et de faire des profils d'élévation. La Figure 5.1 donne un exemple de bassin-versant délimité à partir de l'outil Info-Sol.

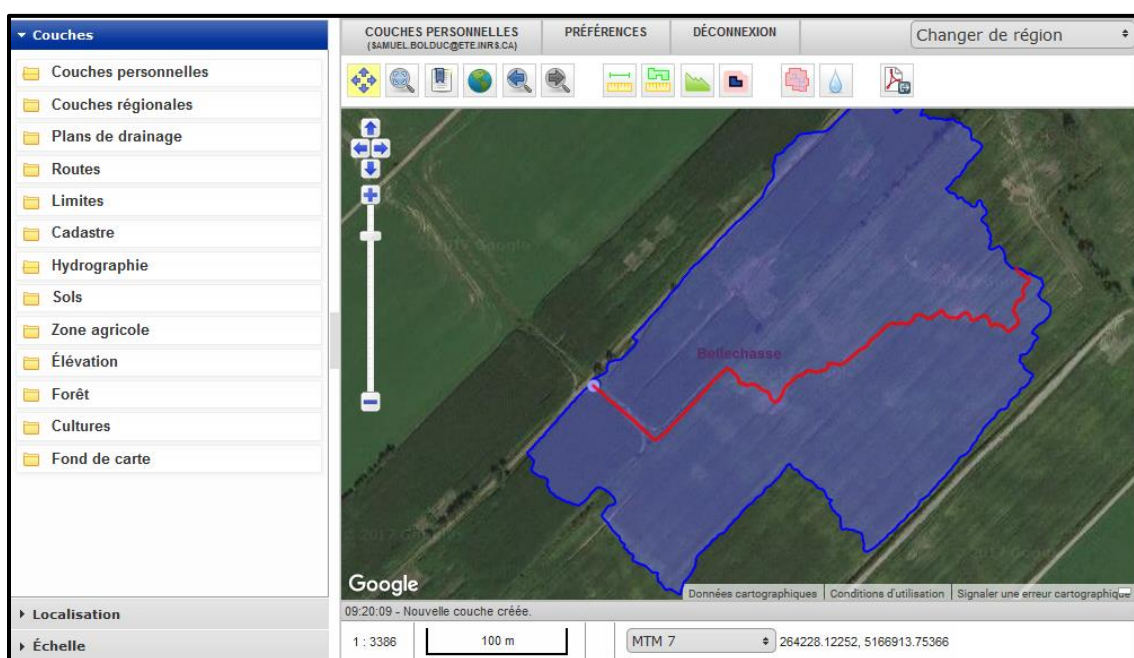


Figure 5.1 - Bassin-versant délimité à partir de l'outil Info-Sol du MAPAQ et couches d'information disponibles.

² Info-Sol : <http://www.info-sols.ca/>

6. En présence de milieux humides, la couche détaillée des milieux humides, faite par le Ministère du développement durable de l'environnement et de la lutte aux changements climatiques (MDDELCC) et Canards Illimités s'avère être l'outil de prédilection. Mme Geneviève Dufour Tremblay du MDDELCC peut d'ailleurs être contactée à ce sujet³. Puisque cette couche ne couvre pas tout le Québec, l'inventaire annuel des cultures (IAC) d'AAC (Agriculture et Agroalimentaire Canada) peut également être consulté⁴. Cet inventaire permet d'identifier les différentes occupations du sol avec une précision d'au moins 85 % considérant une résolution spatiale de 30 m. La Figure 5.2 et la Figure 5.3 montrent la couverture de la couche détaillée des milieux humides et de l'IAC. Finalement, la couverture du sol «circa 2000» est également un produit pouvant être utilisé pour la délimitation des milieux humides⁵. L'index de cette couche peut être ouvert notamment sur Google Earth où chacun des produits peut par la suite être téléchargé en cliquant sur la tuile voulue.

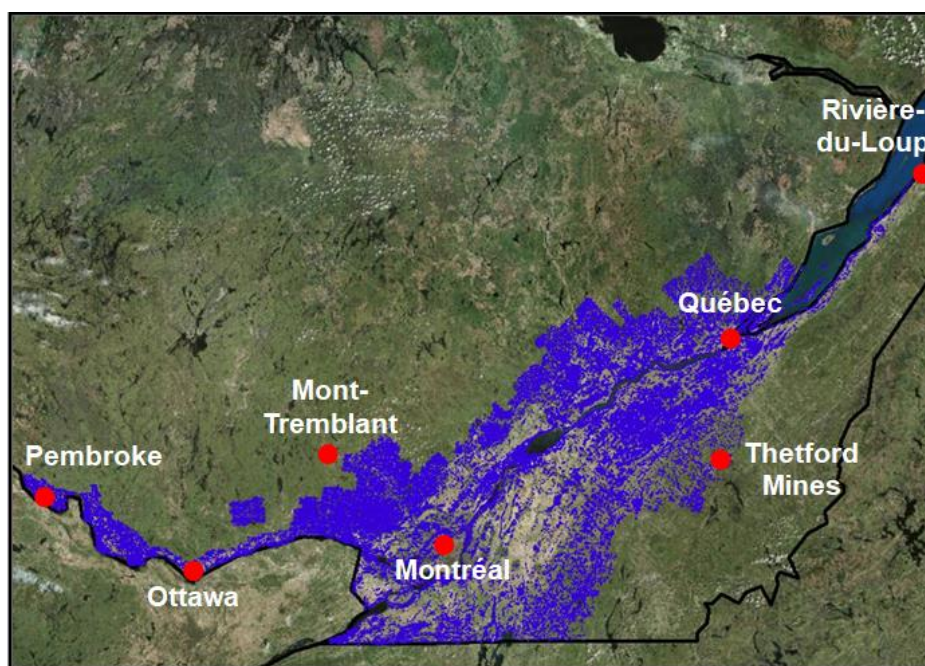


Figure 5.2 – Territoire couvert par la couche détaillée des milieux humides du MDDELCC et de Canards Illimités (Source : Samuel Bolduc).

³ Geneviève Dufour Tremblay : genevieve.dufourtremblay@mdelcc.gouv.qc.ca

⁴ IAC : <http://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/ba2645d5-4458-414d-b196-6303ac06c1c9>

⁵ CIRCA: <https://open.canada.ca/data/en/dataset/97126362-5a85-4fe0-9dc2-915464cfd7bb7>

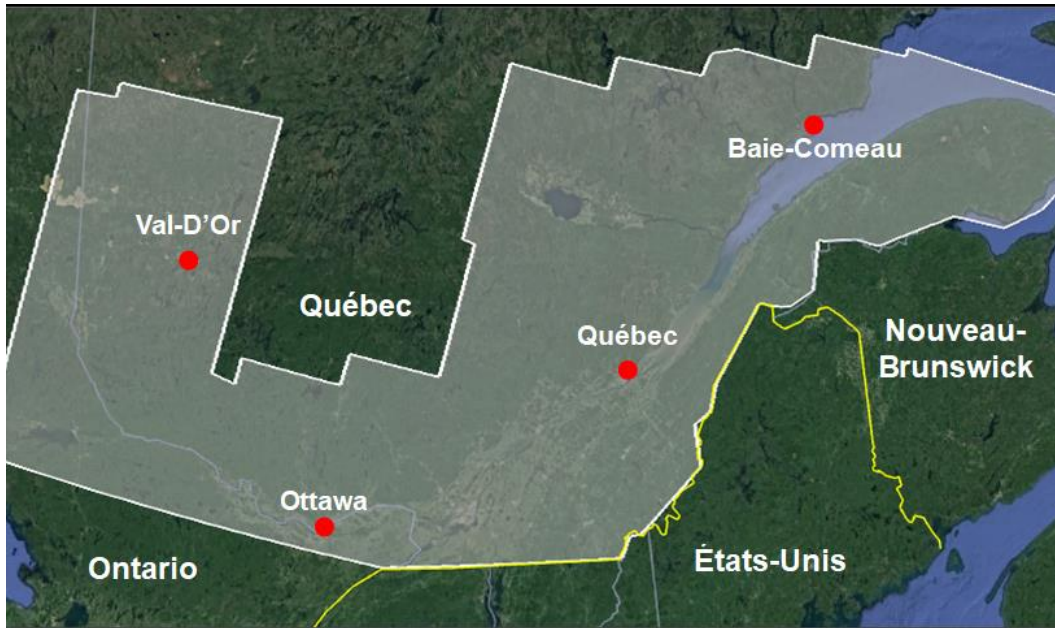


Figure 5.3 – Territoire couvert par l'inventaire annuel des cultures d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (Source : Samuel Bolduc).

5.3 Recommandations

Les recommandations suivantes sont formulées quant au domaine d'application de la MÉRA et à l'estimation des superficies des bassins-versants dans le cadre de l'application de la MÉRA :

1. Étendre le domaine d'application de la méthode rationnelle à des bassins-versants allant jusqu'à 80 km². Des études récentes ont conclu que la MÉRA peut être utilisée pour des bassins-versants ruraux avec un écoulement non régulé et dont la superficie est inférieure à 80 km² (voir Section 5.1).
2. Privilégier la délimitation automatique des bassins-versants afin de diminuer le temps requis à cette étape.
3. Valider la délimitation des lignes de contour des bassins-versants lorsque des méthodes d'automatisation sont employées. Pour ce faire, utilisez conjointement les cartes topographiques, les données Lidar, les MNT ou encore l'outil Info-Sol.
4. Porter une attention particulière aux milieux humides et utiliser les informations disponibles à ce sujet (couche détaillée des milieux humides, IAC et circa 2000).

Chapitre 6. Temps de concentration

Le temps de concentration (T_C) est un paramètre de temps couramment utilisé pour caractériser le temps caractéristique de la réponse hydrologique d'un bassin. Plusieurs définitions conceptuelles ou théoriques ont été proposées pour définir le temps de concentration T_C :

- Temps que mettrait une goutte d'eau pour parcourir la distance entre le point le plus en amont et l'exutoire d'un bassin-versant (Rossmiller, 1980 ; Pilgrim et Cordery, 1993 ; Roche *et al.*, 2012);
- Temps requis pour que le ruissellement, provenant de la pluie nette⁶ avec une distribution spatiale et temporelle uniforme sur un bassin-versant, contribue au débit de pointe (Gericke et Smithers, 2014).

La réponse hydrologique d'un bassin-versant peut également être associée à d'autres paramètres de temps dont le temps de réponse (*lag time*) et le temps de montée (*time to peak*). Roche *et al.* (2012) définissent le temps de réponse de la façon suivante : « décalage temporel observé sur des crues simples entre le pic d'intensité des pluies et la pointe de crue ». Pour ce qui est du temps de montée, Rocha Medrano (2014) le définit comme le temps que prend le débit depuis le début du ruissellement de surface pour atteindre son maximum.

Plusieurs équations empiriques ont été proposées pour estimer ces trois temps (Gericke et Smithers, 2014). Ces équations empiriques ont été développées à partir d'hydrogrammes et de hyétogrammes. Divers points caractéristiques de ces hydrogrammes et hyétogrammes sont ensuite identifiés (p. ex. le début de la pluie nette ou le début du ruissellement direct et l'occurrence de l'intensité maximale de la pluie ou du débit de pointe) et utilisés pour calculer ces divers temps (temps de concentration, de réponse ou de montée que nous désignerons dans ce qui suit de façon globale par 'temps caractéristique'). Voir la Figure 6.1 à ce sujet.

Plusieurs méthodes d'estimation des temps caractéristiques, à partir des hydrogramme/hyétogramme, ont été proposées. Ainsi Singh (1984, 1988) a recensé 17 méthodes d'estimation. Toutefois, en raison du manque d'uniformité dans le vocabulaire utilisé en hydrologie (McCuen, 2009; Gericke et Smithers, 2014), une méthode d'estimation peut être associée à plus d'un temps caractéristique. Les équations de Ramser (Ramser, 1927) et de Kirpich (Kirpich, 1940) en sont de bons exemples. Ces

⁶ La pluie nette est la partie de l'averse qui atteint un cours d'eau par écoulement direct (Organisation météorologique mondiale).

équations sont associées au temps de concentration encore aujourd’hui (Grimaldi *et al.*, 2012; Gericke et Smithers, 2014) alors que la méthode d’estimation utilisée est celle associée au temps de montée (*the time needed for the flow to change from the lowest stage to the highest stage*). Dans ce contexte et pour éviter toutes confusions, seule l’expression «temps de concentration» sera retenue pour discuter des équations empiriques, peu importe la méthode d’estimation utilisée pour leur développement.

Dans le cadre de ce projet, 14 équations empiriques ont été retenues pour les analyses ultérieures : 1) Espey-Morgan; 2) FAA-1; 3) FAA-2; 4) Folmar et Miller; 5) Haktanir et Sezen; 6) IRDA; 7) Kirpich; 8) Mimikou; 9) NERC; 10) Sheridan-1; 11) Sheridan-2; 12) Watt-Chow; 13) Williams; 14) Wu. Le Tableau 6.2 résume les principales informations disponibles pour chacune d’entre elles. La Figure 6.1 présente quant à elle les méthodes d’estimation du temps de concentration lorsque cette information est connue. Le Tableau 6.3 présente les formulations des 14 équations. Enfin, la méthodologie utilisée dans Transports Québec (2017) pour estimer le temps de concentration a été également considérée. À noter que le Tableau 6.1 présente les variables se retrouvant dans les équations et leur abréviation.

Les Sections 6.1 à 6.3 donnent plus de détails concernant les équations FAA, Kirpich, Williams. La Section 6.4 décrit la méthodologie du MTMDET et la Section 6.5 explique les raisons qui ont conduit au choix de ces équations empiriques de même que les raisons pour lesquelles plusieurs autres équations ont été rejetées.

Tableau 6.1 – Variables des équations du temps de concentration et abréviations utilisées.

Variable	Abréviation
Aire	A
Longueur du cours d’eau principal	L
Pente du cours d’eau	S _c
Pente moyenne du bassin-versant	S _b
Temps de concentration	T _c

6.1 Équation de la *Federal Airport Association* (FAA)

Cette équation a été développée par la *Federal Aviation Agency* (d’où son nom), aujourd’hui la *Federal Aviation Administration* (FAA, 1970). Selon McCuen *et al.* (1984) et Sharifi et Hosseini (2011), elle est probablement valide pour de petits bassins-versants où l’écoulement de surface ou laminaire domine. Selon Gericke et Smithers (2014), elle est couramment utilisée en milieu urbain pour estimer l’écoulement de surface en raison du coefficient de ruissellement qu’elle intègre. Au Québec, cette équation est utilisée par le MTMDET (Transports Québec, 2017) et en milieu agricole (Guillou, 2012; Rocha Medrano, 2014).

Tableau 6.2 – Résumé des principales informations sur les équations empiriques du temps de concentration retenues.

Équation	Espey-Morgan-Masch (EMM)	FAA-1	FAA-2	Folmar et Miller (FM)	Haktanir-Sezen (HS)	IRDA	Kirpich (K)	
Référence	Espey et al. (1966)	FAA (1970)		Folmar et Miller (2008)	Haktanir et Sezen (1990)	Michaud et al. (2014)	Kirpich (1940)	
Domaine d'application	Agricole	Urbaine		Agricole	Inconnu	Agricole	Agricole	
Nombre de bassins-versants considéré	11	Inconnu		52	10	20	6	
Nombre d'hydrogrammes utilisés	Inconnu	Inconnu		~10000	10	~600	Inconnu	
Caractéristiques des bassins-versants	Localisation	Texas, Oklahoma et Nouveau-Mexique (E-U)	Inconnu		Plusieurs états des É.U.	Anatolie (Turquie)	Québec	Tennessee (E.U)
	Aire (km ²)	0.03 – 18.16	Inconnu		0.01 - 49.9	11 - 9867	3 - 30	0.005 à 0.45
	L ¹ (km ²)	0.37 - 7.62	Inconnu		0.15 - 13.9	5 - 231	2.24 - 16.09	0.11 - 1.2
	S _c ¹ (%)	0.8 - 14.6	Inconnu		Inconnu	Inconnu	0.7 - 26.1	2.7 - 9.8
	S _b ¹ (%)	Inconnu	Inconnu		2.9 - 20	0.4 - 2.7	0.7 - 9	Inconnu
	Occupation	Agricole	Aéroport		Agricole et forestier	Inconnu	Agricole	Agricole
	Autres informations	100% perméable pour tous les bassins				Couvert forestier (2 à 57%)	Couvert forestier (0.3 à 64%)	Couvert forestier (0 à 55%)
Méthode d'estimation du temps de concentration	Durée entre le début de l'écoulement direct et le temps d'occurrence du débit de pointe (Ramser, 1927)	Inconnu		Durée entre le centre de masse de la pluie nette et le temps d'occurrence du débit de pointe (Snyder, 1938)	Durée entre le centre de masse de la pluie nette et le temps d'occurrence du débit de pointe	Durée entre le début de l'écoulement direct et le temps d'occurrence du débit de pointe	Durée entre le début de l'écoulement direct et le temps d'occurrence du débit de pointe	

1. L : longueur du cours d'eau; S_c : Pente du cours d'eau; S_b : pente du bassin-versant.

Tableau 6.2 - Résumé des principales informations sur les équations empiriques du temps de concentration retenues (suite)

Équation		Mimikou (M)	NERC	Sheridan-1 (S-1)	Sheridan-2 (S-2)	Watt-Chow (WC)	Williams (Will)	Wu
Référence		Mimikou (1984)	NERC (1975)	Sheridan (1994)		Watt et Chow (1985)	Williams (1922)	Wu (1963)
Application		Inconnu	Rural	Agricole/Forestier		Agricole/Forestier	Inconnu	Inconnu
Nombre de bassins-versants		11	138	9		44	Inconnu	17
Hydrogrammes considérés		Inconnu	1500	70		Inconnu	Inconnu	Inconnu
Caractéristiques des bassins-versants	Localisation	Grèce	Royaume-Uni	Georgie et Floride (USA)		É.-U., Canada (Ontario et Québec)	Inde	Indiana (E.U)
	Aire (km ²)	202 à 5005	< 500	2.6 - 334		0.005 - 5840	0 - 259	7.4 - 259
	L ¹ (km ²)	Inconnu	Inconnu	2.45 - 41.13		0.1 - 196	Inconnu	2.93 - 51.50
	S _c ¹ (%)	Inconnu	Inconnu	0.1 - 0.4		0.01 - 9	Inconnu	0.1 - 1.0
	S _b ¹ (%)	Inconnu	Inconnu	0.1 - 0.8		Inconnu	0.1 - 10	Inconnu
	Occupation	Inconnu	Inconnu	Agricole et forestier		Agricole/Forestier	Inconnu	Inconnu
	Autres informations			Faible présence de lacs		Données ayant servies pour le développement d'autres équations empiriques, p.ex. Kirpich (1940)		
Méthode d'estimation du temps de concentration		Durée entre le centre de masse de la précipitation totale et le temps d'occurrence du débit de pointe (Linsley <i>et al.</i> , 1958)	Durée entre le centre de masse de la précipitation totale et le temps d'occurrence du débit de pointe	Durée entre le centre de masse de la pluie nette et le point d'inflexion de la phase de décrue de l'hydrogramme (Rao et Delleur, 1974)	Durée entre le centre de masse de la pluie nette et le temps d'occurrence du débit de pointe	Durée entre le centre de masse de la pluie nette et le temps d'occurrence du débit de pointe.	Inconnu	Durée entre le début de l'écoulement direct et le temps d'occurrence du débit de pointe

1. L : longueur du cours d'eau; S_c : Pente du cours d'eau; S_b : pente du bassin-versant.

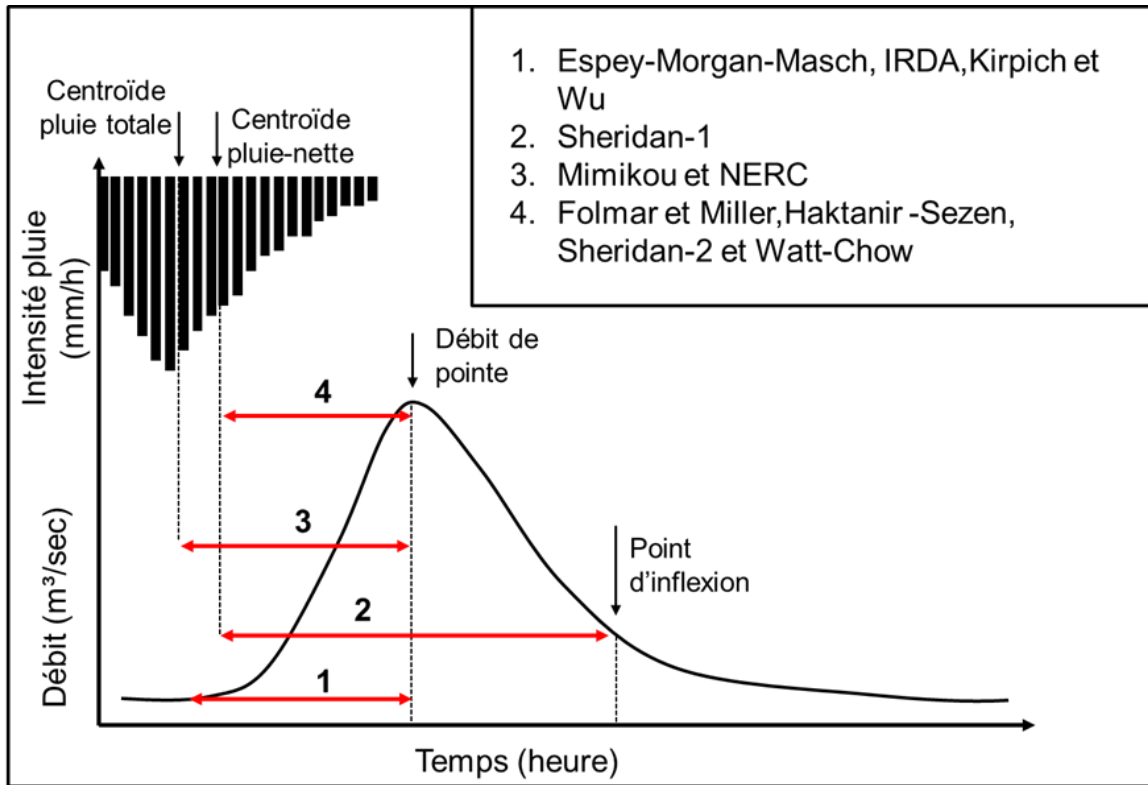


Figure 6.1 – Méthode d'estimation du temps de concentration pour établir les équations de temps de concentration retenues (Pour FAA-1, FAA-2 et Williams, cette information est inconnue, voir Tableau 6.1).

Une ambiguïté entoure l'équation de la FAA, particulièrement en ce qui concerne la pente. Trois sources ont été trouvées, dont deux du Québec, où la pente est associée à la pente du cours d'eau S_c (Wanielista *et al.*, 1997; Transports Québec, 2017; Brière, 2006). Sept autres sources utilisent toutefois la pente du bassin-versant (S_b , Tableau 6.4). Cette ambiguïté tient toujours puisqu'aucune réponse n'est apportée dans le document d'origine (FAA, 1970). Il est important de rappeler que la méthode de la FAA est généralement appliquée à de petits bassins-versants partiellement imperméabilisés où l'écoulement de surface domine. Cela suggère que la pente du bassin-versant serait plus appropriée.

Tableau 6.3 - Liste des formulations considérées (pour toutes les équations, T_C est en heure, L en km, S_b et S_c en m/m et A en km²).

Formulation	Équation	Valeurs des paramètres	Référence
Espey-Morgan-Masch	$T_C = a \left(\frac{L^\alpha}{S_c^\beta} \right)$	$a = 0.12$ $\alpha = 0.12$ $\beta = 0.52$	Espey et al. (1966)
FAA-1	$T_C = a(1.1 - C_R) \left(\frac{L^{3/4}}{\sqrt{S_c}} \right)^\alpha$	$a = 0.38$ $\alpha = 2/3$	FAA (1970) ¹
FAA-2	$T_C = a(1.1 - C_R) \left(\frac{L^{3/4}}{\sqrt{S_b}} \right)^\alpha$		
Folmar et Miller	$T_C = a L^\alpha$	$a = 1.07$ $\alpha = 0.65$	Folmar et Miller (2008)
Haktanir-Sezen	$T_C = a L^\alpha$	$a = 0.2685$ $\alpha = 0.841$	Haktanir et Sezen (1990)
IRDA	$T_C = a A^\alpha$	$a = 2.4091$ $\alpha = 0.5566$	Michaud <i>et al.</i> (2014)
Kirpich	$T_C = a \left(\frac{L}{\sqrt{S_c}} \right)^\alpha$	$a = 0.066$ $\alpha = 0.77$	Kirpich (1940)
Mimikou	$T_C = a A^\alpha$	$a = 0.430$ $\alpha = 0.418$	Mimikou (1984)
NERC	$T_C = a \left(\frac{L}{\sqrt{S_c}} \right)^\alpha$	$a = 0.553$ $\alpha = 0.47$	NERC (1975)
Sheridan-1	$T_C = a L^\alpha$	$a = 2.2$ $\alpha = 0.92$	Sheridan (1994)
Sheridan-2	$T_C = a L^\alpha$	$a = 1.33$ $\alpha = 0.89$	
Watt-Chow	$T_C = a \left(\frac{L}{\sqrt{S_c}} \right)^\alpha$	$a = 0.076$ $\alpha = 0.79$	Watt et Chow (1985)
William	$T_C = a \frac{L}{(S_c^2 A)^\alpha}$	$a = 0.237$ $\alpha = 0.1$	Williams (1922)

Formulation	Équation	Valeurs des paramètres	Référence
Wu	$T_c = a \frac{A^\alpha}{S_c^\beta L^\gamma}$	$a = 0.043$ $\alpha = 1.09$ $\beta = 0.67$ $\gamma = 1.23$	Wu (1963a,b)

1. Deux équations sont considérées pour la formulation FAA en raison de l'ambiguïté qui existe en ce qui concerne l'utilisation de la pente du cours d'eau (S_c) et la pente du bassin-versant (S_b). La Section 6.1 donne plus de détails à ce sujet.

Pour des petits bassins-versants anthropiques, il est probable que la pente de l'écoulement des eaux et la pente moyenne du bassin-versant soient semblables. Toutefois, pour des bassins-versants ruraux et de plus grandes tailles, il est important de ne pas confondre ces deux concepts puisque ces valeurs peuvent différer grandement. Pour les 101 bassins-versants caractérisés dans le cadre de ce projet, la pente moyenne du bassin-versant est en moyenne neuf plus élevée que la pente du cours d'eau (Figure 2.4). Ainsi, l'utilisation de la pente du bassin dans l'équation de la FAA se traduira par des temps de concentration plus courts et des débits de conception plus élevés.

Dans le cadre de ce projet, deux formulations de l'équation de la FAA seront analysées considérant dans un premier cas la pente du cours d'eau (FAA-1) et dans le second cas, la pente du bassin-versant (FAA-2).

Tableau 6.4 - Définition de la pente de l'équation de la FAA selon différentes sources (cette variable est exprimée comme un rapport de deux distances, p. ex. m/m ou pi/pi, ou encore en pourcentage).

Sources	Définition
Transports Québec (2017)	Pente du parcours de l'eau
Brière (2006)	Pente moyenne du chemin parcouru par l'eau
McCuen <i>et al.</i> (1984)	Pente de l'écoulement de surface (<i>Slope of overland flow plane</i>)
Wanielista <i>et al.</i> (1997)	<i>Slope of longest overland flow path</i>
Wong (2005)	Pente surfacique (<i>Overland slope</i>)
Li et Chibber (2008)	Pente surfacique (<i>Surface slope</i>)
Sharifi et Hosseini (2011)	Pente moyenne du bassin-versant (<i>Average slope of watershed</i>)
Gericke et Smithers (2014)	Pente surfacique moyenne (<i>Average overland slope</i>)
Ashford <i>et al.</i> (2011)	Écoulement de surface (<i>Surface flow et Overland flow</i>)
MDDEFP et MAMROT (2014)	Pente de la surface drainée

6.2 Équation de Kirpich

L'équation de Kirpich a été l'objet de nombreuses analyses, notamment au Québec et en Ontario. Quelques études hydrologiques réalisées au Québec ont permis de comparer la méthode de Kirpich à des données observées provenant de bassins-versants de faibles pentes. Ces études ont démontré que cette équation sous-estimait systématiquement (de 33 à 55%) le temps de concentration (Madramootoo et Enright, 1988; Montas *et al.*, 1990; Lapp, 1996; Guillou, 2012). L'évaluation des temps de concentration par cette méthode a également été testée en Ontario sur six bassins versants agricoles de 96 à 1927 ha et de faibles pentes (0.07 à 0.3 %) et les sous-estimations y étaient également systématiques (McNeely Engineering, 1982). Ces résultats abondent dans le même sens que d'autres études réalisées ailleurs dans le monde (Sheridan, 1994; Hotchkiss et McCallum, 1995; Thomas *et al.*, 2000).

La principale raison pouvant expliquer la sous-estimation systématique des temps de concentration estimés à partir de l'équation de Kirpich est son application à des bassins très différents de ceux à partir desquels elle a été développée (Efstratiadis *et al.*, 2013). Tel qu'indiqué au Tableau 6.2, cette équation a été développée à partir de données provenant de petits bassins-versants avec des pentes relativement élevées. Dès lors, il est normal que son utilisation pour des bassins de faible pente mène à une sous-estimation des temps de concentration. En ce qui concerne la taille des bassins-versants, Fang *et al.* (2007, 2008) ont montré que l'équation de Kirpich pouvait s'appliquer à des bassins-versants plus grands (> 50 km²) et qu'elle donnait des résultats similaires à d'autres méthodes développées pour de grands bassins-versants.

Encore une fois, la pente utilisée dans cette équation peut prêter à confusion. Kirpich (1940) mentionne qu'il existe deux méthodes pour calculer cette pente. La première consiste à calculer le quotient entre la différence d'altitude entre le point le plus haut du bassin-versant et le point à l'exutoire et la distance séparant ces deux points. Cette méthode se rapproche de ce qui est présenté dans Dhakal *et al.* (2013a) et Gericke et Smithers (2014) où la pente est définie comme le *channel slope* et le *average main watercourse slope* respectivement. La deuxième méthode d'estimation consiste à faire le quotient de l'altitude moyenne du bassin-versant et de la superficie du bassin-versant («If H is the average height of the watershed above the outlet in feet and A is the area of the watershed in square miles, then $S=H/A$ »). Selon Kirpich (1940), la moyenne des deux valeurs obtenues devrait être utilisée même si les deux méthodes mènent à des résultats similaires.

Pour la réalisation des analyses sur les équations empiriques du temps de concentration, la pente du cours d'eau a été retenue dans la formulation de l'équation de Kirpich (Tableau 6.3). Considérant que la pente du cours d'eau est généralement plus faible que celle du bassin-versant (Figure 2.4), elle semble davantage appropriée dans un contexte où cette équation sous-estime les temps de concentration.

6.3 Équation de Williams

L'équation de Williams a été développée au cours des années 1920 pour des bassins-versants situés en Inde (Williams, 1922). Selon Beran (1980), il est difficile d'appliquer cette équation ailleurs en raison des pluies très intenses qui caractérisent l'Inde. On peut penser que l'équation sous-estime les temps de concentration pour des régions où les pluies sont moins intenses. C'est d'ailleurs la conclusion de plusieurs études hydrologiques réalisées sur des bassins-versants agricoles du Québec et en Ontario (McNeely Engineering, 1982; Madramootoo et Enright, 1988; Montas *et al.*, 1990). Ainsi, selon Beran (1980), cette équation ne devrait pas être utilisée de façon générale bien qu'elle le soit encore dans plusieurs pays (Pilgrim et Cordery, 1993). Fang *et al.* (2008) et Li et Chibber (2008) limitent l'utilisation de l'équation de Williams à des bassins-versants ruraux de moins de 130 km².

Dans certains articles et documents (Fang *et al.*, 2008; Li et Chibber, 2008), l'équation de Williams est présentée avec une variable supplémentaire (D) qui représente le diamètre d'un bassin-versant circulaire de même superficie (« (...) *the diameter of a circular watershed of the same area* »; Williams, 1922). Une version simplifiée est toutefois plus fréquemment présentée où la variable D est absente (Pilgrim et Cordery, 1993; Wanielista *et al.*, 1997; Transports Québec, 2017; Guillou, 2012; Gericke et Smithers, 2014).

Plusieurs définitions de la pente existent mais, dans certains cas (Li et Chibber, 2008; Guillou, 2012), tout laisse croire qu'il s'agit de la pente moyenne du bassin-versant (S_b). Ainsi, Li et Chibber (2008) définissent la pente comme la pente du bassin-versant (*slope of the watershed*) alors que Guillou (2012) définit cette variable comme la pente moyenne du bassin versant, exprimé en pourcentage. Toutefois, Williams (1922) décrit la variable h, attribuée à la pente, de la façon suivante : « *Average fall per 100 ft. along the greatest length of the watershed* ». De plus, Wanielista *et al.* (1997) décrivent cette variable comme suit : « *Slope of a linear profile having the same area under it as the actual profile of the main stream* ». Ainsi, pour l'équation de Williams, il est important de ne pas considérer la pente comme la pente moyenne du bassin-versant mais plutôt comme la pente longitudinale obtenue en considérant un point en amont et en aval du cours d'eau et la distance qui les sépare (S_c).

6.4 Équation du MTQ

Deux équations du temps de concentration sont proposées dans le Manuel de conception des ponceaux du MTMDET (Transports Québec, 2017), ces deux équations étant l'équation de la FAA-1 (Section 6.1) et l'équation de Williams (Section 6.3). La valeur du coefficient de ruissellement détermine quelle équation est utilisée (Tableau 6.5). Dans le cas de l'équation de la FAA, le coefficient de ruissellement est également utilisé pour identifier la pente minimale du cours d'eau.

Tableau 6.5 – Méthode MTQ quant au choix de l'équation de temps de concentration.

Coefficient de ruissellement	Équation	Condition	Pente minimale (%)
$C_R < 0.40$	FAA	$C_R \leq 0.20$	si $S_{85-10} < 0.1 \Rightarrow S_{85-10} = 0.1$
		$0.2 < C_R < 0.4$	si $S_{85-10} < 0.5 \Rightarrow S_{85-10} = 0.5$
$C_R \geq 0.40$ ¹	Williams	Aucune condition sur la pente.	

1. À noter que, dans le Tableau 3.5.2 de Transport Québec (2017), cette inégalité est de la forme $C_R > 0.40$ ce qui laisse non précisé le cas $C_R = 0.40$. Les auteurs du présent rapport ont opté pour l'équation de Williams dans ce dernier cas.

Il est important de souligner l'incohérence associée à la méthode MTQ. L'équation FAA-1 est recommandée pour les bassins-versants dont le coefficient de ruissellement est inférieur à 0.40 donc pour les bassins où l'infiltration est relativement importante. Or cette équation ayant été développée à partir de sites avec des fractions imperméables importantes (voir Section 6.1), elle devrait plutôt s'appliquer en milieu urbain, soit pour les bassins-versants dont le coefficient de ruissellement est plus élevé, i.e. plus imperméabilisés.

6.5 Sélection des équations empiriques

Les équations FAA-1, Kirpich et Williams ont été sélectionnées en raison de leur utilisation fréquente, notamment au Québec. Les équations FAA et Williams sont actuellement utilisées par le MTMDET (Transports Québec 2017) alors que l'équation de Kirpich est employée fréquemment dans le milieu agricole (Beaulieu *et al.*, 2007; Rocha Medrano, 2014). L'équation Kirpich présente un avantage supplémentaire en ce sens que de nombreuses équations empiriques ont été développées ultérieurement en conservant la même forme qui utilise le rapport $\frac{L}{\sqrt{S}}$, rapport qui se justifie sur des bases

hydrauliques (la vitesse d'écoulement à surface libre pour une section est proportionnelle à la racine carré de la pente; NERC, 1975). C'est le cas notamment des équations NERC et Watt et Chow qui ont été retenues pour voir si d'autres paramétrisations peuvent mener à de meilleurs résultats. L'équation de Watt et Chow possède un avantage supplémentaire puisqu'elle a été développée à partir de bassins-versants provenant de l'est de l'Amérique du Nord, notamment du Québec. L'équation FAA-2 a été retenue pour quantifier l'impact de l'utilisation de la pente moyenne du bassin-versant plutôt que la pente du cours d'eau sur les temps de concentration.

L'équation Espey-Morgan-Masch propose une forme très fréquente pour les équations empiriques où le temps de concentration s'exprime en fonction du rapport entre la longueur du parcours de l'eau et la pente du cours d'eau. De plus, cette équation a été

développée à partir de données provenant de bassins-versants dont la superficie est similaire à celle du domaine d'application de la MÉRA au sein du MTMDET.

Les équations Folmar et Miller, Haktanir-Sezen, IRDA, Mimikou, Sheridan-1 et Sheridan-2 ont été retenues entre autres pour leur simplicité. Toutes ces équations ne dépendent que de la longueur du cours d'eau ou la superficie du bassin-versant. L'équation Folmar et Miller présente un attrait supplémentaire puisqu'elle a été développée à partir d'un très grand nombre d'hydrogrammes provenant de bassins-versants situés essentiellement dans l'est des États-Unis (environ 10 000 hydrogrammes). Pour ce qui est de l'équation IRDA, il s'agit de l'une des rares équations développées à partir de données observées provenant de bassins-versants du Québec. Une autre équation a été développée plus récemment à partir de données observées enregistrées sur des parcelles agricoles (Mailhot *et al.*, 2016c), toutefois son domaine d'application n'est pas adéquat considérant la taille des sites à l'étude dans le cadre de ce projet. Les équations Sheridan-1 et Sheridan-2 ont aussi été retenues pour quantifier l'impact de la méthode d'estimation des temps de concentration à partir des hydrogrammes et des hétérogrammes sur le développement d'une équation.

Finalement, l'équation Wu a été sélectionnée puisqu'il s'agit de l'une des rares équations qui, comme l'équation Williams, nécessite à la fois la superficie du bassin-versant et la longueur du cours d'eau, lesquelles sont fortement corrélées comme le montre la Figure 2.3.

6.6 Comparaison des équations empiriques du temps de concentration

En premier lieu, les équations empiriques du temps de concentration ont été appliquées à chacun des bassins-versants. L'Annexe H présente les valeurs des temps de concentration ainsi estimées et les Figures 6.2 et 6.3 présentent un sommaire de ces résultats. La Figure 6.2 présente les box plots des temps de concentration estimés aux différents bassins selon les différentes équations retenues permettant d'apprécier la dispersion des valeurs de temps de concentration estimées aux différents bassins pour chacune des équations retenues. La Figure 6.3 présente par ailleurs les racines carrées des erreurs quadratiques moyennes (*Root Mean Square Error*, RMSE) relatives définies comme suit :

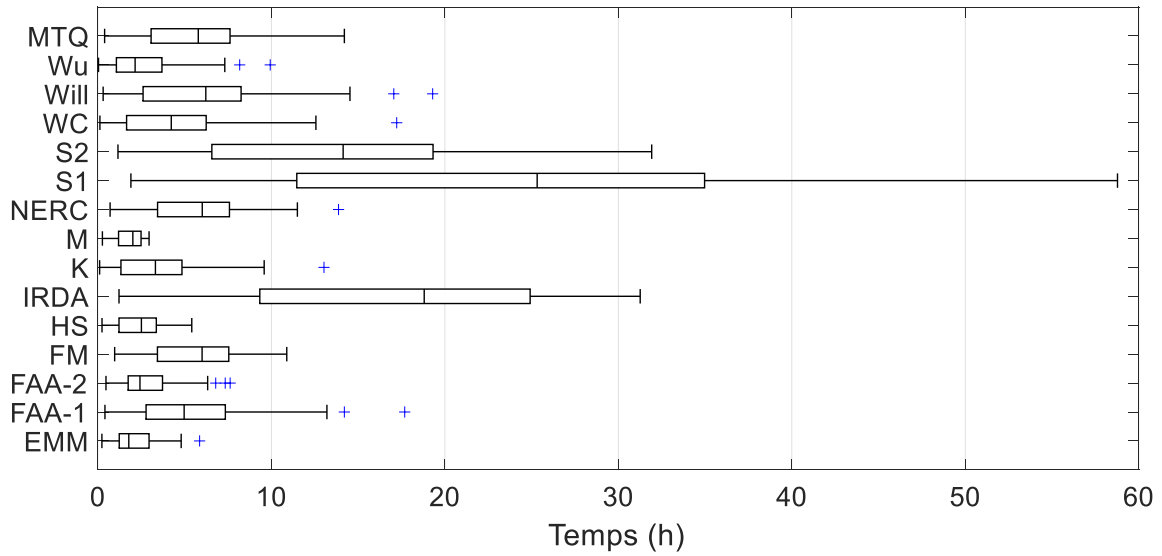


Figure 6.2 – Box plots des temps de concentration estimés aux différents bassins selon chacune des équations empiriques retenues (EMM : Espey-Morgan-Masch, FM : Folmar et Miller, HS : Haktanir-Sezen, K : Kirpich, M : Mimikou, S : Sheridan, WC : Watt-Chow, Will : Williams, MTQ : méthode MTQ).

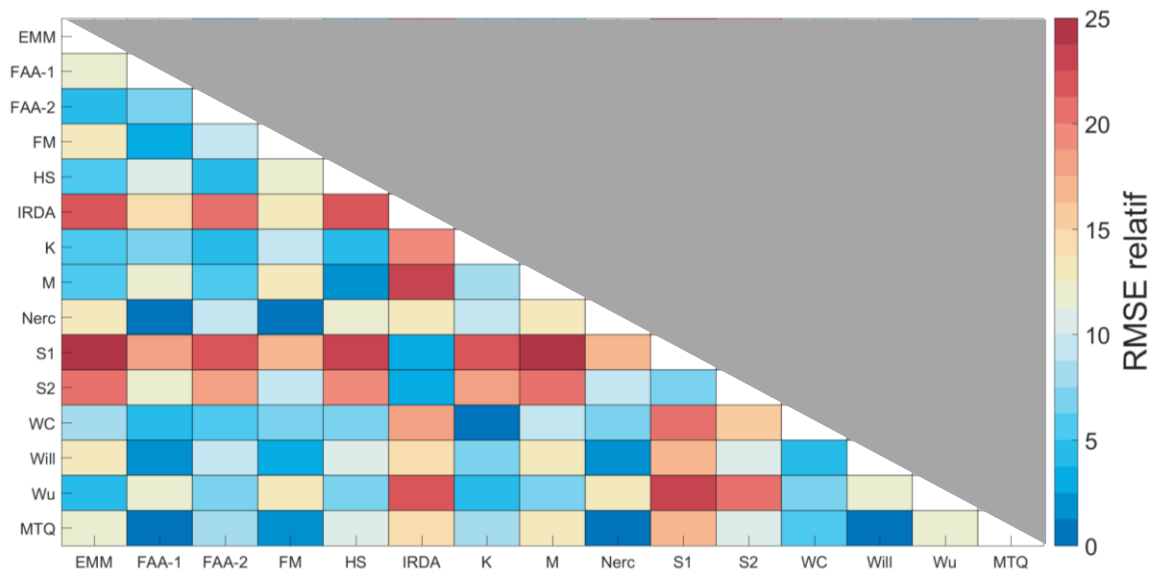


Figure 6.3 – Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne relative (*Root Mean Square Error*, RMSE relatif) entre les différentes équations du temps de concentration retenues (EMM : Espey-Morgan-Masch, FM : Folmar et Miller, HS : Haktanir-Sezen, K : Kirpich, M : Mimikou, S : Sheridan, WC : Watt-Chow, Will : Williams, MTQ : méthode MTQ).

$$RMSE_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[\frac{(T_{ik} - T_{jk})}{0.5(T_{ik} + T_{jk})} \right]^2}$$

où T_{ik} et T_{jk} sont les temps de concentrations estimés par deux des équations du temps de concentration retenue (identifié par i et j) pour le bassin k avec N le nombre total de bassins considérés. Cette quantité permet d'apprécier dans quelle mesure les valeurs estimées selon les différentes équations diffèrent de celle du MTQ. Ainsi plus ces différences sont faibles (case dans des teintes de bleue à la Figure 6.3), plus les valeurs estimées à partir de l'équation considérée sont similaires à celle de l'équation MTQ et à l'inverse, plus ces différences sont importantes (case dans des teintes de rouge à la Figure 6.3) plus ces valeurs diffèrent de celles du MTQ.

La Figure 6.2 montre que trois équations donnent des distributions de temps de concentration beaucoup plus longs que les autres équations (IRDA, Sheridan-1 et Sheridan-2). En ce qui concerne les équations Sheridan-1 et Sheridan-2, ces résultats peuvent s'expliquer par le fait qu'elles ont été développées à partir de données provenant de bassins-versants très plats ($0.1 \leq S_b \leq 0.8$ %; Tableau 6.2) situés notamment dans des plaines côtières. Les travaux de Sheridan (1994) ont montré qu'à elle seule, la longueur du cours d'eau pouvait expliquer le temps de concentration pour ce type de bassins. L'équation Sheridan-1 donne quant à elle des temps de concentration plus longs que Sheridan-2 en raison de la méthode d'estimation des temps de concentration utilisée. La durée entre le centre de masse de la pluie nette et le point d'inflexion de la phase de décrue (utilisée pour l'équation Sheridan-1) est nécessairement plus grande que la durée entre le centre de masse de la pluie nette et le débit de pointe (utilisée pour l'équation Sheridan-2) puisque la phase de décrue survient après l'occurrence du débit de pointe (Figure 6.1). Cela démontre l'influence du choix de la méthode d'estimation des temps de concentration sur le développement d'une équation empirique. Pour ce qui est de l'équation de l'IRDA, le fait qu'elle ait été développée à partir de données provenant de bassins agricoles peut expliquer les résultats obtenus.

Les autres équations peuvent être séparées en deux groupes. Le premier groupe comprend les équations où les temps de concentration estimés sont les plus courts (Espey-Morgan-Masch, FAA-2, Haktanir et Sezen, Mimikou et Wu). Dans ce cas, les RMSE relatifs entre ces différentes équations sont globalement faibles (Figure 6.3). Le deuxième groupe, composé des équations FAA-1, Folmar et Miller, NERC, Watt-Chow, Williams, dans une moindre mesure Kirpich est caractérisé par des temps de

concentration plus grand que le premier groupe et inférieur aux équations IRDA, Sheridan-1 et Sheridan-2.

La comparaison des équations FAA-1 et FAA-2 met en évidence l'importance de la définition de la pente utilisée pour le calcul du temps de concentration. Tel que mentionné précédemment, la pente du bassin-versant est généralement plus élevée que la pente du cours d'eau (Section 6.1). Dès lors, les temps de concentration estimés seront plus courts lorsque la pente du bassin-versant est considérée. De fait, on remarque sur la Figure 6.2 que la médiane obtenue avec l'équation FAA-2 (2.45 heures) est deux fois plus petite que celle obtenue en utilisant l'équation FAA-1 (4.95 heures).

Il est intéressant de noter la similarité des temps de concentration estimés avec la méthode MTQ et avec les équations FAA-1 et Williams prises individuellement (Figure 6.2). Ces résultats tendent à démontrer qu'il y a peu d'avantage à utiliser la méthode MTQ comparativement à l'une ou l'autre des équations FAA-1 et Williams. Des lors, la méthode MTQ, laquelle implique des étapes supplémentaires, pourrait être mise de côté au profit de l'équation FAA-1 ou Williams sans modification majeure dans l'estimation des débits de conception.

En raison du manque d'information historique sur l'équation FAA-1 et Williams (Tableau 6.2) et du cadre d'application non adaptée, notamment pour l'équation FAA-1 (utilisation en milieu urbain, Tableau 6.2), d'autres équations pourraient être utilisées pour l'estimation des débits de conception. Parmi celles-ci se trouve les équations NERC, de Folmar et Miller et de Watt et Chow. Les estimations des temps de concentration à partir de ces équations sont similaires à celles provenant de FAA-1 et Williams, les informations pertinentes à leur développement sont connues et pour certaines d'entre elles, les caractéristiques physiographiques des bassins-versants d'où proviennent les données observées sont près du cadre d'application de la MÉRA.

- Équation NERC : Cette équation présente une formulation nécessitant la longueur et la pente du cours d'eau où $\frac{L}{\sqrt{S}}$. Ce rapport repose sur des bases hydrauliques (la vitesse d'écoulement à surface libre pour une section est proportionnelle à la racine carré de la pente; NERC, 1975). Le développement de cette équation est basé sur un grand nombre d'événements (environ 1 500) provenant de plusieurs bassins-versants (138) situés au Royaume-Uni. Certaines informations quant aux caractéristiques physiographiques sont manquantes, mais, tout-de-même, leur superficie était inférieure à 500 km². Bien que cela puisse paraître grand en comparaison du cadre d'application de la MÉRA, la comparaison avec d'autres équations, tend à démontrer qu'il s'agit d'une fourchette de grandeur somme toute restreinte.
- Équation de Folmar et Miller : Cette équation a une formulation simple ne nécessitant que la longueur du cours d'eau. Il s'agit d'une équation relativement

récente et basée sur un très grand nombre d'événements (environ 10 000) provenant de bassins-versants situés essentiellement dans l'est des États-Unis et dont l'occupation du territoire est essentiellement agricole et forestière. De plus, la taille des bassins-versants (0.01 à 49.9 km²) correspond environ au domaine d'application de la MÉRA telle qu'elle est utilisée par les intervenants du MTMDET.

- Équation de Watt et Chow : Cette équation, dont la formulation est la même que NERC, présente l'avantage d'avoir été développée à partir de données provenant de l'est des États-Unis mais également de l'Ontario et du Québec. Toutefois, elle regroupe des bassins-versants caractéristiques physiographiques très étendues notamment en ce qui concerne la superficie (0.005 à 5840 km²)

6.7 Recommandations

Les recommandations suivantes sont formulées quant à l'estimation des temps de concentration dans le cadre de l'application de la MÉRA :

1. Il est recommandé de remplacer, à court et moyen termes, la méthode MTQ en raison notamment de l'incohérence concernant la sélection des équations FAA-1 et Williams en fonction de la valeur du coefficient de ruissellement; en effet, le *Manuel de conception des ponceaux* propose d'utiliser l'équation FAA-1 lorsque le coefficient de ruissellement est inférieur à 0.4 alors que cette équation a été développée pour des secteurs majoritairement imperméables là où les coefficients de ruissellement sont élevés (voir Section 6.4);
2. Dans la mesure où une autre équation doit remplacer les équations FAA1 et Williams, il est suggéré d'utiliser l'équation NERC. Les équations Folmar et Miller et Watt et Chow peuvent également être envisagées;
3. Les équations IRDA, Sheridan-1 et Sheridan-2 ne sont pas recommandées puisque les résultats tendent à montrer que ces équations surestiment de façon importante les temps de concentration pour les bassins sous étude;
4. Les équations Espey-Morgan-Masch, FAA-2, Haktanir et Sezen, Mimikou et Wu ne sont pas recommandées puisque les résultats suggèrent qu'elles pourraient pour certains bassins sous-estimer les temps de concentration.
5. Il est fortement recommandé de procéder au développement d'une équation du temps de concentration adapté au contexte québécois ce qui est d'ailleurs prévu à la Phase II du projet. En effet, il est clair, à la lumière des résultats précédents, que l'équation du temps de concentration utilisée a un impact majeur sur l'estimation des débits de pointe. Utiliser des équations empiriques développées et calibrées ailleurs dans le monde est difficilement justifiable et demeure la seule approche possible lorsque l'on ne dispose pas d'équation développée à partir d'un échantillon de bassins représentatifs de ceux auxquels on s'intéresse. Cette étape est cruciale si l'on veut disposer d'une évaluation des temps de

concentration réaliste et applicable aux bassins visés par l'application de la MÉRA.

6. Une recommandation plus spécifique sur l'équation du temps de concentration à utiliser dans le cadre de l'application de la MÉRA pour les bassins du Québec sera formulée suite aux analyses réalisées dans la Phase II du projet.

Chapitre 7. Coefficient de ruissellement

L'estimation du coefficient de ruissellement est une étape très importante et pouvant avoir une influence importante sur le calcul des débits de conception. À ce titre, le coefficient de ruissellement est, selon plusieurs sources, la variable la plus incertaine et la plus difficile à déterminer (ASCE et WPCF, 1969; Pilgrim et Cordery, 1993; MDDEFP et MAMROT, 2014). L'estimation du coefficient de ruissellement nécessite de préciser plusieurs caractéristiques et propriétés : 1) la classification hydrologique; 2) l'occupation du territoire; et 3) la pente moyenne du bassin-versant. Les estimations obtenues peuvent varier sensiblement d'un utilisateur à l'autre. De même, l'estimation du coefficient de ruissellement laisse place à une certaine subjectivité de l'utilisateur (Grimaldi et Petroselli, 2015). Les guides d'hydrologie générale suggèrent fréquemment une fourchette de valeurs pour une même utilisation du sol. Dans ASCE et WPCF (1969) par exemple, l'étendue des valeurs du coefficient de ruissellement pour une zone commerciale située au centre-ville (*Business-Downtown*) se situe entre 0.70 et 0.95 et même pour une zone "plus naturelle" (*unimproved*), la fourchette de valeurs peut aller de 0.10 à 0.30.

Les Sections 7.1, 7.2 et 7.3 aborderont les aspects liés à la détermination de la classification hydrologique des sols, de la pente moyenne des bassins-versants et de l'occupation du sol respectivement. Les sections suivantes porteront sur les valeurs de coefficients de ruissellement, en milieu urbain et rural (Section 7.4 et Section 7.5), pour les lacs et les milieux humides (Section 7.6) et pour les dépôts rocheux (Section 7.7). La Section 7.8 discutera de l'impact de la période de retour sur le coefficient de ruissellement. Finalement, La Section 7.9 présente des recommandations.

7.1 Classification hydrologique des sols

L'un des éléments importants à considérer dans l'estimation du coefficient de ruissellement est la réponse hydrologique potentielle moyenne du bassin-versant. Cette composante est estimée en associant une classe hydrologique à chaque type de sol présent dans le bassin-versant considéré. Les classes hydrologiques possibles sont : A, B, C, et D. Elles sont définies selon les capacités d'infiltration d'un type de sol (sableux, argileux, limoneux, loam, etc.) et sont notamment utilisées par le département de l'agriculture des États-Unis (USDA-NRCS, 1986, 2009). Elles ont été établies essentiellement sur la base des travaux de Musgrave (1955) et Raws *et al.* (1983). Le Tableau 7.1 donne une description des classes hydrologiques A, B, C et D selon USDA-NRCS (1986, 2009).

Actuellement, deux principales sources peuvent être consultées afin d'estimer la classe hydrologique pour un bassin-versant donné : 1) les cartes pédologiques et 2) les cartes

de dépôts de surface. Les sections suivantes discutent de ces deux sources d'information.

7.1.1 Cartes pédologiques

Les cartes pédologiques sont basées sur la cartographie des sols du Québec réalisée depuis 1942 (Lamontagne et Nolin, 1997). Cette cartographie regroupe plus de 70 rapports pédologiques. Ces cartes couvrent essentiellement le sud du Québec et les régions avec des activités agricoles, par exemple la région du Lac-Saint-Jean (Figure 7.2). Il est important de mentionner que la couverture pédologique présentée à la carte de la Figure 7.1 peut être trompeuse dans certains cas puisque la caractérisation de certaines des cartes régionales ne couvre pas toute la région en question. La Figure 7.2 montre l'exemple de la carte 32H02102 située dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean où la pédologie n'est disponible que pour la portion sud-est de la carte. La Figure 7.1 laisse donc entendre une couverture spatiale plus complète qu'elle ne l'est en réalité.

Actuellement, l'utilisateur doit avoir recours au Tableau 3.4.2c de Transports Québec (2017) pour associer une classe hydrologique à différentes séries de sols lesquelles sont caractérisées par des textures différentes. Au total, 540 séries de sols se retrouvent dans ce tableau et 963 classes hydrologiques sont associées à ces séries selon les différentes textures.

Tableau 7.1 - Description des classes hydrologiques A, B, C et D selon USDA-NRCS (1986, 2009).

Classe hydrologique	Description
A	<ul style="list-style-type: none"> • Sol avec un faible potentiel de ruissellement lorsqu'il est saturé; • Ruissellement s'infiltrant librement à travers le sol; • Constitué de moins de 10 % d'argile et d'au moins 90 % de sable et/ou de gravier; • Conductivité hydraulique à saturation élevée (> 14.4 cm/h); • Aucune couche imperméable à moins de 50 cm de profondeur; • Nappe phréatique à plus de 60 cm de la surface; • Sol d'épaisseur supérieure à 100 cm au-dessus d'une couche imperméable ou au-dessus de la nappe phréatique et dont la conductivité hydraulique à saturation est supérieure 3.6 cm/h sur toute sa profondeur; • Sol se drainant bien à excessivement bien.
B	<ul style="list-style-type: none"> • Sol avec un potentiel modéré de ruissellement lorsque saturé; • Le ruissellement s'infiltrant sans entrave à travers le sol; • Constitué de 10 à 20 % d'argile et de 50 à 90 % de sable; • Conductivité hydraulique à saturation entre 3.6 et 14.4 cm/heure sur les 50 premiers centimètres de profondeur; • Aucune couche imperméable à moins de 50 cm de profondeur; • Nappe phréatique à plus de 60 cm de la surface; • Sol d'épaisseur supérieure à 100 cm au-dessus d'une couche imperméable ou la nappe phréatique et dont la conductivité hydraulique à saturation est supérieure 1.4 cm/h sur toute sa profondeur et inférieure à 3.6 cm/h; • Sol se drainant modérément bien.
C	<ul style="list-style-type: none"> • Sol avec un potentiel modérément élevé de ruissellement lorsque saturé; • Ruissellement un peu limité à travers le sol; • Constitué de 20 à 40 % d'argile et moins de 50 % de sable; • Conductivité hydraulique à saturation entre 0.36 et 3.6 cm/h sur les 50 premiers centimètres de profondeur; • Aucune couche imperméable à moins de 50 cm de profondeur; • Nappe phréatique à plus de 60 cm de la surface; • Sol d'épaisseur supérieur à 100 cm au-dessus d'une couche imperméable ou la nappe phréatique et dont la conductivité hydraulique à saturation est supérieure 0.15 cm/h sur toute sa profondeur et inférieure à 1.4 cm/h.
D	<ul style="list-style-type: none"> • Sol avec un potentiel élevé de ruissellement lorsque saturé; • Ruissellement limité, voire très limité, à travers le sol; • Constitué de plus de 40 % d'argile et moins de 50 % de sable; • Sols ayant une couche imperméable à moins de 50 cm de profondeur ou à moins de 60 cm de la nappe phréatique; • Sol avec une couche imperméable comprise entre 50 et 100 cm et de conductivité hydraulique à saturation inférieure à 0.36 cm/h; • Sol d'épaisseur supérieure à 100 cm au-dessus d'une couche imperméable ou la nappe phréatique et dont la conductivité hydraulique à saturation est inférieure 0.15 cm/heure sur toute sa profondeur.

Des travaux récemment réalisés par l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) ont permis d'associer une classe hydrologique aux 650 séries de sols minéraux du Québec (Gagné *et al.*, 2013). Ces travaux font suite à ceux de Michaud *et al.* (2008) où des classes hydrologiques avaient été associées aux 157 séries de sols minéraux se trouvant dans l'Inventaire des problèmes de dégradation des sols du Québec (Tabi *et al.*, 1990). Ainsi, en se basant sur cette classification, une méthodologie a été mise en place pour associer une classe hydrologique aux 650 séries de sols minéraux du Québec. Il est important de noter que les sols organiques n'ont pas été considérés dans ces travaux.

La comparaison des deux classifications se résume ainsi :

1. La classification de l'IRDA est plus complète considérant qu'elle comprend 110 séries de sols de plus que celle provenant du MTMDET;
2. Bien que la classification de l'IRDA contienne plus de séries de sols, certains noms de sols se retrouvant dans Transports Québec (2017) n'y apparaissent pas. Le Tableau 7.2 dresse la liste de ces noms de sols. Il s'avère que 12 de ces 22 noms de sols sont des terrains ou des complexes et non des séries de sols. Or, la classification hydrologique de l'IRDA (Gagné *et al.*, 2013) tient compte exclusivement des séries de sols. Il est donc normal qu'aucune classe hydrologique n'ait été attribuée à ces sols. Ensuite, seulement deux sols de ce tableau sont classés comme des séries de sols (Millerand et St-Colomban). Il sera important de vérifier si ces sols sont présents dans la mise à jour de la classification hydrologique des séries de sols de l'IRDA. À ce sujet, des échanges avec M. Aubert Michaud (Chercheur principal, IRDA) ont permis de comprendre que cette mise à jour a été réalisée, que la classification couvre en principe tous les sols présents dans les cartes pédologiques et qu'elle pourrait être disponible au cours du mois de mars 2018. Finalement, quatre noms de sols sont absents de la banque de données sur les sols de l'IRDA⁷ (Carder, Dumont, Roccin et St-Francis). Pour ces sols, il pourrait être judicieux de vérifier s'ils apparaissent dans les cartes pédologiques et, dans l'affirmative, voir s'ils sont présents dans la mise à jour de la classification hydrologique des sols. Dans le cas contraire, les responsables de l'IRDA devraient être avisés afin qu'ils ajoutent éventuellement ces sols à leur classification.
3. La classification de l'IRDA attribue une seule classe hydrologique par série de sols. Considérant les incertitudes inhérentes aux différentes étapes menant à l'estimation d'un débit de pointe à partir de la MÉRA, il n'y a peu d'intérêt à associer jusqu'à huit classes hydrologiques à une série de sol en raison de textures différentes;
4. La classification de l'IRDA ne comprend pas de classes hydrologiques moyennes (AB, BC et CD) comme c'est le cas dans les principaux ouvrages de

⁷ Banque de données des sols de l'IRDA : <https://www.irda.qc.ca/fr/outils-et-services/informations-sur-les-sols/etudes-pedologiques/>

référence (USDA-NRCS, 1986, 2009). De plus, considérant les informations somme toute très partielles en ce qui concernent les inventaires des sols du Québec, lesquels proviennent essentiellement de Tabi *et al.* (1990), il est difficile de justifier l'attribution de classes mitoyennes à certaines séries de sols.

5. La comparaison entre les deux classifications tend à démontrer que celle de l'IRDA est plus conservatrice que celle du MTMDET. Pour faire cette analyse, 63 séries de sols ont été choisies aléatoirement. Pour un peu moins de la moitié d'entre elles (30/63), les deux classifications sont sensiblement en accord (Tableau 7.3, cases en bleu). Pour les autres cas, des capacités d'infiltration moins importantes ont été attribuées majoritairement aux séries de sols (28/63; Tableau 7.3, cases en rouge).
6. La classification du MTMDET ne comprend pas la classe hydrologique D. Bien que cela soit conséquent avec les valeurs de coefficients de ruissellement proposés (Tableau 3.4.1a de Transports Québec, 2017), aucune explication n'est donnée à cet effet. La classification de l'IRDA comprend des séries de sols pour lesquels la classe hydrologique D a été attribuée.

Tableau 7.2 – Nom de sols du Tableau 3.4.2c de Transports Québec (2017) ne se trouvant pas dans la classification hydrologique des sols de l'IRDA (Gagné *et al.*, 2013).

Nom du sol (Transports Québec, 2017)	Nom du sol IRDA	Classe IRDA
Adrien	Terrain Adrien	Ne s'applique pas
Adstock	Terrain Adstock	Type de terrain
Camille	Terrain Camille	Ne s'applique pas
Cap-à-l'Aigle	Cap-à-l'Aigle terrain	Type de terrain
Carder	Absent	
Cassien	Cassien terrain	Type de terrain
Chester	Terrain Chester	Type de terrain
Ge Guire	De Guire sable (complexe)	Complexe de sols
Drolet	Terrain Drolet	Type de terrain
Dumont	Absent	
Grand-Fond	Grand-Fonds terrain	Type de terrain
Lac-des-îles	Terrain Lac des Îles	Type de terrain
Lac-Rocheux	Terrain Lac Rocheux	Type de terrain
Larose	Larose terrain	Type de terrain
Lingwick	Terrain Lingwick	Ne s'applique pas
Maras	Terrain Maras	Type de terrain
Millerand	Millerand terrain	Série de sols
Petite-Rivière	Petite-Rivière terrain	Type de terrain
Risborough	Terrain Risborough	Type de terrain
Roccin	Absent	
St-Colomban	Saint-Colomban terrain	Série de sols
St-Francis	Absent	

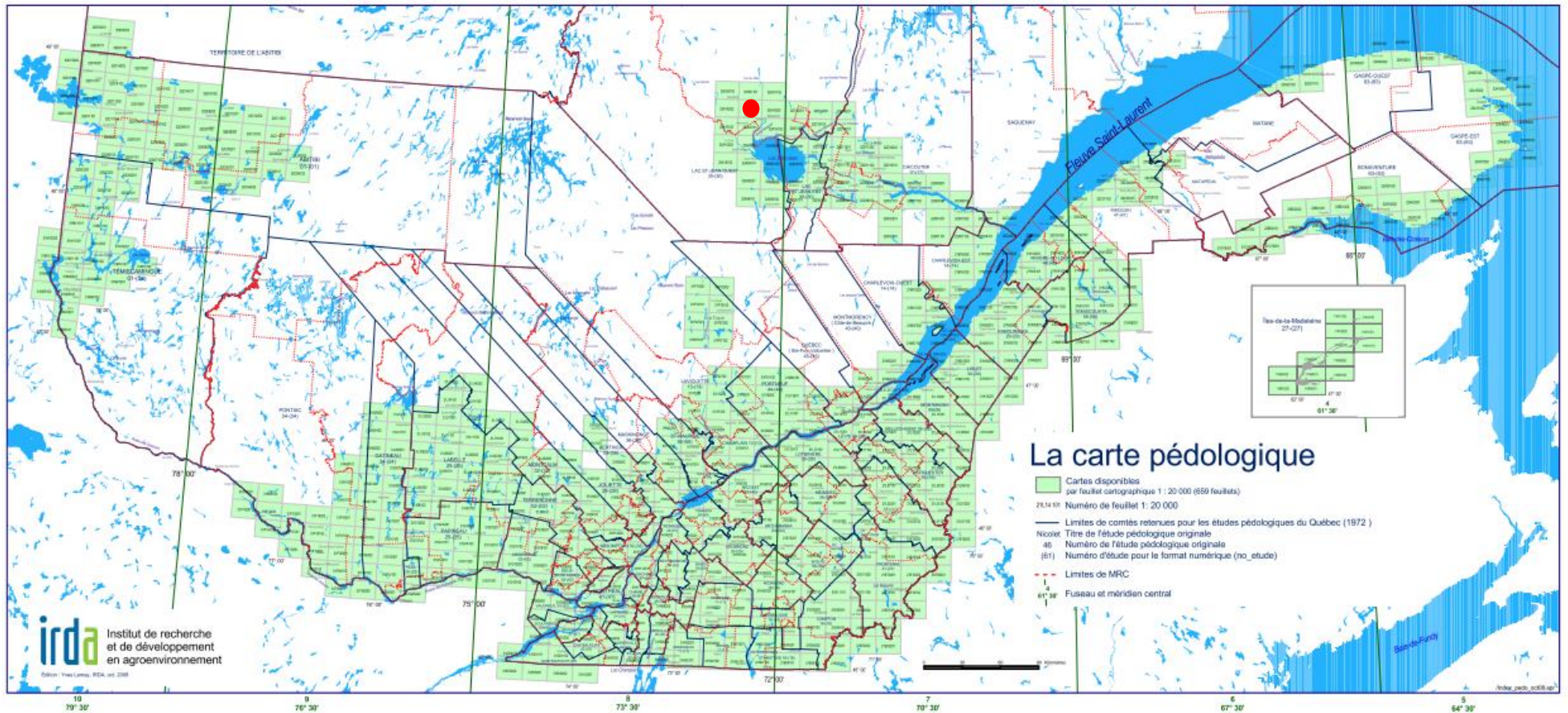


Figure 7.1 -Couverture des cartes pédologiques du Québec. Le point rouge indique la localisation de la carte 32H02102 présentée à la Figure 7.2. (Source : IRDA; https://www.irda.qc.ca/assets/documents/P%C3%A9dologie/Index_pedo_oct08.pdf)

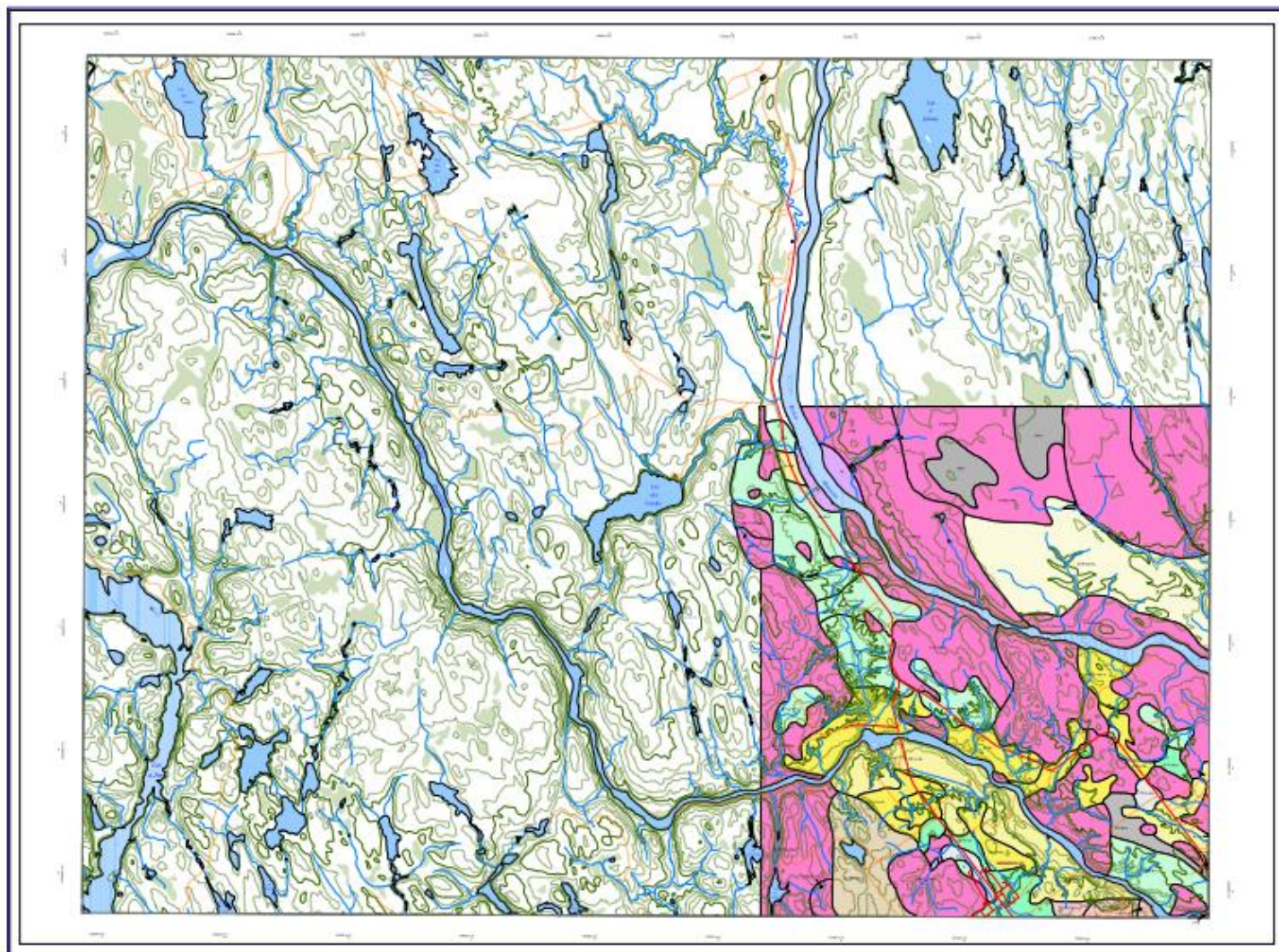


Figure 7.2 – Pédologie de la carte 32H02102 située dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (Source : IRDA, https://www.irda.qc.ca/assets/documents/P%C3%A9dologie/%C3%89tudes_p%C3%A9dologiques/Pedo_32h02102.pdf), cette carte est identifiée par un point rouge à la Figure 7.1.

Tableau 7.3 – Comparaison entre les classes hydrologiques attribuées à différentes séries de sols par le MTMDET (Transports Québec, 2017) et l'IRDA (Gagné *et al.*, 2013). Les cases bleues correspondent aux séries de sols où les deux classifications sont en accord. Les cases rouges correspondent aux séries de sols pour lesquelles les capacités d'infiltration sont inférieures selon la classification de l'IRDA alors que les cases vertes identifient les séries de sols où les capacités d'infiltration sont supérieures selon la classification de l'IRDA

Série	TQ ¹	IRDA ²	Série	TQ	IRDA	Série	TQ	IRDA	
Ascot	B	B	Duchêne	C	C	Rivière-du-Loup	B	C	
	B			C			B		
	B		Farmington	B	D		B		
Batiscan	BC	B		AB					
Baudette	B	C		Gayhurst		B	B	Savane	B	B
	C		BC		B	AB		C	
	BC		Grande-Côte	B	D	Séraphine	B		
	C			BC		Squateck	C		C ou D
	B			C		C	C		
Beaurivage	B	A	Grignon	A	A	St-Aimé	BC	C	
	B		Gros-Cap	AB	D		C		
	AB		Ignace	B	B		B		
	B		Joseph	B	C	St-Bernard	B	B	
	AB			AB			C		C
Bellevue	BC	C	Lachute	B	B		B		B
	B			BC			AB		
Botreaux	B	C		Lac-Original		B	C	B		B
	AB		Laval	C	B	A			
	BC			B		B	CD		
Calumet	B	A	Lechasseur	B	C	St-Blaise	C	C	
Caouette	B	C		A			C		BC
Chambord	B	A	Lennoxville	C	C		C		
	AB		Manie	B	C		B		
Chapais	B	C	Marsolet	BC	C	St-Jacques	BC	C	
	B			BC			C		B
	B		Mawcook	B	C	St-Jude	B	C	
	B			C			B		
B	AB	B	AB						
Chapeau	C	C	Mont-Carmel	AB	C	St-Nicolas	AB	B	
	C			B			C		C
	BC			B		C	B		
	BC		B	C	B				

Série	TQ ¹	IRDA ²	Série	TQ	IRDA	Série	TQ	IRDA	
Clermont	B	C		B			B		
Courval	B	C	Mont-Rolland	B	A	St-Nicolas	AB	B	
	B			B					
	B			B					
	AB		C	St-Pierre	C	C			
Des Saults	B	B	Neubois	B	C	St-Valentin	B	C	
	BC		Pelletier	AB			B		
	B		Pémonka	AB		C			
Dessaint	B	C	Prairie	AB	C	Ste-Brigide	BC	C	
	B			AB			C		
Dosquet	B	B	Providence	C	C	Ste-Cécile	B	C	
	AB			BC			Ste-Julie		B	C
	B			C		C			
	A			C		Ste-Rosalie	C	C	
	B		Rigaud	B	B				
	B			AB	B				
Du Moine	BC	B	Rivière-aux-Rats	C	C	Ste-Rosalie	C		C
	C			BC			BC		
	C			C					
	C			BC					
						Tingwick	B	C ou D	
						Trottier	C	C	
						Warwick	B	B	
					A				

1. TQ : Transports Québec (2017)

2. Gagné *et al.* (2013)

7.1.2 Cartes des dépôts de surface

Pour produire les cartes de dépôts de surface, des photographies aériennes ont été utilisées. L'interprétation de ces cartes est basée sur une méthode normalisée, nécessitant peu de contrôle sur le terrain. Cette méthode permet de distinguer les grandes catégories de dépôts de surface : glaciaires, fluvioglaciaires, fluviaux, lacustres, marins, littoraux marins, organiques, de pentes et d'altérations et éoliens. La couverture des cartes de dépôts de surface est complète jusqu'au 52^e parallèle depuis plusieurs années⁸. Plus récemment, les cartes de dépôts de surface du Nord québécois

⁸ Cartes de dépôts de surface jusqu'au 52^e parallèle :

<http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/fiches/carte-depots-de-surface.jsp>

ont été réalisées. Ces cartes couvrent tout le nord du Québec à partir du 53^e parallèle. Elles sont basées sur des techniques de télédétection récentes et l'interprétation est réalisée par des géomorphologues à partir d'images satellites à fine résolution⁹.

Dans Transports Québec (2017), le Tableau 3.4.2c permet d'attribuer une classe hydrologique à 47 types de dépôts de surface. Ce tableau s'avère incomplet en ce sens qu'il n'y a pas de classe hydrologique associée à plusieurs types de dépôts de surface se trouvant sur les cartes. Dès lors, les utilisateurs doivent associer eux-mêmes une classe hydrologique à certains dépôts de surface ce qui peut faire en sorte que divers utilisateurs associeront différentes classes hydrologiques à un même dépôt de surface. De plus, il est important de mentionner que l'attribution actuelle des classes hydrologiques aux dépôts de surface reste imprécise. Pour pallier ce problème, une mise à jour de la classification des dépôts de surface a été réalisée. Les prochaines sections présentent la méthodologie utilisée ainsi que les résultats obtenus.

7.1.3 Mise à jour de la classification hydrologique des dépôts de surface

La mise à jour de la classification hydrologique des dépôts de surface a été réalisée à partir de la couche d'information géographique des dépôts de surface que possède le MTMDET (voir Tableau 2.2). Cette couche d'information comprend 11 654 197 polygones pour lesquels trois types d'information ont été retenus : 1) le nom du dépôt de surface ; 2) la classe de drainage ; et 3) le nombre de polygones associés à un dépôt de surface pour chaque classe de drainage. Cette approche a permis d'obtenir 979 combinaisons (nombre de polygones/classe de drainage) considérant tous les dépôts de surface de la couche d'information géographique. Par exemple, pour le dépôt de surface 1AAM (Till de Cochrane d'une épaisseur comprise entre 0.25 et 0.50 m), quatre combinaisons ont été identifiées (Tableau 7.4). Le Tableau 7.4 montre que quatre classes de drainage sont associées au dépôt de surface 1AAM et que ce dépôt de surface est majoritairement associé aux classes de drainage 30 et 40 (62 % et 26 % respectivement).

⁹ Cartes de dépôts de surface au nord du 53^e parallèle : <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/carte-des-depots-de-surface-du-nord-quebecois>

Tableau 7.4 – Nombre de polygones pour chaque classe de drainage associée au dépôt de surface 1AAM

Classe de drainage	Nombre de polygones	Valeur relative (%)
20	100	11
30	558	62
40	239	26
50	5	1
Total	902	100

Un lien a par la suite été établi entre la classe de drainage et la classification hydrologique. Les valeurs que peuvent prendre les classes de drainage dans la couche d'information géographique sont : 0 (drainage excessif), 10 (rapide), 20 (bon), 30 (modéré), 40 (imparfait), 50 (mauvais) et 60 (très mauvais). Le drainage correspond à la vitesse à laquelle l'eau s'infiltré dans le sol (Berger *et al.*, 2008). Bien entendu, le drainage n'est pas seulement conditionné par le dépôt de surface, d'autres facteurs, tels la pente du terrain ou encore le niveau de la nappe phréatique, ont une influence sur le drainage. Le dépôt de surface a tout de même été considéré suffisamment représentatif de la classe de drainage pour établir un lien entre ces deux éléments. La description des classes hydrologiques par USDA-NRCS (1986, Tableau 7.1), ainsi que la description des classes de drainage par Saucier *et al.* (1994), montrent notamment l'existence d'un lien important entre le dépôt de surface et la classe de drainage. Dans Saucier *et al.* (1994), le type de dépôt de surface est décrit pour chaque classe de drainage. Le Tableau 7.5 présente la classe de drainage associée à chaque classe hydrologique,

Tableau 7.5 - Lien entre les classes de drainage et les classes hydrologiques.

Classe hydrologique	A	B	C	D
Classe de drainage	0-10	20-30	40-50	60

Un point important nécessite toutefois d'être précisé en ce qui concerne le lien entre la classe de drainage et la classification hydrologique. Un sol ayant une classe de drainage faible (0-10, drainage très rapide) peut à la fois être lié à une classe hydrologique A (sol avec un faible potentiel de ruissellement) et D (sol avec un potentiel élevé de ruissellement). Ainsi, un sol épais et majoritairement constitué de sable aura généralement un drainage rapide et sera associé à la classe hydrologique A puisqu'il possède une capacité élevée d'infiltration. Ce sol aura donc tendance à se drainer rapidement en favorisant un écoulement de l'eau en profondeur et générera un faible

ruissellement. Toutefois, un sol très mince reposant sur le roc (code cartographique débutant par la lettre R), peu importe sa composition, aura également un drainage rapide mais sera associé à la classe hydrologique D en raison de l'imperméabilité du roc. Les eaux ruisselant sur ce type de dépôt seront dirigées rapidement vers les cours d'eau situés à proximité et favoriseront une réponse hydrologique importante et rapide. Dans Saucier *et al.* (1994), la classe de drainage excessive (0) est associée à la fois aux sols avec textures grossières et au roc à nu. Dès lors, cette association entre la classe de drainage et la classification hydrologique ne peut être appliquée à toutes les combinaisons de façon uniforme.

Les dépôts de surface organiques (code cartographique débutant par le chiffre 7) présentent également une situation particulière. Pour 99.9 % des polygones caractérisés par des dépôts de type organique, la classe de drainage associée est 50 ou 60. La classe hydrologique correspondant serait alors C ou D. Selon cette classification ce type de dépôt, associé aux milieux humides, générerait beaucoup de ruissellement et favoriserait une réponse hydrologique rapide. Toutefois, selon la revue de littérature sur ce sujet présenté à la Section 7.5, les milieux humides se comportent en quelque sorte comme des réservoirs et favorisent plutôt une réponse hydrologique lente.

Ainsi, la mise à jour de la classification hydrologique porte sur les dépôts de surface suivant : 1 (glaciaires), 2 (fluvio-glaciaires), 3 (fluviatiles), 4 (lacustres), 5 (marins), 6 (littoraux marins), 8 (de pente et d'altération) et 9 (éoliens) et sera présentée à la Section 7.1.3.1. Les dépôts de surfaces organiques (7) et rocheux (10) seront abordés à la Section 7.5 et à la Section 7.6 respectivement.

7.1.3.1 Procédure de mise à jour des dépôts de surface

La procédure de mise à jour des dépôts de surface a permis de compléter le Tableau 7.6 qui indique la classe hydrologique associée à 59 dépôts de surface. Pour statuer sur la classe hydrologique à retenir à partir des différentes classes de drainage associées à un dépôt de surface et pour compléter le Tableau 7.6, les critères suivants ont été établis :

1. Si une classe de drainage comprend plus de 75 % des polygones pour un dépôt de surface, seule cette classe est retenue pour identifier une classe hydrologique. C'est le cas du dépôt de surface 1AA pour lequel 80 % des polygones sont associés à la classe de drainage 40 et/ou 50 (classe hydrologique C, Tableau 7.6)
2. Lorsque la classe de drainage dominante comprend moins de 75 % des polygones, une flèche est ajoutée dans le sens de la seconde classe de drainage dominante. C'est le cas du dépôt de surface 1BG pour lequel 73 % des polygones sont associés à la classe de hydrologique B et 26 % à la classe hydrologique C (B \Rightarrow , Tableau 7.6).

3. Lorsque moins de 10 % sépare les deux classes de drainage dominantes, les deux classes hydrologiques correspondantes sont conservées. Cette situation survient notamment pour le dépôt de surface 3AE où la classe hydrologique C comprend 47 % des polygones alors que la classe hydrologique D en comprend 42 % (C-D, Tableau 7.6). Pour ces cas, les classes hydrologiques sont affichées par ordre décroissant d'importance.
4. Lorsque moins de 10 % sépare les deux classes hydrologiques suivant la classe hydrologique dominante, deux flèches ont été ajoutées à la classe hydrologique dominante (Tableau 7.6). C'est le cas du dépôt de surface 6A où la classe hydrologique dominante (B) comprend 44 % des polygones et les classes A et C se partagent 30 et 25 % des polygones ($\leftarrow B \Rightarrow$).

Ces critères ont permis d'associer une classe hydrologique aux dépôts de surface désignés dans ce document comme *principaux*, c'est-à-dire ceux pour lesquels l'épaisseur est de plus d'un mètre, soit 59 dépôts de surface (Tableau 7.6). La Section 7.1.3.2 porte sur l'épaisseur des dépôts de surface et sur la méthodologie visant à modifier la classe hydrologique des dépôts de surface principaux pour en tenir compte. Dans le Tableau 7.6, les cases en bleu signifient que la classe hydrologique pour ce dépôt de surface est la même que celle se trouvant au Tableau 3.4.2b de Transports Québec (2017) ou qu'une flèche pointe en direction de la classe hydrologique inscrite au Tableau 3.4.2b. Cette situation survient dans 23 cas sur 32. Ainsi, la mise à jour de la classification hydrologique des dépôts de surface n'a pas apportée de modifications majeures dans la majorité des cas. Les cases vertes indiquent que les nouvelles classes hydrologiques sont plus favorables au ruissellement et celles en orange indiquent le contraire. Ces situations surviennent pour huit et un dépôt de surface respectivement. Les lettres entre parenthèses correspondent aux classes hydrologiques du Tableau 3.4.2b de Transports Québec (2017). Le Tableau 7.7 présente une version épuré du Tableau 7.6 où seules les classes hydrologiques provenant de la mise à jour sont présentées.

Tableau 7.6 - Classes hydrologiques attribuées aux dépôts de surface principaux à partir des classes de drainage. Les cases bleues indiquent aucune modification par rapport aux classes suggérées dans Transports Québec (2017) alors que les cases vertes et oranges indiquent une diminution et une augmentation respectivement de la classe hydrologique par rapport aux valeurs de Transports Québec (2017). Les lettres entre parenthèses correspondent aux classes hydrologiques de Transports Québec (2017).

Dépôt															
Glaciaires		Fluvio-glaciaires		Fluviatiles		Lacustres		Marins		Littoraux marins		De pente et d'altération		Éoliens	
1	B	2	(A) B	3A	B ⇒	4A	C	5	B	6	(B) C	8	B (BC)	9	(B) B
1A	(B) B ⇒ C	2A	(A) B	3AC	C	4GA	(C) C	5A	C-B (C)	6A	⇐ B ⇒	8A	B (BC)	9A	B
1AA	(BC) C	2AE	(A) B	3AE	C-D	4GD	B	5G	⇐ C (C)	6S	(B) B	8AL	B ⇒	9S	B
1AB	(A) A ⇒ B	2AK	(A) B	3AN	⇐ C	4GS	B ⇒ (BC)	5L	C (C)			8AP	A		
1AD	⇐ C	2AT	(A) B	3D	(BC) C	4P	(B) B	5S	B-C (BC)			8AS	B ⇒		
1AS	B	2B	(B) B ⇒	3DA	C							8C	(B) B		
1B	B	2BD	(B) B	3DD	C							8E	(A) A-B		
1BC	B	2BE	(B) B	3DE	B							8F	(A) A		
1BD	B	2BP	B									8G	B (C)		
1BF	B (BC)											8P	B		
1BG	B ⇒														
1BI	(B) B														
1BN	B														
1BP	(A) B														
1BT	B														
1P	(A) B														

Tableau 7.7 - Classes hydrologiques attribuées aux dépôts de surface principaux

Dépôt															
Glaciaires		Fluvio-glaciaires		Fluviatiles		Lacustres		Marins		Littoraux marins		De pente et d'altération		Éoliens	
1	B	2	B	3A	B ⇒	4A	C	5	B	6	C	8	B	9	B
1A	B ⇒ C	2A	B	3AC	C	4GA	C	5A	C-B	6A	⇐ B ⇒	8A	B	9A	B
1AA	C	2AE	B	3AE	C-D	4GD	B	5G	⇐ C	6S	B	8AL	B ⇒	9S	B
1AB	A ⇒ B	2AK	B	3AN	⇐ C	4GS	B ⇒	5L	C		8AP	A			
1AD	⇐ C	2AT	B	3D	C	4P	B	5S	B-C		8AS	B ⇒			
1AS	B	2B	B ⇒	3DA	C						8C	B			
1B	B	2BD	B	3DD	C						8E	A-B			
1BC	B	2BE	B	3DE	B						8F	A			
1BD	B	2BP	B								8G	B			
1BF	B										8P	B			
1BG	B ⇒														
1BI	B														
1BN	B														
1BP	B														
1BT	B														
1P	B														

7.1.3.2 Épaisseur des dépôts de surface

Tel que mentionné précédemment, l'épaisseur des dépôts de surface peut varier et les classes hydrologiques doivent en tenir compte. Les paragraphes suivants expliquent comment les classes hydrologiques doivent être modifiées selon l'épaisseur des dépôts de surface.

1. Si la lettre Y s'ajoute à la suite du code du dépôt de surface (par exemple, 1AY), il est suggéré de conserver la même classe hydrologique. Cette lettre signifie que le dépôt a une épaisseur modale comprise entre 50 et 100 cm et que les affleurements rocheux sont très rares ou rares.
2. Si la lettre M précède ou s'ajoute à la suite du code du dépôt de surface (par exemple, M1A ou 1AM), il est suggéré d'utiliser le second dépôt de surface pour établir la classe hydrologique. Cette lettre signifie que le dépôt de surface est mince (entre 25 et 50 cm lorsque la lettre est à la suite du code et moins de 25 cm lorsque la lettre précède le code) et que les affleurements rocheux sont rares ou peu abondants.
3. Lorsque la lettre R précède le code du dépôt de surface, (par exemple, R1A), la classe hydrologique D doit être attribuée. Cette lettre signifie que le dépôt est mince à très mince, que l'épaisseur modale est inférieure à 50 cm et que les affleurements rocheux sont abondants.

7.1.4 Cartes pédologiques versus cartes de dépôts de surface

Afin d'uniformiser la conception des ponceaux, il est nécessaire d'établir la source à privilégier lorsqu'il est question d'estimer la réponse hydrologique potentielle moyenne du bassin-versant. Il est important de noter que ces deux sources présentent des incertitudes. En ce qui concerne les cartes pédologiques, une fraction seulement des séries de sols existantes ont été sujettes à des tests d'infiltration (157 séries de sols; Tabi *et al.*, 1990). Ces tests d'infiltration ont permis à Michaud *et al.* (2008) d'associer une classe hydrologique à ces séries de sols avec un bon niveau de certitude. Toutefois, la méthodologie utilisée par Gagné *et al.* (2013), bien que rigoureuse, repose sur certaines hypothèses et ne saurait prétendre être exacte quant à l'attribution de classes hydrologiques pour toutes les autres séries de sols.

Pour ce qui est de la classification hydrologique des cartes de dépôts de surface, il y a des incertitudes relatives à l'identification des dépôts de surface, qui repose sur l'interprétation de photographies aériennes et des incertitudes associées au lien établi entre la classe de drainage et la classe hydrologique. Ce dernier aspect est d'ailleurs discuté à la Section 7.1.3.1. Dès lors, sur la base de ces informations, il est difficile d'établir la source à favoriser.

Un argument, somme tout important, joue toutefois en faveur des cartes pédologiques. Celles-ci couvrent largement le sud du Québec où les zones urbanisées et agricoles sont plus importantes (voir Figure 7.1). Or il s'avère que la majorité des ponceaux entretenus par le MTMDET se trouve dans le sud du Québec. En effet, 57 % des ponceaux transversaux se trouvant dans l'inventaire du MTMDET sont situés au sud du 47^e parallèle nord (Figure 7.4). Dès lors, il est recommandé d'utiliser d'abord les cartes pédologiques pour établir la classification hydrologique des sols suivi des cartes de dépôts de surface lorsque ces dernières ne couvrent pas la zone désirée.

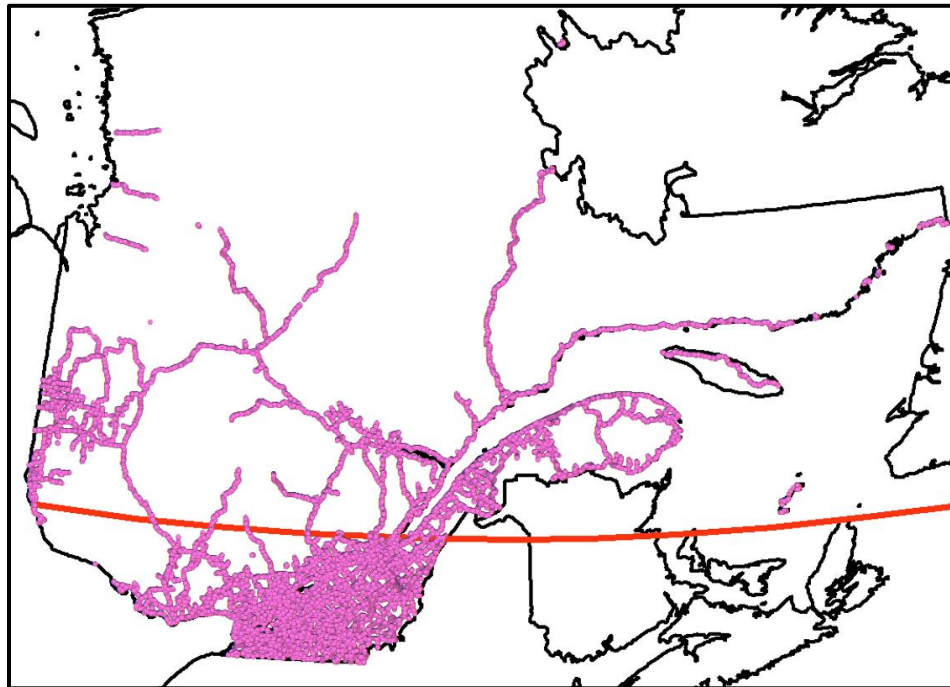


Figure 7.3 – Répartition spatiale des ponceaux transversaux de l'inventaire des ponceaux du MTMDET (ligne rouge : 47^e parallèle).

7.2 Pente moyenne des bassins-versants

L'estimation de la pente moyenne d'un bassin-versant peut être réalisée en utilisant différentes approches à partir de cartes topographiques. Chang *et al.* (1989) ont d'ailleurs comparés dix approches différentes sur 13 bassins-versants. La méthode présentée dans Transports Québec (2017) est celle de la grille de contour décrite par Linsley *et al.* (1949). Selon Chang *et al.* (1989), elle donne des résultats satisfaisants considérant son niveau de complexité. Cette méthode consiste à superposer une grille au bassin-versant. Le nombre d'intersections entre les lignes de la grille et les courbes

de niveau permet d'estimer la pente en question. Le calcul de la pente moyenne du bassin-versant se fait à partir de l'équation suivante :

$$S_b = \text{Intc} \frac{N_h + N_v}{L_h + L_v} \quad (7.2)$$

où S_b est la pente moyenne du bassin-versant, N_h et N_v sont les nombres de fois où une courbe de niveau coupent les lignes horizontales et verticales respectivement, Intc est la différence d'élévation entre les lignes de contour en mètre et L_h et L_v sont les longueurs totales (en mètres) des lignes horizontales et verticales couvrant le bassin.

Concernant la grille, Linsley *et al.* (1949) expliquent que la plus grande ligne possible doit d'abord être tracée dans le sens de l'écoulement de l'eau (Ligne 1 de la Figure 7.4). Par la suite, trois autres lignes doivent être tracées perpendiculairement à cette première ligne. L'une à 0.25 et les deux autres à 0.50 et 0.75 de la longueur du plus grand axe (Ligne 2, Ligne 3 et Ligne 4 respectivement de la Figure 7.4). Finalement, deux lignes parallèles au plus grand axe, situées à 50 % de la distance maximale de part et d'autre de cet axe, doivent être tracées (Ligne 5 et Ligne 6 de la Figure 7.4). Dès lors, un bassin-versant sera subdivisé en seulement 16 cellules d'environ 1 250 000 m². Aucune information n'a été trouvée à savoir si la taille des cellules avait une influence sur l'estimation de la pente moyenne. Dans le cadre du projet, la méthode de la grille de contour a été automatisée dans ArcGIS et quelques analyses ont été faites afin de vérifier l'influence de la taille des cellules. Il s'est avéré que des cellules de 2 500 m² (50 m x 50 m) à 90 000 m² (300 m x 300 m) donnaient des pentes moyennes très similaires. Au-delà de 300 mètres, les pentes estimées pouvaient varier de façon notable.

Quoi qu'il en soit, d'autres méthodes devraient être considérées pour estimer la pente moyenne d'un bassin-versant considérant la numérisation de la topographie d'un territoire à partir de données altimétriques et planimétriques (MNT). Au Québec, la couverture actuelle du MNT à l'échelle 1/20 000 est maintenant de près de 700 000 km² (2 768 feuilles de 250 km²) et s'étend jusqu'au 52^e parallèle. Dès lors, des fonctions accessibles dans ArcGIS devraient être utilisées pour estimer la pente moyenne des bassins-versants. L'une de ces fonctions¹⁰ (*Spatial Analyst Tools* → *Surface* → *Slope*) permet justement d'estimer la pente moyenne pour chaque cellule du MNT (pour le Québec, chaque cellule du MNT mesure 10 m²) considérant les huit autres cellules situées autour et estime de cette façon une pente moyenne pour l'ensemble du bassin-versant (Burrough et McDonnell, 1998). Quelques comparaisons des pentes moyennes

¹⁰ ArcGIS Slope : <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/slope.htm>, <http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm>

estimées à partir de l'Équation 7.2 et de la fonction «*Slope*» d'ArcGIS ont montré une cohérence entre les deux méthodes.

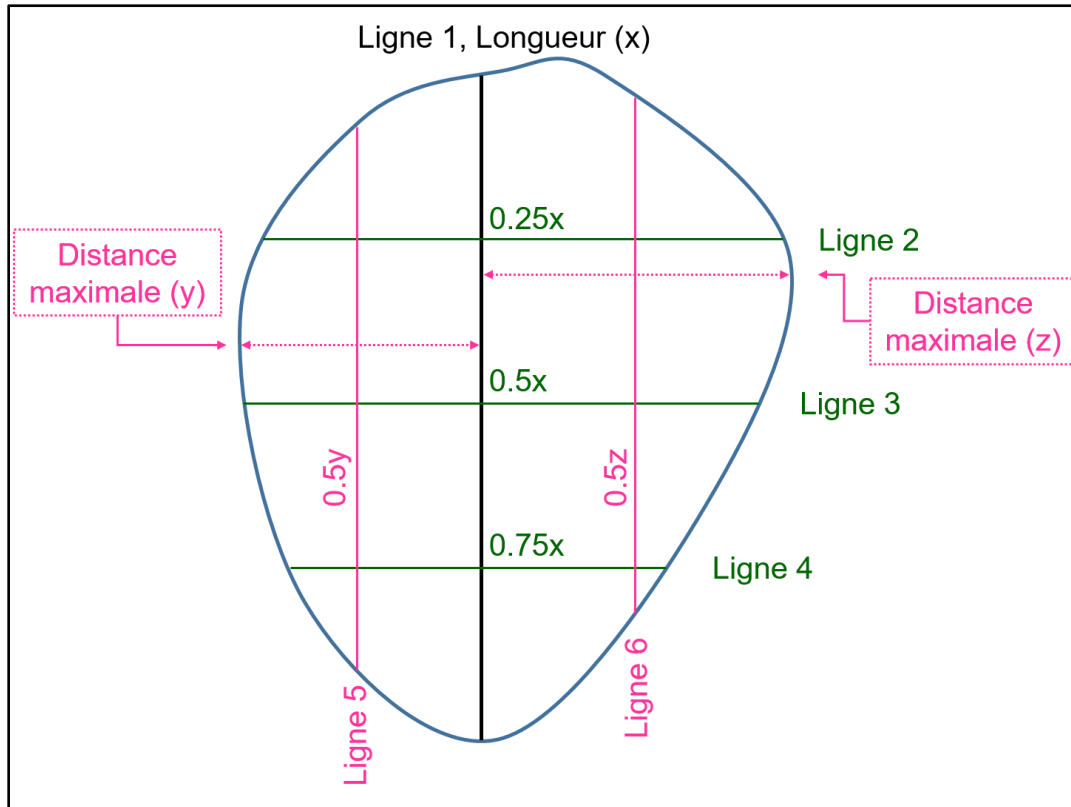


Figure 7.4 – Application de la grille pour l'estimation de la pente moyenne d'un bassin-versant selon Linsley *et al.* (1949).

Une attention particulière doit être accordée à l'utilisation de données LiDAR pour l'estimation de la pente moyenne du bassin-versant. En raison de la fine résolution spatiale des données LiDAR (cellules de 1 m²), les pentes moyennes estimées peuvent être largement supérieures. Plusieurs études ont d'ailleurs montré que la pente moyenne du bassin-versant est inversement proportionnelle avec la taille des cellules (Moglen et Hartman, 2001; Hill et Neary, 2005). Ces auteurs expliquent que des cellules de plus grandes tailles ont un effet de lissage sur la topographie à petite échelle.

7.3 Occupation du territoire

L'occupation du territoire se définit essentiellement par les cultures, les pâturages et les forêts. Les informations les plus utiles à ce sujet se trouvent dans l'IAC (voir Section 4.2). Cet inventaire est divisé en 67 occupations différentes et pour chacune d'elles, un code et une couleur ont été attribués (Tableau 7.8). Cet inventaire est mis à jour annuellement et est présenté sous forme de cartes numériques indiquant notamment les types de cultures ainsi que les zones forestières. Ayant à la base été élaboré pour les Prairies, il couvre aujourd'hui plusieurs autres provinces, dont le Québec. Présentement cet inventaire permet d'identifier les différentes occupations du sol avec une précision d'au moins 85 % considérant une résolution spatiale de 30 m. Puisque l'IAC ne couvre pas l'entièreté de la province de Québec, la couverture de sol circa 2000 peut également être consultée (voir Section 5.2).

Pour l'utilisation de l'IAC dans le cadre de l'application de la MÉRA, les occupations du territoire ont été regroupées selon les types de végétation du Tableau 3.4.1a du Manuel des ponceaux : 1) culture, 2) pâturage et 3) boisé. Les paragraphes suivants donnent plus de détail sur ces regroupements :

1. Nuage (10) – Il est important de mentionner d'abord que l'occupation «nuage» (Surface non classifiée à cause des nuages, ombrage ou autres), est rarement attribuée. L'IAC 2016 ne comprend d'ailleurs aucune superficie associée au nuage pour le Québec. Si cette situation devait survenir pour des années ultérieures, il est suggéré à ce moment d'utiliser un inventaire des années antérieures.
2. Eau (20) – Dans la mesure où les lacs et les cours d'eau sont identifiés à partir de d'autres sources d'information (voir Tableau 2.2), cette occupation ne devrait pas être prise en compte à partir de l'IAC.
3. Sols nus et terres stériles (30) – Pour cette occupation, nous suggérons de se rapporter au Tableau 3.4.1b du Manuel de conception des ponceaux (Transports Québec, 2017). La fourchette de valeurs associée à «Terrain vague» devrait être retenue.
4. Milieu urbain et bâti (34) – En fonction du type de milieu urbain et bâti, l'utilisateur devrait se rapporter aux différentes descriptions du Tableau 3.4.1b du Manuel de conception des ponceaux (Transports Québec, 2017).
5. Serres (35) – Pour cette occupation, nous suggérons de se rapporter au Tableau 3.4.1b du Manuel de conception des ponceaux (Transports Québec, 2017). La fourchette de valeur associée à «Toiture» devrait être retenue. Il est important toutefois de mentionner que ce type d'occupation est marginal et qu'au Québec elle ne couvre que 0.005 km² dans l'IAC 2016.
6. Arbustaie (50) – Boisé
7. Terres humides (80) – Les terres humides doivent être associées aux lacs et aux milieux humides» (voir la Section 7.5 pour plus de détails sur le coefficient

de ruissellement à attribuer). Attention, pour les régions couvertes par la Couche détaillée des milieux humides du MDDELCC et de Canards Illimités, nous suggérons fortement de favoriser cette couche d'information plutôt que l'IAC.

8. Prairies (110) – Pâturage
9. Agriculture indifférenciée (120) – Nous suggérons d'associer cette occupation à «culture». Il est important toutefois de mentionner que ce type d'occupation est marginal et qu'au Québec elle n'apparaît pas dans l'IAC 2016.
10. Pâturage et Cultures fourragères (122) – Selon AAC (2016), il s'agit de terre périodiquement cultivée comprenant des herbes cultivées et d'autres cultures pérennes (vivaces) telles que la luzerne et le trèfle cultivés seuls ou en mélanges pour le foin, pâturage ou semences. Dans ce contexte, nous suggérons d'associer cette occupation à «pâturage».
11. Trop humide pour l'ensemencement (130) – Selon AAC (2016), il s'agit de champs agricoles qui sont normalement ensemencés mais qui restent non ensemencés en raison de l'excès d'humidité en printemps. Ainsi, puisqu'il est question de champs agricoles, nous suggérons d'associer cette occupation à «culture». Il est important toutefois de mentionner que ce type d'occupation est marginal et qu'au Québec elle n'apparaît pas dans l'IAC 2016.
12. Jachère (131), Céréales (132), Orge (133), Autres céréales (134), Millet (135), Avoine (136), Seigle (137), Épeautre (138), Triticale (139), Blé (140), Panic érigé (141), Sorgho (142), Blé d'hiver (145), Blé de printemps (146), Maïs (147), Tabac (148), Ginseng (149), Oléagineux (150), Bourache (151), Caméline (152), Canola et Colza (153), Lin (154), Moutarde (155), Carthame (156), Tournesol (157), Soya (158), Légumineuses (160), Pois (162), Haricot (167), Lentilles (174), Légumes (175), Tomates (176), Pomme de terre (177), Betterave à sucre (178) et Autres légumes (179) – Nous suggérons d'associer toutes ces occupations à «culture».
13. Fruits (180), Petits fruits (181), Bleuets (182), Autres petits fruits (185), Verger (188), Autres fruits (189) et Vignobles (190) – Nous suggérons d'associer toutes ces occupations à «culture». Bien que ces occupations soient caractérisées majoritairement par la présence d'arbustes et d'arbres, elles ne doivent pas être associées à un milieu forestier ou boisé. Pour ces types d'occupation, plusieurs facteurs peuvent mener à une compaction des sols favorisant la formation de ruissellement. Parmi ces facteurs, notons : 1) le transport de machineries diverses (Soane et Ouwkerk 1995), 2) le piétinement (Edmondson *et al.*, 2011), que ce soit par les employés ou par les clients lorsque les sites sont accessibles pour l'autocueillette, et 3) l'altération de la structure du sol en surface en raison de l'impact des gouttes de pluies (Musgrave 1955; Linsley *et al.* 1982; Zapata-Sierra et Manzano-Agugliaro 2008) entre les rangs où l'interception de la pluie par la végétation peut être nulle.
14. Canneberge (183) – La culture de canneberge présente des caractéristiques bien spéciales avec la présence de bassins et des périodes d'inondations temporaires dans les champs. Pour le Québec, la superficie de l'IAC 2016

associée à cette culture n'est que de 0.14 km². Toutefois, au Québec¹¹, la culture de canneberge couvrirait environ 31 km². Il est donc difficile d'associer cette culture à l'une ou l'autre des végétations du Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux (Transports Québec, 2017). Une revue de littérature sur la réponse hydrologique associée à ce type de culture pourrait être nécessaire pour aller de l'avant. Actuellement, nous suggérons de considérer tous bassins-versants comprenant de la culture de canneberge comme un cas unique.

15. Houblon (191), Gazon en plaques (192), Fines herbes (193), Pépinière (194), Sarrasin (195), Graines à canaris (196), Chanvre (197), Vesce (198) et Autres cultures (199) – Nous suggérons d'associer toutes ces occupations à «culture».
16. Forêt indifférenciée (200), Forêt de conifères (210), Forêt de feuillus (220) et Forêt mixte (230) – Nous suggérons d'associer toutes ces occupations à «boisé»

¹¹ Culture de la canneberge: <http://www.notrecanneberge.com/Industrie/Infos/profil.html>, voir également Poirier (2010).

Tableau 7.8 – Occupations du territoire selon l’inventaire annuel des cultures d’AAC.

Code	Occupation	Couleur		
		Rouge	Vert	Bleu
10	Cloud / Nuages	0	0	0
20	Water / Eau	51	51	255
30	Exposed Land and Barren / Sols nus et terres stériles	153	102	102
34	Urban and Developed / Milieu urbain et bâti	204	102	153
35	Greenhouses / Serres	225	225	225
50	Shrubland / Arbustaie	255	255	0
80	Wetland / Terres humides	153	51	153
110	Grassland / Prairies	204	204	0
120	Agriculture (undifferentiated) / Agriculture (indifférenciée)	204	102	0
122	Pasture and Forages / Pâturage et Cultures fourragères	255	204	51
130	Too Wet to be Seeded / Trop humide pour l’ensemencement	120	153	246
131	Fallow / Jachère	255	153	0
132	Cereals / Céréales	102	0	0
133	Barley / Orge	218	227	29
134	Other Grains / Autres céréales	214	204	0
135	Millet / Millet	210	219	37
136	Oats / Avoine	209	213	43
137	Rye / Seigle	202	206	50
138	Spelt / Épeautre	195	198	58
139	Triticale / Triticale	185	188	68
140	Wheat / Blé	167	179	77
141	Switchgrass / Panic érigé	185	198	78
142	Sorghum / Sorgho	153	153	0
145	Winter Wheat / Blé d’hiver	146	165	91
146	Spring Wheat / Blé de printemps	128	151	105
147	Corn / Maïs	255	255	153
148	Tobacco / Tabac	152	136	124
149	Ginseng / Ginseng	121	155	147
150	Oilseeds / Oléagineux	94	162	99
151	Borage / Bourrache	82	174	119
152	Camelina / Caméline	65	191	122
153	Canola and Rapeseed / Canola et Colza	214	255	112
154	Flaxseed / Lin	140	140	255
155	Mustard / Moutarde	214	204	0
156	Safflower / Carthame	255	127	0
157	Sunflower / Tournesol	49	84	145
158	Soybeans / Soya	204	153	51
160	Pulses / Légumineuses	137	110	67

Code	Occupation	Couleur		
		Rouge	Vert	Bleu
162	Peas / Pois	143	108	61
167	Beans / Haricots	130	101	74
174	Lentils / Lentilles	184	89	0
175	Vegetables / Légumes	183	75	21
176	Tomatoes / Tomates	255	138	138
177	Potatoes / Pomme de terre	255	204	204
178	Sugarbeets / Betterave à sucre	111	85	202
179	Other Vegetables / Autres légumes	255	204	255
180	Fruits / Fruits	220	84	36
181	Berries / Petits fruits	208	90	48
182	Blueberry / Bleuet	210	0	0
183	Cranberry / Canneberge	204	0	0
185	Other Berry / Autres petits fruits	220	50	0
188	Orchards / Vergers	255	102	102
189	Other Fruits / Autres fruits	197	69	59
190	Vineyards / Vignobles	116	66	189
191	Hops / Houblon	255	204	204
192	Sod / Gazon en plaques	181	251	5
193	Herbs / Fines herbes	204	255	5
194	Nursery / Pépinière	7	249	140
195	Buckwheat / Sarrasin	0	255	204
196	Canaryseed / Graines à canaris	204	51	204
197	Hemp / Chanvre	142	118	114
198	Vetch / Vesce	177	149	79
199	Other Crops / Autres cultures	116	154	102
200	Forest (undifferentiated) / Forêt (indifférenciée)	0	153	0
210	Coniferous / Forêt de conifères	0	102	0
220	Broadleaf / Forêt de feuillus	0	204	0
230	Mixedwood / Forêt mixte	204	153	0

7.4 Coefficient de ruissellement en milieu urbain

Plusieurs valeurs de coefficients de ruissellement ont été proposées dans la littérature pour différents types de secteurs (zones commerciale, industrielle, résidentielle, terrain de jeu, etc.) 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).

Les valeurs publiées du coefficient de ruissellement et qui sont 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; voir le Tableau G.1 de l'Annexe G). Ces valeurs se retrouvent dans le Manuel de conception des ponceaux (Transports Québec, 2017) au Tableau 3.4.1b. Ces valeurs 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'expert 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 coefficient de ruissellement généralement acceptées.

Selon Dhakal *et al.* (2012), ces valeurs sont considérées comme des valeurs de coefficient de ruissellement rationnel plutôt que des valeurs de coefficient de ruissellement volumétrique (voir Section 4.1) puisqu'elles n'ont pas été estimées à partir de relation précipitation/ruissellement et parce qu'elles sont cohérentes avec le sens premier donné à ce paramètre par Kuichling (1889). En effet, celui-ci avait déterminé que la relation entre le débit de pointe et l'intensité de la précipitation était déterminée par le niveau d'imperméabilisation d'un bassin-versant. Ainsi, un coefficient de ruissellement de zéro correspond à une zone complètement perméable alors qu'un coefficient de ruissellement de 1.0 correspond à une zone imperméable.

Considérant que les coefficients de ruissellement rapportées par ASCE et WPCF (1969) n'aient jamais été mise à jour, ces valeurs représentent toujours la référence principale en zones urbaines. Dès lors, l'utilisation du Tableau 3.4.1b du Manuel de conception des ponceaux est tout à fait justifiée.

7.5 Coefficient de ruissellement en milieu rural

Différentes valeurs du coefficient de ruissellement ont été proposées pour les zones moins imperméabilisées, p. ex. milieux ruraux et forestiers (Tableaux G.2, G.3 et G.4 de l'Annexe G). Les valeurs proposées dans les ouvrages Schwab (1957), Dunne et Leopold (1978) et Schwab et Frévert (1985) semblent elles aussi subjectives et, dans

une certaine mesure, 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.

Ce contexte montre dans quelle mesure la détermination des valeurs de coefficients de ruissellement à partir de données observées a reçu à ce jour peu d'attention. Cette lacune a été plusieurs fois soulignée (Young *et al.*, 2009; Dhakal *et al.*, 2013b).

Schaake *et al.* (1967) ont été parmi les premiers à estimer des coefficients de ruissellement à partir de données de débit et de précipitation. Ils ont ainsi évalué les coefficients de ruissellement de 20 petits bassins-versant urbains (< 0.6 km²) situés à Baltimore (É.U.). Suite à leur analyse, Schaake *et al.* (1967) ont rapporté des valeurs comprises entre 0.29 et 1.01. Selon Young et McEnroe (2014), suivant l'interprétation probabiliste de la MÉRA, il est tout à fait possible d'obtenir une valeur du coefficient de ruissellement supérieure à un.

French *et al.* (1974) ont pour leur part estimé des coefficients de ruissellement pour 37 bassins-versants ruraux de moins de 250 km² situés à Sydney en Australie. Pour la période de retour 10 ans, les 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 coefficient de ruissellement dépend de façon importante des conditions locales.

Hotchkiss et Provaznik (1995) ont évalué des valeurs se situant entre 0.20 et 0.82 pour la période de retour 10 ans sur 24 petits bassins-versants agricoles du Nebraska (E.U.). Ces auteurs mentionnent que les valeurs moyennes du coefficient de ruissellement 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 coefficients de ruissellement évalués à partir de données observées, dans leur cas 72 bassins-versants du Kansas (E.U.) de moins de 78 km², varient grandement avec des valeurs allant de 0.11 et 0.32 pour la période de retour 2 ans et de 0.59 à 0.97 pour la période de retour 100 ans. De plus, leurs travaux montrent que les valeurs obtenues suite à cette analyse sont plus élevées que celles proposées dans ASCE et WPCF (1969), exceptées pour la période de retour deux ans.

Plus récemment, Dhakal *et al.* (2013b) ont obtenu des résultats similaires à ceux de Young *et al.* (2009) pour 20 bassins-versants ruraux et 16 bassins-versants urbains situés au Texas (E.U.) dont les superficies varient entre 2.3 et 320 km². Ces auteurs ont

obtenu des coefficients de ruissellement de 0.08 à 0.39 pour la période de retour 2 ans et de 0.34 à 1.44 pour la période de retour 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 coefficients de ruissellement 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.

Le coefficient de ruissellement est fonction de l'occupation du territoire, du type de sol et de la pente or très peu de détails sont fournis dans les articles où l'on présente des estimations empiriques de ces coefficients. Ainsi, dans Schaake et al, (1967), les informations disponibles sont la superficie, l'imperméabilisation, la longueur et la pente du chenal des bassins-versants. French *et al.* (1974) ne donnent que la superficie des bassins-versants, même chose pour Hotchkiss et Provaznik (1995) qui ajoutent une brève description du territoire où se trouvent les bassins-versants : « *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 appliqués à d'autres bassins de caractéristiques données.

Cette revue de littérature démontre qu'il n'existe pas de référence en matière de coefficients de ruissellement en zones rurales et que les études réalisées à ce sujet ne permettent pas de fixer des valeurs considérant différentes occupations du territoire et différentes caractéristiques physiographiques. Dans ce contexte, les valeurs présentées dans le Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux sont considérées, jusqu'à preuve du contraire, comme valides.

7.5.1 Modification du Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux

En premier lieu, il est important de noter que l'origine des valeurs présentées dans le Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux est inconnue. De plus, et tel que mentionné précédemment, la revue de littérature précédente (Section 7.5) ne permet pas d'apporter quelques modifications que ce soient sur les coefficients de ruissellement présentés dans ce tableau. Toutefois, au cours de la Phase II du projet, des analyses plus approfondies sur le sujet seront réalisées et pourraient permettre de réviser certaines de ces valeurs.

Quoi qu'il en soit, certaines modifications pourraient déjà être apportées à ce tableau afin qu'il soit cohérent avec les classes hydrologiques attribuées aux séries de sols des cartes pédologiques et aux dépôts de surface (voir Section 7.1). Ainsi, les classes

hydrologiques AB et BC du Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux devraient être retirées et la classe CD devrait être attribuée à la classe D.

7.6 Coefficient de ruissellement pour les lacs et les milieux humides

Si peu d'études ont tenté d'évaluer des coefficients de ruissellement à partir de données observées en milieu urbain et rural, la situation est encore plus problématique lorsqu'il est question de bassin comportant des lacs et des milieux humides. À ce sujet, il est important de rappeler que la MÉRA ne tient pas compte de l'emmagasinement temporaire des eaux dans un bassin-versant et qu'elle ne devrait être appliquée que lorsque cet effet est négligeable (Yen, 1992; Pilgrim et Cordery, 1993).

Ce manque de connaissances sur les valeurs de coefficients de ruissellement à appliquer pour les bassins avec des lacs et des milieux humides peut s'expliquer en partie par la grande complexité de la réponse hydrologique de ce type de bassins. Conger (1971) mentionne que les milieux humides peuvent réduire jusqu'à 75 % les débits de pointe lorsqu'ils représentent 20 % de la superficie. Verry *et al.* (1988) ont observé que les débits d'un bassin-versant de 10 ha situé au Minnesota (É.U.) et comprenant de nombreuses tourbières étaient d'une certaine façon contrôlés par l'effet réservoir des tourbières. Toujours selon ces auteurs, cet effet ne persisterait pas au-delà d'un événement pluvieux dont la récurrence est supérieure à environ 25 ans en raison de la formation de chenaux qui accéléreraient l'écoulement des eaux.

Serban *et al.* (1988) ont comparé la réponse hydrologique de deux bassins-versants adjacents. L'un d'eux comprenait de nombreuses tourbières (bassin A) alors que l'autre était considéré comme un bassin-versant typique (bassin B). Les deux bassins-versants étaient par ailleurs similaires en termes de superficie totale, longueur d'écoulement du réseau hydrographique, pente et couvert végétal. Ces auteurs ont constaté que :

- Le ruissellement généré par le bassin A est de 30 à 35 % inférieur au bassin B lorsque la précipitation moyenne sur l'ensemble des bassins-versant est identique;
- Les débits de pointe générés par le bassin A sont inférieurs à ceux du bassin B lorsque la précipitation moyenne sur l'ensemble des bassins-versant est identique;
- Le ruissellement et les débits générés par le bassin A sont inférieurs à ceux du bassin B et ce, même lorsque la hauteur de précipitation reçue est supérieure.

Ces résultats semblent suggérer que les lacs et les milieux humides ont un impact important sur la réponse hydrologique, notamment par une réduction des débits de pointe expliquée par un effet de laminage. Aucune information n'a toutefois été trouvée en ce qui concerne une possible réduction des volumes de ruissellement associés aux lacs et aux milieux humides. À ce titre, Dhakal *et al.* (2012) ont attribué un coefficient de ruissellement de 1.0 à tous les bassins-versants à l'étude (90 bassins-versants), suggérant que les lacs et les milieux humides ont un impact nul en matière de réduction

des volumes de ruissellement. D'ailleurs, les discussions sur le sujet avec les membres du comité de suivi du projet allaient également dans cette direction. Actuellement, le MTMDET utilise un coefficient de ruissellement de 0.05 pour les milieux humides (marais, marécages et tourbières) et un de 0.9 à 1.0 pour les lacs. Il semblerait judicieux d'apporter des modifications à ce niveau. D'abord, un coefficient de ruissellement commun devrait être utilisé pour les lacs et les milieux humides. Ce coefficient devrait être unique puisque les lacs et les milieux humides sont peu influencés par l'occupation du sol (culture, pâturage et boisé) et par la pente puisqu'il se trouve généralement sur un terrain plat ou dans des dépressions. Finalement, un coefficient de ruissellement élevé (0.90), mais non nul, considérant que la rétention des eaux de ruissellement implique un potentiel d'évaporation plus grand, devrait être retenu.

Ce coefficient de ruissellement devrait par la suite être associé à tous les lacs provenant de l'hydrographie de surface (voir Tableau 2.2), à tous les dépôts de surface organiques associés aux codes topographiques 7E et 7T (voir Section 7.1.3.1) qui correspondent essentiellement à des milieux humides (marais, marécages et tourbières), à tous les milieux humides présents dans la couche détaillée des milieux humides du MDDELCC et de Canards Illimités (voir Section 5.2), à tous les terres humides (code 80) de l'IAC (voir Section 5.2) et à toutes les terres humides de la couche «circa 2000» (code 80 à 83, voir Section 5.2).

7.7 Coefficient de ruissellement pour les dépôts rocheux

Actuellement, des classes hydrologiques variant entre BC et CD sont données aux dépôts rocheux dans Transports Québec (2017). La variation dépend essentiellement de la localisation du dépôt. 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 dépôts 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 concernant la formation de ruissellement considérant des dépôts rocheux de différentes natures. Dès lors, il semble peu justifié de faire une distinction entre les dépôts rocheux des Appalaches et du Bouclier canadien. De plus, il serait plus approprié d'attribuer directement un coefficient de ruissellement aux dépôts rocheux. L'attribution d'une classe hydrologique variant entre BC et CD, implique des valeurs de coefficients de ruissellement qui varieraient entre 0.21 et 0.73 selon le Tableau 3.4.1a de Transports Québec (2017). Or, ces valeurs semblent faibles considérant la nature de ces dépôts. De plus, il est difficile d'expliquer, d'un point de vue hydrologique, toute l'étendue de cette fourchette de valeur. Dès lors, un coefficient de ruissellement unique, de 0.90, pourrait être utilisé pour tous les dépôts rocheux.

7.8 Impact de la période de retour sur le coefficient de ruissellement

Le coefficient de ruissellement est sensible à la période de retour de l'événement de pluie considéré (Hoang, 1979). Selon Hingray *et al.* (2009), la réactivité d'un bassin-versant sera d'autant plus rapide que la précipitation est intense. Ainsi, un événement plus intense pourra générer davantage de ruissellement hortonien¹² et favorisera donc un coefficient de ruissellement plus élevé (Hotchkiss et Provaznik, 1995; Hingray *et al.*, 2009). Dans ce contexte, le coefficient de ruissellement peut être considéré comme une fonction de la période de retour (Pilgrim et Cordery, 1993; Hotchkiss et Provaznik, 1995; Titmarsh *et al.*, 1995).

Des ajustements du coefficient de ruissellement en fonction de la période de retour ont été proposés dans des documents d'hydrologie générale tels ceux de Gupta (1989) et de Viessman et Lewis (2003). Il est important de mentionner que les valeurs présentées dans ces ouvrages proviennent, selon Dhakal *et al.* (2013b), de sources antérieures tel le manuel de conception de gestion des eaux pluviales du Denver de 1969 (*Urban Storm Drainage Criteria Manual*; voir Waugh *et al.*, 2002 et Jens, 1979).

¹² Le ruissellement hortonien survient lorsque l'apport en pluie est plus grand que les capacités d'infiltration du sol (Hingray *et al.*, 2009).

Le facteur de correction (f) est défini par l'expression :

$$f = \frac{C_R(T)}{C_R(10)} \quad (7.1)$$

où T est la période de retour et $C_R(10)$ est la valeur du coefficient de ruissellement pour la période de retour 10 ans. La Figure 7.5 permet de constater que les valeurs de ce facteur de correction varient de façon importante selon les sources.

Ces sources peuvent être divisées en deux groupes. Le premier groupe suggère des facteurs de correction en milieu urbain (French, 1974; Gupta, 1989; Viessman et Lewis 2003; Jens 1979 «65 % *imperméable*»). Le second groupe s'applique quant à lui au milieu rural ou à des bassins-versants naturels (Jens, 1979 «0 % *imperméable*»; Young *et al.*, 2009; Dhakal *et al.*, 2013b).

Pour Gupta (1989) et Viessman et Lewis (2003), aucun facteur de correction n'est proposé pour les périodes de retour inférieures à 10 ans. L'absence de modification du coefficient de ruissellement pour ces périodes de retour provient fort probablement de Schaake *et al.* (1967) qui ont observé une augmentation moyenne du coefficient de ruissellement, pour les périodes de retour 1 et 10 ans, de seulement 10 % et qui ont conclu qu'il serait raisonnable d'utiliser une valeur unique pour cette fourchette de période de retour. ASCE et WPCF (1969) ont rapporté un résultat similaire. Dans ce guide, il est précisé que les valeurs des coefficients de ruissellement proposées sont valables pour les événements pluvieux de périodes de retour 5 et 10 ans et que des valeurs plus élevées devraient être utilisées pour des événements moins fréquents. Cela permet aussi d'expliquer que la période de retour 10 ans est régulièrement utilisée à titre de référence pour déterminer le facteur de correction.

Une grande fourchette de valeurs est proposée pour les facteurs de corrections associés aux périodes de retour inférieures à 10 ans, surtout pour les bassins-versants naturels ce qui concorde avec les résultats de Hotchkiss et Provaznik (1995). Sur la base de ces informations, le coefficient de ruissellement pourrait être réduit de moitié et du quart pour les périodes de retour deux et cinq ans comparativement à la période de retour 10 ans.

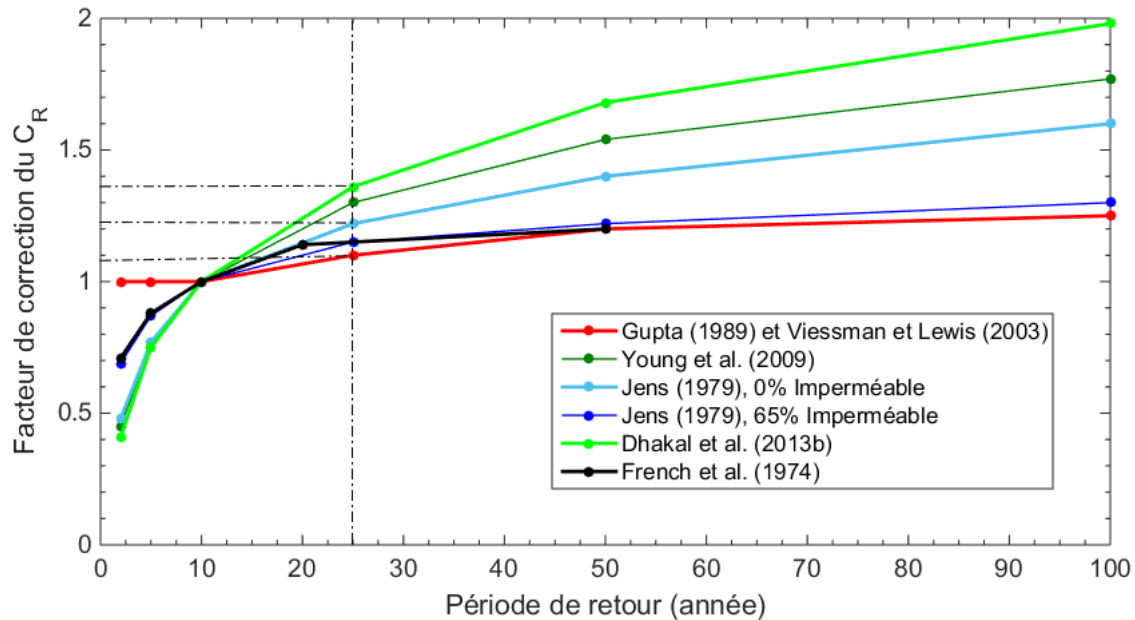


Figure 7.5 - Facteur de correction du coefficient de ruissellement fonction de la période de retour de la pluie selon différentes études. La période de retour de référence est 10 ans.

Pour la période de retour 25 ans, qui est souvent utilisée pour la conception des ponceaux au Québec sur des bassins-versants de moins de 25 km², les écarts entre les différentes valeurs du facteur de correction proposées dans la littérature sont importants, allant de 1.10 à 1.36 (Figure 7.5). Toutefois, si les facteurs de correction provenant de Gupta (1989), Viessman et Lewis (2003) ainsi que de Jens (1979) (cas à 65% imperméable) ne sont pas considérés puisqu'ils représentent davantage des bassins-versants urbains, l'écart se réduit (1.22 à 1.36).

Pour les périodes de retour 50 et 100 ans, les valeurs de Gupta (1989), Viessman et Lewis (2003) et de Jens (1979) (cas à 65% imperméable) se distinguent des autres. Ces valeurs, ayant une composante urbaine plus importante, sont nécessairement associées à des coefficients de ruissellement plus élevés que les valeurs de Jens (1979) (cas avec 0% imperméable), Young *et al.* (2009) et Dhakal *et al.* (2013b). Elles sont donc moins sensibles à la période de retour, ce qui explique les facteurs de correction moins élevés pour les périodes de retour 50 et 100 ans.

Le Tableau 7.9 montre les facteurs de correction pouvant être appliqués au coefficient de ruissellement, en milieu naturel et urbain pour différentes périodes de retour, selon la revue de littérature discutées précédemment.

Tableau 7.9 - Facteurs de correction à appliquer aux valeurs de coefficient de ruissellement en milieu urbain et rural (la valeur de référence est pour la période de retour 10 ans).

Période de retour	Facteur de correction	
	Urbain	Rural
2	0.6	0.4 - 0.5
5	0.8 - 0.9	0.7 - 0.8
10	1	1
25	1.1	1.2 - 1.4
50	1.1 - 1.2	1.4 - 1.7
100	1.2	1.6 - 1.8

7.8.1 Considération en milieu urbain

Actuellement, le MTMDET utilise les valeurs de coefficient de ruissellement provenant de ASCE et WPCF (1969) pour les zones urbaines (Tableau 3.4.1b de Transports Québec, 2017). Tel que mentionné précédemment, ces valeurs sont théoriquement valables pour les événements pluvieux de périodes de retour 5 et 10 ans et des valeurs plus élevées pourraient être utilisées pour des événements moins fréquents. Toutefois, considérant que les facteurs de correction en milieu urbain sont faibles (Tableau 7.9) et que les bases scientifiques venant appuyer ces facteurs sont peu solides, il n'apparaît pas justifier de les utiliser.

Il est important de mentionner que dans le cadre de ce projet (Phase I et II), il ne sera pas possible de valider ou réfuter ces facteurs de correction en raison de la faible représentation du milieu urbain dans les bassins-versants à l'étude (voir Figure 2.9). Une instrumentation visant à mesurer les débits et les précipitations sur des bassins-versants présentant des zones urbaines variées devrait être envisagée afin de mieux quantifier l'impact de la période de retour sur les coefficients de ruissellement.

7.8.2 Considération en milieu rural

Les facteurs de correction présentés à la Figure 7.9 ne devraient pas être appliqués aux valeurs de coefficient de ruissellement du Tableau 3.4.1a de Transports Québec (2017) puisque leur provenance est inconnue et qu'il est impossible d'associer une période de retour de référence à ces valeurs. Toutefois, la comparaison des quantiles de débit (voir Section 3.3) et des débits de pointe estimés avec la MÉRA, considérant différentes périodes de retour, permettra d'établir si des facteurs de correction doivent être appliqués pour certaines périodes de retour. Cet aspect sera discuté dans le Chapitre 8, mais des analyses plus approfondies seront réalisées au cours de la Phase II du projet.

7.9 Recommandations

1. Il est recommandé de privilégier, comme première source d'information, les cartes pédologiques pour la classification hydrologique des sols. Lorsque ces dernières ne couvrent pas la zone désirée, les cartes de dépôts de surface doivent être utilisées.
2. La classification hydrologique des sols réalisée par l'IRDA (Gagné *et al.*, 2013) est à privilégier lors de l'utilisation des cartes pédologiques. Il est important de rappeler qu'une mise à jour de cette classification est prévue au printemps 2018. Dès lors, une vérification sera nécessaire afin de vérifier si une classe hydrologique est associée à toutes les séries de sols des cartes pédologiques.
3. La mise à jour de la classification hydrologique des dépôts de surface réalisée dans la cadre de ce projet est à privilégier lors de l'utilisation des cartes de dépôts de surface.
4. L'utilisation d'un système d'information géographique et d'un modèle numérique de terrain est suggérée pour l'estimation de la pente moyenne d'un bassin-versant.
5. Dans la mesure où il n'est pas possible d'utiliser un système d'information géographique pour l'estimation de la pente moyenne d'un bassin-versant, il est recommandé de continuer d'utiliser la technique de la grille décrite dans le Manuel de conception des ponceaux à la Section 3.4.3.
6. Il est suggéré d'utiliser l'inventaire annuel des cultures du Canada pour caractériser l'occupation du territoire en raison de sa précision et de sa mise à jour annuel.
7. Il est suggéré d'utiliser la Couche détaillée des milieux humides du MDDELCC et de Canards Illimités lorsque sa couverture convient puisqu'elle est basée sur des observations sur le terrain et est plus précise notamment quant à l'identification des types de milieux humides.
8. Il est recommandé d'utiliser les coefficients de ruissellement du Tableau 3.4.1b du Manuel de conception des ponceaux pour les zones urbaines. De plus, il n'est pas recommandé d'appliquer un facteur de correction pour les coefficients de ce tableau en raison notamment de la plus faible influence de la période de retour en milieu urbain.
9. Il est recommandé de modifier le Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux en éliminant les classes hydrologiques AB et BC et en remplaçant la classe CD par D.
10. Il n'est pas recommandé actuellement d'appliquer un facteur de correction aux coefficients de ruissellement du Tableau 3.4.1a de Transports Québec (2017) peu importe la période de retour considérée.
11. Il est recommandé d'utiliser un coefficient de ruissellement commun pour les lacs et les milieux humides. Une valeur de 0.90 est suggérée considérant que l'impact des lacs et milieux humides sur la réduction des volumes de ruissellement est faible.

12. Il est recommandé d'utiliser un coefficient de ruissellement commun pour tous les dépôts rocheux. Une valeur de 0.90 est suggérée.

Chapitre 8. Validation de la MÉRA aux bassins-versants sous étude

Le présent chapitre présente et commente les résultats de la comparaison des débits maxima annuels de période de retour 5 ans et 25 ans estimés à partir de la MÉRA aux valeurs obtenues à partir de l'analyse statistique des séries de débits maxima annuels en chaque site (Section 3.3 et Annexe E). Deux équations du temps de concentration seront considérées pour l'application de la MÉRA à savoir celle décrite dans le *Manuel de conception des ponceaux* (désigné par méthode MTQ) et l'équation NERC (voir Tableau 6.2 et l'Annexe H). Les coefficients de ruissellement utilisés pour l'estimation du débit MÉRA sont regroupés au tableau de l'Annexe I. Les résultats présentés dans ce qui suit concernent les périodes de retour 5 et 25 ans. Il est important de rappeler que les débits MÉRA-MTQ ont été estimés en ne considérant pas les coefficients de laminage suggérés dans la Section 3.6 du *Manuel de conception des ponceaux* afin de tenir compte de la présence des lacs et milieux humides. Cependant, l'impact des lacs et des milieux humides sur le coefficient de ruissellement a été pris en compte (voir Annexe J pour les coefficients de ruissellement aux différents bassins prenant en compte les impacts du laminage sur ces derniers).

Afin d'alléger la terminologie, 'débits MÉRA-MTQ' désignera dans ce qui suit les débits maxima annuels estimés par la MÉRA utilisant l'équation MTQ pour le temps de concentration et la variable correspondante sera Q_{MTQ} . De même, 'débits MÉRA-NERC' désignera les débits estimés par la méthode MÉRA utilisant l'équation NERC pour les temps de concentration et sera représenté par Q_{NERC} . Enfin le terme 'débits observés' réfèrera aux débits estimés à partir des séries de débits maxima annuels et sera représenté par Q_o .

8.1 Comparaison des débits MÉRA et des débits observés

Les estimations MÉRA basées sur le temps de concentration MTQ (MÉRA-MTQ) ont d'abord été considérées. La Figure 8.1 présente les valeurs des débits observés en chacun des bassins en fonction de la surface de ces derniers. Cette figure montre très clairement que la dispersion des débits augmente de façon très marquée lorsque la surface des bassins augmente que ce soit pour la période de retour 5 ou 25 ans. Ainsi, dans certains cas, des bassins ayant des surfaces de l'ordre de 90 km² peuvent générer des débits de pointe du même ordre de grandeur que des bassins de l'ordre de 10 km². Ce résultat montre que, au-delà de la simple superficie, les caractéristiques de ces bassins conduisent à la génération de débits maxima annuels très variables et très différents.

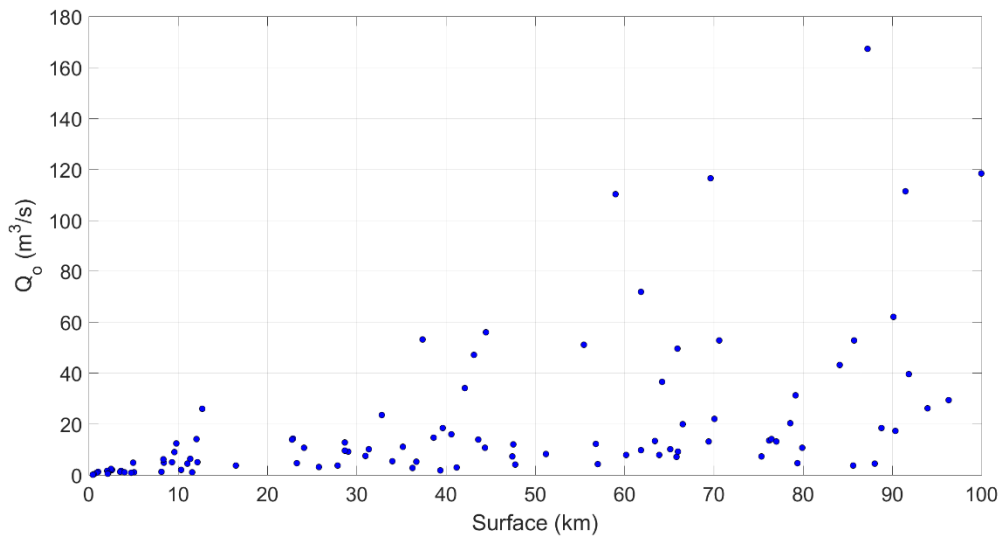
La Figure 8.2 montre les fonctions de répartition des écarts relatifs $(Q_o - Q_{MTQ})/Q_o$ entre les débits observés (Q_o) et les débits MÉRA-MTQ (Q_{MTQ}) pour les périodes de retour 5

et 25 ans. La fonction de répartition décrit la probabilité de voir une valeur inférieure ou égale à une valeur fixée (Meylan *et al.*, 2008). L'analyse de cette figure permet de noter que l'écart relatif médian est de l'ordre de +165% pour la période de retour 5 ans et de l'ordre de +100% pour la période de retour 25 ans. Les estimations MÉRA sous-estiment (écarts négatifs) les débits estimés à partir des séries observées pour 24% des bassins-versants pour la période de retour 25 ans et ces sous-estimations peuvent aller jusqu'à 76% (ce qui veut dire que le débit observé est plus de 4 fois plus important que le débit MÉRA-MTQ !). La fraction de bassins sous-estimés pour la période de retour 5 ans est nettement inférieure (8%) de même que la sous-estimation maximale observée est de 46% (débit observé près de 2 fois plus élevé que le débit MÉRA-MTQ). En résumé, les débits MÉRA-MTQ donne des débits généralement plus élevés que les débits observés et ces surestimations relatives sont globalement plus importantes pour la période de retour 5 ans (courbe bleu en deçà de la courbe rouge sur la Figure 8.2). Cependant, et ce point est très crucial, la MÉRA-MTQ peut conduire à des sous-estimations significatives des débits de pointe 5 et 25 ans pour certaines bassins, et donc à un sous-dimensionnement des ouvrages. Par ailleurs il est intéressant de noter que tous les bassins présentant des sous-estimations pour la période de retour 5 ans, sont également sous-estimés pour la période de retour 25 ans. Nous nous attarderons dans ce qui suit aux cas des bassins sous-estimés par MÉRA-MTQ.

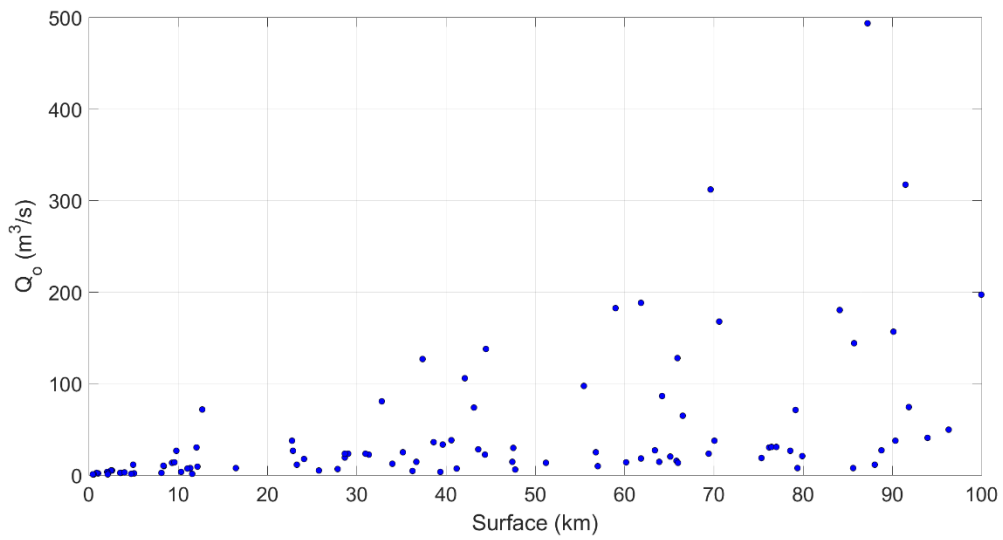
Trois principales hypothèses sont envisageables pour expliquer les sous-estimations des débits MÉRA-MTQ pour certains des bassins :

1. Les coefficients de ruissellement à ces bassins sont sous-estimés (ruissellement réel plus important que celui estimé par la MÉRA);
2. Les temps de concentration à ces bassins sont surestimés;
3. Les débits observés à ces bassins sont surestimés.

De même une surestimation des débits observés par la MÉRA peut s'expliquer par une surestimation et/ou sous-estimation des différents éléments précédents.



(a)



(b)

Figure 8.1 - Débits observés (Q_o) en fonction de la surface des bassins-versants pour les périodes de retour (a) 5 ans et (b) 25 ans.

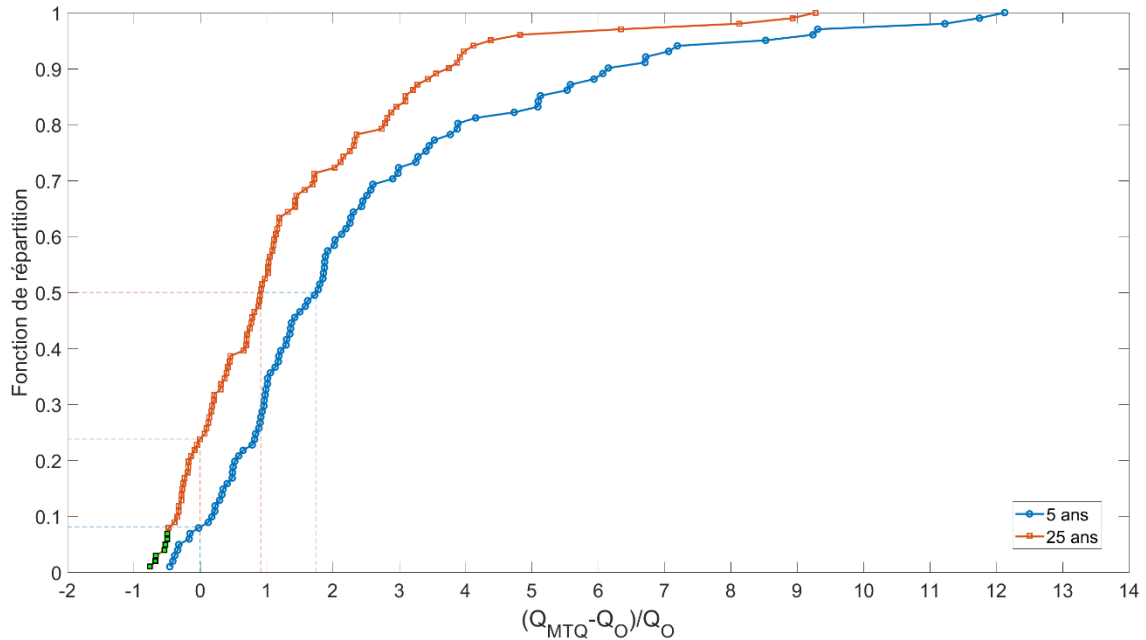
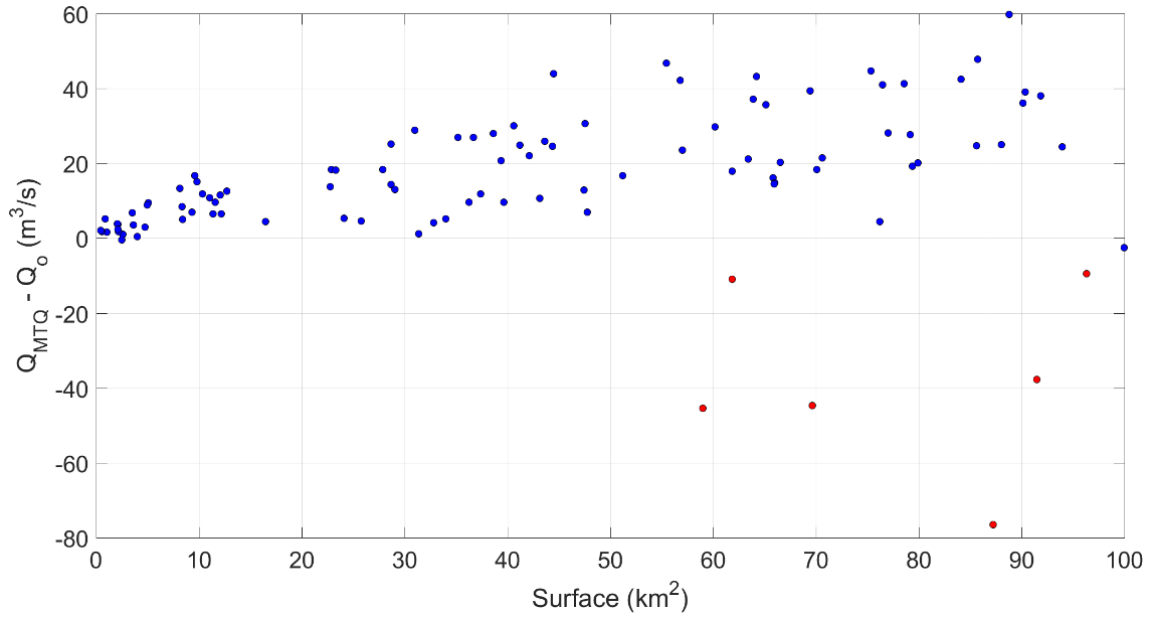
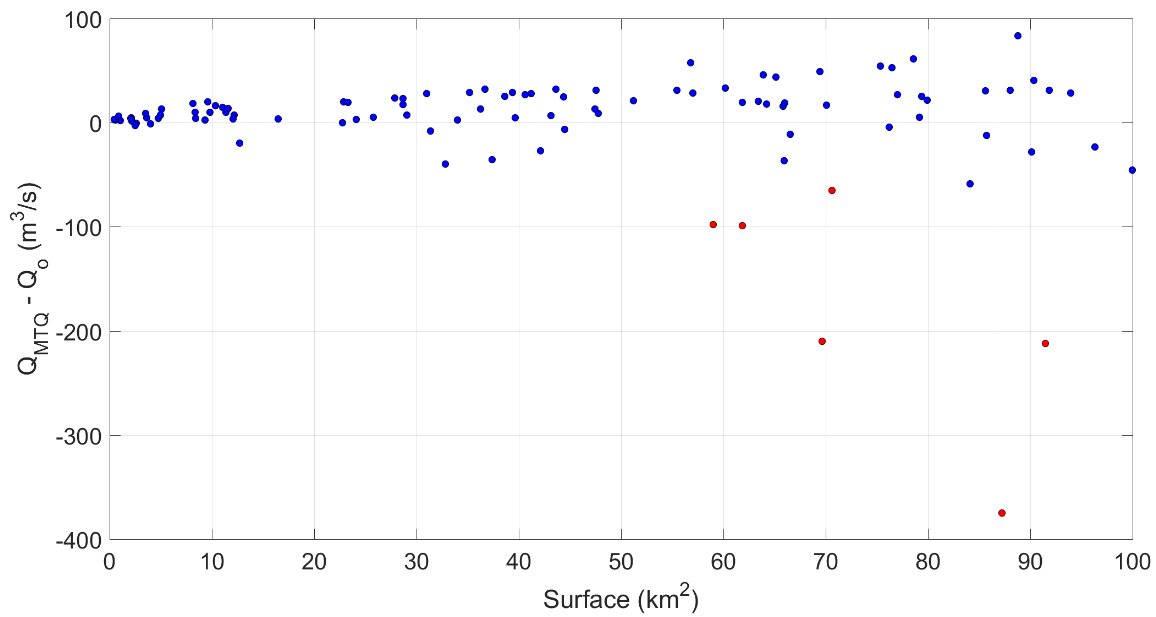


Figure 8.2 - Distribution des écarts relatifs entre débits observés (Q_0) et les débits MÉRA-MTQ $(Q_0-Q_{MTQ})/Q_0$ pour les périodes de retour 5 ans (courbe bleue) et 25 ans (courbe rouge). Les points en vert sur la courbe 25 ans correspondent aux bassins présentant les plus grandes sous-estimations des débits observés (Tableau 8.1).

Une sous-estimation des coefficients de ruissellement pour ces bassins suggèrent que ces derniers présentent des caractéristiques communes pour lesquelles les tables servant à estimer les coefficients de ruissellement sont inadéquates et demandent à être révisées. La question qui se pose dès lors est la suivante : quelles sont ces caractéristiques communes permettant d'identifier des éléments de la méthode qui pourraient être corrigées afin d'éviter de telles sous-estimations ? Afin d'investiguer cette question, différents graphiques ont été construits présentant les écarts absolus $(Q_{MTQ}-Q_0)$ en fonction de diverses caractéristiques considérées par la MÉRA.

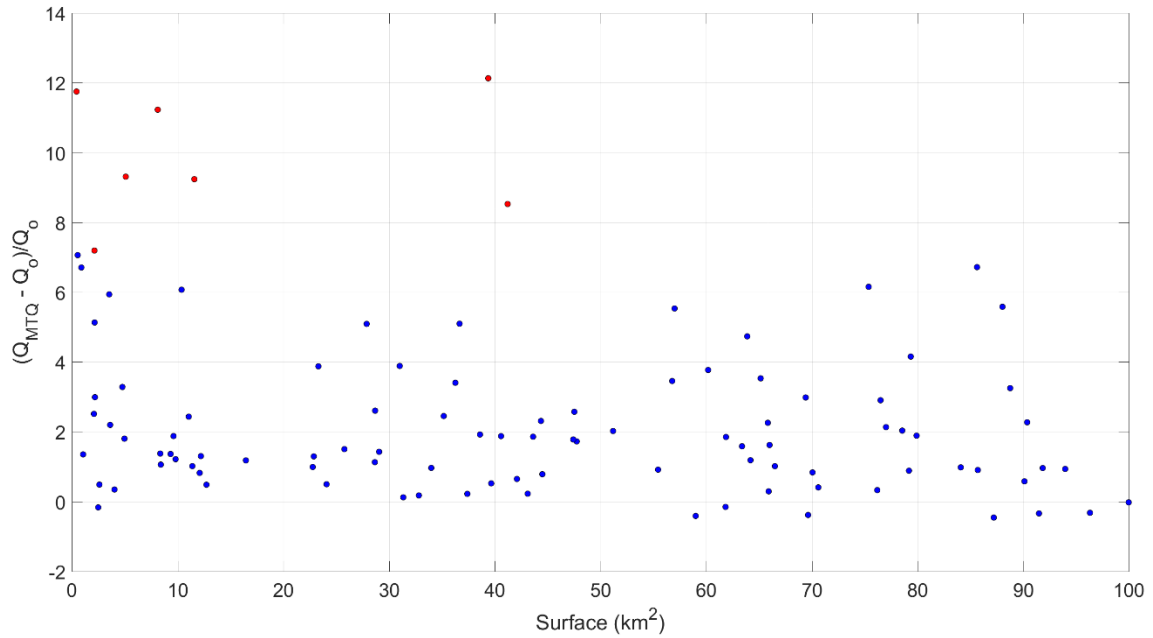


(a)

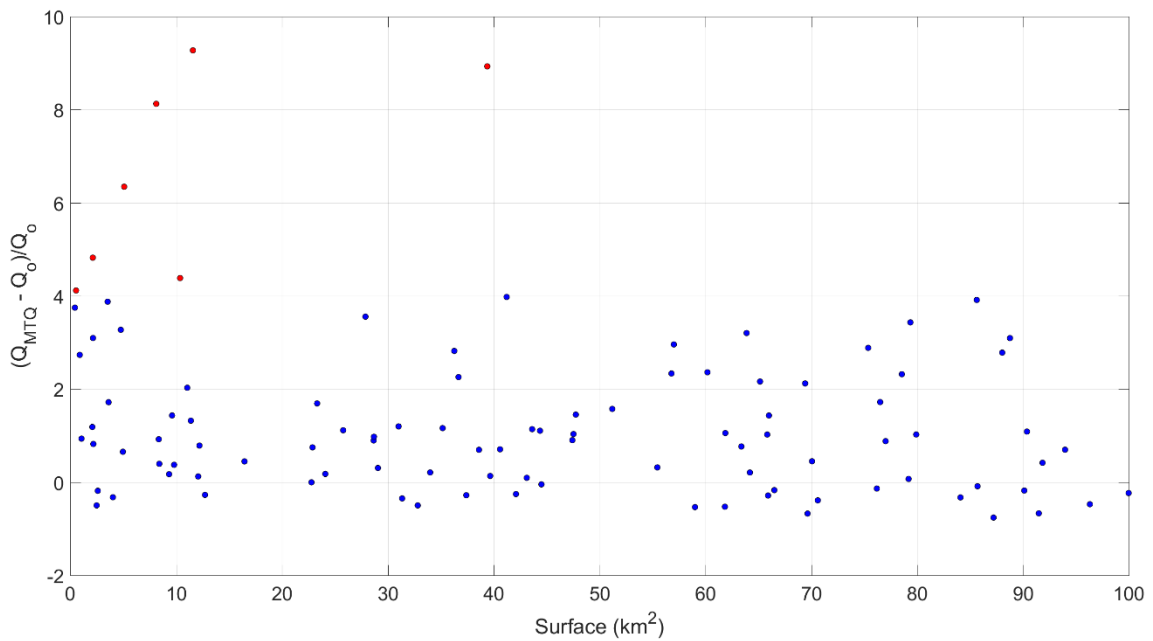


(b)

Figure 8.3 - Écart absolu entre débits observés (Q_0) et MERA-MTQ ($Q_{MTQ} - Q_0$) en fonction de la surface des bassins-versants pour les périodes de retour (a) 5 ans et (b) 25 ans. Les points en rouge correspondent aux six bassins présentant les écarts absolus les plus importants (voir Tableau 8.1).



(a)



(b)

Figure 8.4 Écart relatif entre débits observés (Q_0) et MERA-MTQ $[(Q_{MTQ}-Q_0)/Q_0]$ en fonction de la surface des bassins-versants pour les périodes de retour (a) 5 ans et (b) 25 ans. Les points rouges correspondent aux sept bassins présentant les écarts relatifs les plus importants (voir Tableau 8.2).

La Figure 8.3 présente les écarts absolus ($Q_{MTQ}-Q_0$) en fonction de la superficie des bassins. On constate que les sous-estimations sont plus importantes en termes absolus pour les bassins de plus grandes superficies bien qu'en terme relatifs les écarts soient approximativement du même ordre pour les bassins de petites et de grandes superficies, notamment pour la période de retour 25 ans (Figure 8.4).

Ces résultats apportent un éclairage particulier sur les tailles des bassins versants à considérer pour l'application de la MÉRA. Dans sa forme actuelle, les résultats suggèrent que la MÉRA peut être appliquée à des bassins de moins d'environ 25 km² sans crainte de sous-estimation majeure. Au-delà de cette surface la probabilité de sous-estimation augmente avec la superficie du bassin versant. Par ailleurs, comme le montre très bien le Figure 8.3, la surestimation des débits MÉRA-MTQ a tendance, en terme absolu, à augmenter globalement avec la superficie. Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse maintes fois mentionné que la MÉRA aura tendance à surestimer plus vraisemblablement les débits des grands bassins puisque l'on suppose une distribution spatiale uniforme de la précipitation, ce qui conduira à une surestimation pour les grands bassins.

Si l'on examine maintenant les écarts absolus en fonction de la surface des bassins-versants (Figure 8.3), on constate que la MÉRA-MTQ sous-estime considérablement les débits de période de retour 25 ans pour certains bassins-versants de 55 km² et plus. Afin de mieux comprendre l'origine des sous-estimations, les six bassins présentant les plus grands écarts absolus entre débits MÉRA-MTQ et observés ont été analysés plus attentivement (points rouges de la Figure 8.3 et Tableau 8.1). Si l'on estime le coefficient de ruissellement qui permettrait d'obtenir les débits observés en ces bassins, on constate que les valeurs obtenues dans certains cas sont très élevées notamment pour les trois bassins avec les sous-estimations les plus importantes (dernière colonne du Tableau 8.1). Ces valeurs irréalistes (celles de plus de 1.2) suggèrent que l'hypothèse d'une sous-estimation du coefficient de ruissellement est peu vraisemblable ou, à tout le moins, ne peut pas expliquer à elle seule les écarts obtenus. Ces six bassins présentent par ailleurs la particularité de présenter des temps de concentration MTQ relativement élevés (Tableau 8.1). L'hypothèse d'une surestimation du temps de concentration pour ces bassins demeure plausible mais reste à vérifier de même qu'une estimation inadéquate des débits observés (ces points seront abordés aux Sections 8.3 et 8.5.

Tableau 8.1 - Liste des six bassins-versants présentant les plus grandes sous-estimations absolues des débits observés par la MÉRA-MTQ pour la période de retour de 25 ans.

Identifiant de bassin	Débit observé (Q_o) (m ³ /sec)	Débit MÉRA (Q_{MTQ}) (m ³ /sec)	Écart absolu ($Q_{MTQ} - Q_o$) (m ³ /sec)	Écart relatif ($(Q_{MTQ} - Q_o)/Q_o$) (%)	Temps de concentration MTQ (heure)	Coefficient de ruissellement MTQ	Coefficient de ruissellement empirique estimé avec MÉRA en utilisant le débit observé
01434498	493.5	118.5	-375	- 76	8.2	0.46	1.93
01349700	317	105	-212	-67	10.3	0.47	1.41
01349810	312	102	-210	-67	6.4	0.45	1.36
01169900	188	89	-99	-53	5.5	0.38	0.80
01434017	182.5	85	-98	-54	7.3	0.46	0.98
04233286	167	102	-65	-39	4.7	0.39	0.64

Tableau 8.2 - Liste des sept bassins-versants présentant les plus grandes surestimations relatives des débits observés par la MÉRA-MTQ pour la période de retour de 25 ans.

Identifiant de bassin	Débit observé (Q_o) (m ³ /sec)	Débit MÉRA (Q_{MTQ}) (m ³ /sec)	Écart absolu ($Q_{MTQ} - Q_o$) (m ³ /sec)	Écart relatif ($(Q_{MTQ} - Q_o)/Q_o$) (%)	Pourcentage de la superficie en lacs et milieux humides (%)	Temps de concentration MTQ (heure)	Coefficient de ruissellement MTQ (Cr)	Coefficient de ruissellement empirique estimé avec MÉRA et débit observé (Ce)	Rapport Cr/Ce
02HJ005	1.47	15.06	13.59	927	3.2	3.7	0.28	0.03	10.3
02GA031	2.24	32.14	29.9	893	17.5	6.5	0.25	0.03	9.9
02BF006	2.27	20.68	18.41	813	12.3	2.3	0.42	0.05	9.1
02BF007	2.03	14.88	12.85	635	14.7	1.8	0.40	0.05	7.35
050813	0.96	5.60	4.64	482	12.4	1.6	0.25	0.03	5.8
02BF005	3.65	19.64	15.99	438	8.8	3.3	0.40	0.07	5.4
02BF013	0.54	2.78	2.24	412	18.0	0.8	0.55	0.08	5.1

Les bassins présentant les écarts relatifs positifs entre débits MÉRA-MTQ et observés les plus importants (surestimation par la MÉRA-MTQ des débits observés) ont été analysés. Le Tableau 8.2 dresse la liste des sept bassins pour lesquels la MÉRA-MTQ surestime le plus les débits observés pour la période de retour 25 ans, ces surestimations allant d'environ 400% à plus de 900%. Les valeurs des coefficients de ruissellement estimés à partir des débits observés sont très faibles (de l'ordre de 0.03 à 0.08; 9^e colonne du Tableau 8.2) et de 5 à 10 fois plus petits que les coefficients estimés à partir de la MÉRA (dernière colonne à droite du Tableau 8.2). Ces résultats suggèrent que les surestimations dans ces cas pourraient résulter d'une sous-estimation des temps de concentration ou encore à une sous-estimation des quantiles des débits observés. À noter que l'estimation des quantiles de débits observés sera revue dans le cadre de la Phase II du projet.

8.2 Influence des lacs et les milieux humides

La Figure 8.5 présente les écarts relatifs entre débits MÉRA-MTQ et observés (période de retour 25 ans) en fonction du pourcentage de la superficie des bassins occupé par les lacs et les milieux humides lorsque les effets de laminage ne sont pas pris en compte dans l'estimation des débits MÉRA-MTQ. Cette figure ne montre aucune corrélation claire entre l'amplitude des sur- ou sous-estimations des débits observés par la MÉRA et le seul pourcentage de lacs et milieux humides. Par ailleurs, on constate que les bassins dont les débits MÉRA-MTQ sous-estiment les débits observés ont des pourcentages très variables de lacs et milieux humides.

L'effet du laminage a ensuite été considéré et les débits MÉRA-MTQ ont été estimés en prenant en compte cet effet selon la procédure décrite à la Section 3.6 du *Manuel de conception des ponceaux*. La Figure 8.6 permet de comparer les écarts relatifs avant et après prise en compte des effets de laminage qui intègrent à la fois la fraction de territoire occupée par les lacs et milieux humides et leur distribution spatiale. Premier constat, on note que, pour huit bassins, l'ajout du laminage entraîne une sous-estimation des débits observés là où initialement il y avait surestimation. Ces sous-estimations sont cependant faibles dans la plupart des cas (de 6.3 à 31.1 %). Dans le cas des surestimations (la prise en compte du laminage vise précisément à corriger les cas de surestimations importantes des débits observés par la MÉRA-MTQ), on constate que les plus importantes 'corrections' surviennent pour les surestimations les plus importantes sans toutefois les corriger complètement. Ainsi des 29 bassins présentant une surestimation de plus de 200% avant prise en compte du laminage, seulement 12 présentent toujours une surestimation de plus de 200% après prise en compte du laminage. Il est très intéressant aussi de constater que tous les bassins, sauf un (point sur la droite de pente un de la Figure 8.6), ayant une surestimation de plus de 200% avant laminage possède un pourcentage non nulle de lacs et milieux humides. Ce résultat suggère que la distribution spatiale des lacs et milieux humides a un impact majeur sur le facteur de laminage et l'estimation des débits de pointe.

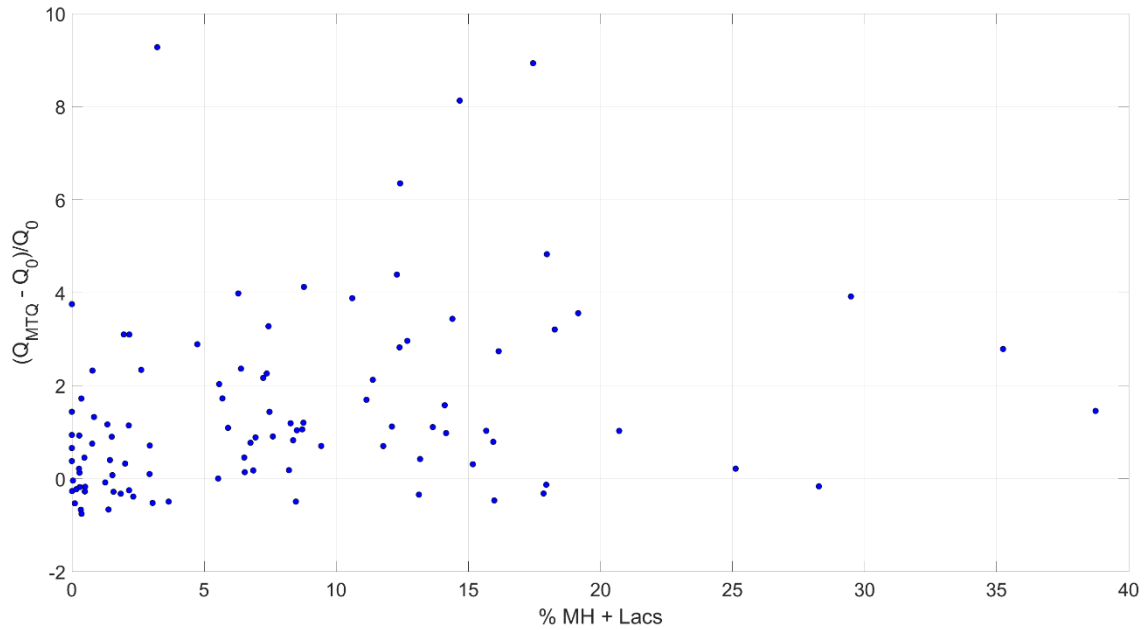


Figure 8.5 - Écarts relatifs entre débits estimés à partir des séries observées (Q_o) et estimés par la MÉRA-MTQ $[(Q_o - Q_{MTQ})/Q_o]$ en fonction du pourcentage de la superficie occupée par les lacs et les milieux humides (MH) pour la période de retour 25 ans. L'effet du laminage (Section 3.6 du *Manuel de conception des ponceaux*) n'a pas été pris en compte dans l'estimation des débits MÉRA-MTQ.

Les bassins du Tableau 8.2, bassins avec les plus grandes surestimations relatives des débits observés, présentent d'ailleurs des pourcentages relativement importants de lacs et de milieux humides. Ainsi le fait de ne pas prendre en compte l'effet de laminage dans ces cas pourrait expliquer en partie ces surestimations. La présence de lacs et de milieux humides peut toutefois avoir également un impact sur les temps de concentration et résulter en une sous-estimation des temps de concentration et du coup en une surestimation des débits estimés par la MÉRA. En effet, le temps de concentration estimé par la méthode MTQ, de même que par la plupart des équations présentées au Chapitre 6, ne considère pas le possible impact des lacs et milieux humides. Dès lors ces surestimations importantes pourraient être attribuables à l'effet de laminage des lacs et milieux humides ou encore à une surestimation des temps de concentration à ces bassins. Il demeure toutefois difficile à ce stade-ci, faute d'estimation indépendante des temps de concentration, de départager ces deux effets.

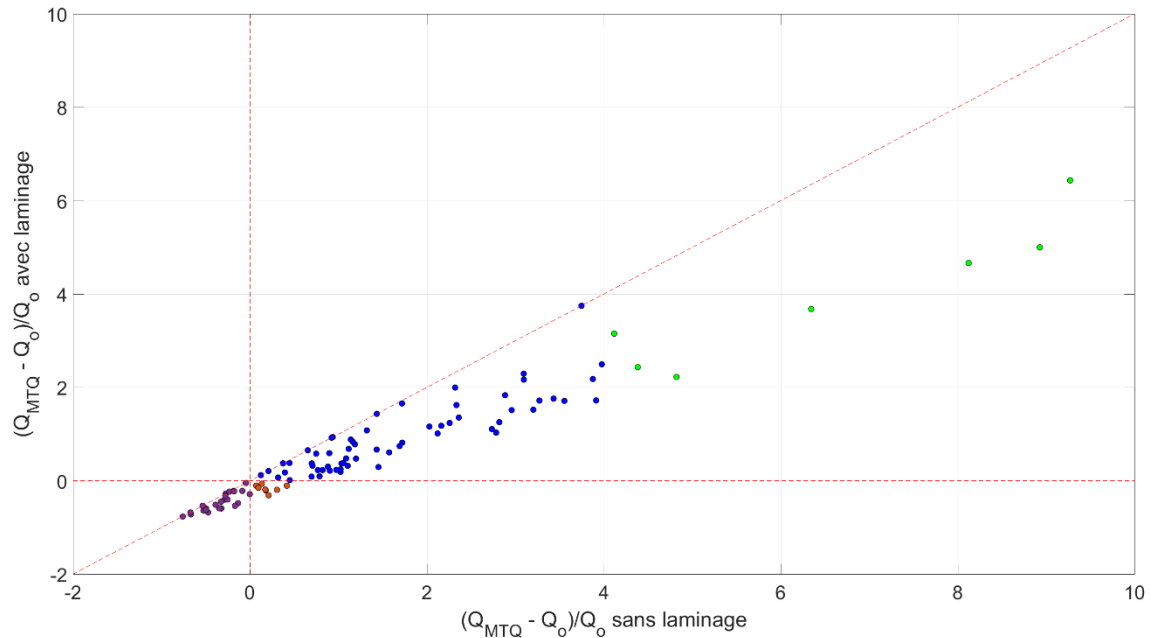


Figure 8.6 - Écarts relatifs entre débits MÉRA-MTQ (Q_{MTQ}) et observés (Q_o) [$(Q_{MTQ} - Q_o)/Q_o$] sans (axe des x) et avec (axe des y) prise en compte du laminage résultant de la présence de lacs et milieux humides (Section 3.6 du *Manuel de conception des ponceaux*) pour la période de retour 25 ans. Les points ayant les écarts relatifs les plus élevés (Tableau 8.2) sont indiqués en vert. Les points rouges correspondent aux bassins pour lesquels l'ajout du laminage a conduit à une sous-estimation des débits observés par la MÉRA-MTQ et les points mauves au maintien de la sous-estimation initiale sans laminage. Les autres points correspondent aux situations où la surestimation initiale persiste après introduction du laminage.

Un dernier point mérite d'être souligné au sujet des bassins du Tableau 8.2. Outre la présence significative de lacs et de milieux humides sur la plupart de ces bassins, leurs distributions spatiales très particulières est aussi à mentionner. La Figure 8.7 montre l'exemple du bassin 02GA031. Comme on peut le voir, une fraction significative des lacs et milieux humides se trouve sur le cours principal et dans les parties aval du bassin. La procédure décrite, et notamment la Figure 3.6 du *Manuel de conception des ponceaux*, permet de tenir compte de l'effet de la distribution spatiale des lacs et milieux humides à partir d'une appréciation qualitative de celle-ci (cas A, B et C de la Figure 3.6). Les présents résultats confirment l'impact potentiel de cette distribution spatiale. Cependant une analyse détaillée a été reportée à la phase II du projet où une évaluation empirique des temps de concentration sera réalisée afin de mieux comprendre l'effet de la présence et de la distribution spatiale des lacs et milieux humides sur les temps de concentration.

8.3 Influence du temps de concentration

L'estimation du temps de concentration a un impact majeur sur les débits estimés à partir de la MÉRA. Ainsi une surestimation (sous-estimation) du temps de concentration résultera en une sous-estimation (surestimation) des débits de pointe. Diverses équations de la littérature ont été considérées et comparées au Chapitre 6. Bien que cette analyse n'ait pas permis d'identifier la 'meilleure' équation, elle a tout de même permis de regrouper les équations présentant des temps de concentration similaires pour les différents bassins sous étude. Il faut voir que les équations empiriques proposées dans la littérature ont été développées sur différents bassins de caractéristiques très diverses et que l'utilisation directe de l'une ou l'autre de ces équations demeure hasardeuse. Il est clair dans un tel contexte qu'une estimation indépendante des temps de concentration, et le développement d'une équation empirique à partir des données disponibles aux bassins sous étude, permettront d'évaluer dans quelle mesure les biais sur les débits MÉRA proviennent d'une évaluation erronée des temps de concentration.

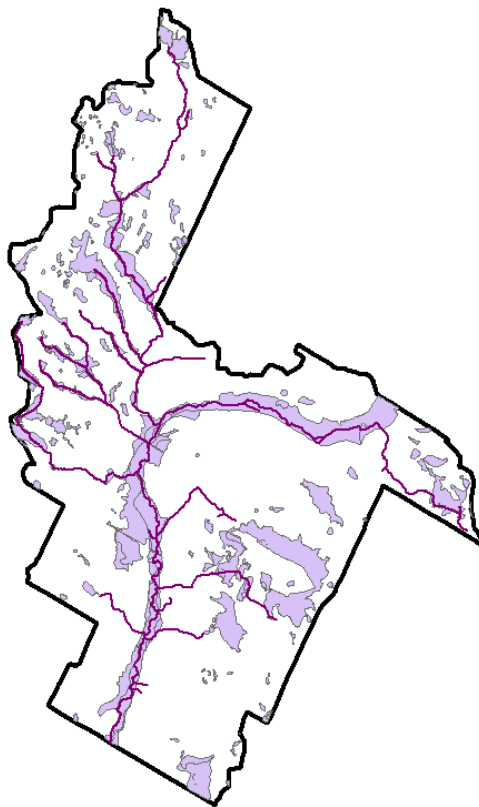


Figure 8.7 - Distribution spatiale des lacs et milieux humides dans le bassin 02GA031 (voir Tableau 8.2).

8.4 Influence de l'occupation du territoire, des classes hydrologiques et de la pente du bassin

Les Tableaux 3.4.1a et 3.4.1b du *Manuel de conception des ponceaux* sont utilisés pour estimer les coefficients de ruissellement d'un bassin en fonction de sa pente (trois classes de pentes), des classes hydrologiques et de l'occupation du territoire qu'on y retrouve. L'origine des valeurs présentées à ces tableaux demeure cependant inconnue. Étant donné la prépondérance des occupations du territoire non urbaine des bassins sous étude (proportion de milieux urbains de moins de 20% dans les bassins sous étude), l'impact des fractions urbaines ne sera pas analysé dans ce qui suit.

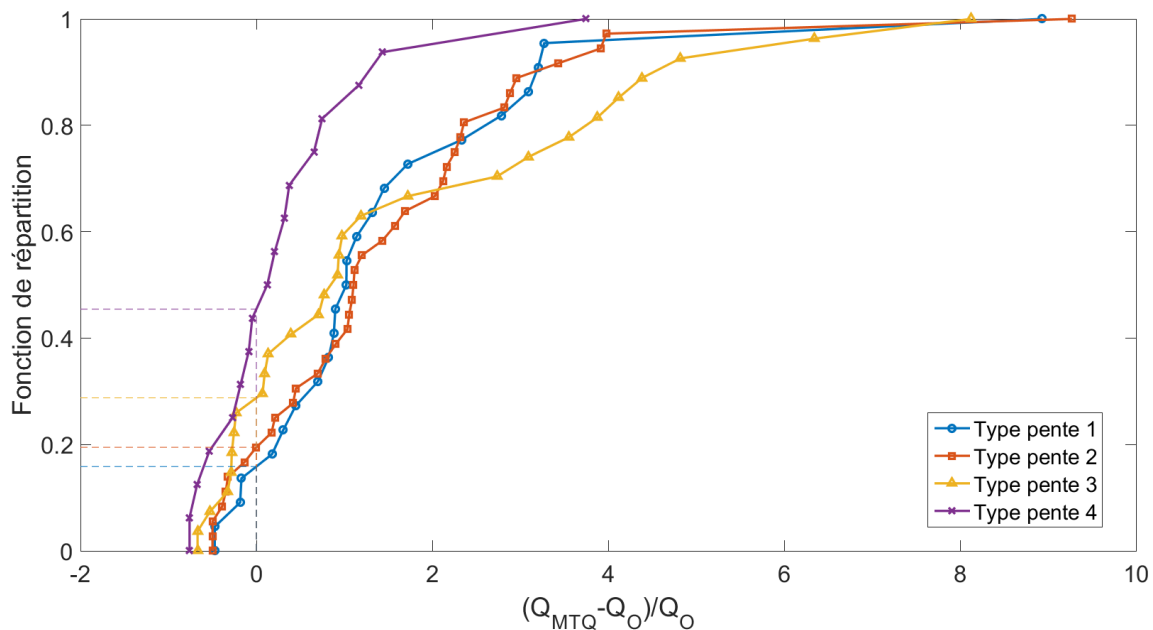


Figure 8.8. Fonction de répartition empirique des écarts relatifs entre débits MÉRA-MTQ et observés de période de retour 25 ans $[(Q_{MTQ} - Q_o) / Q_o]$ pour les quatre classes de pente (voir Tableau 2.3).

Si l'on examine d'abord les écarts relatifs entre débits MÉRA-MTQ et observés en fonction des classes de pentes, on constate que ces erreurs sont similaires pour les bassins appartenant aux trois classes de pente les plus faibles (classes 1,2 et 3; Figure 8.8). La situation est légèrement différente pour la classe pente 4. Il est important de noter toutefois que les coefficients de ruissellement des bassins appartenant à la classe de pente 4 ont été estimés en utilisant les valeurs de la classe 'Montagneux' du Tableau 4.3.1a du Manuel de conception des ponceaux. La Figure 8.8 suggère, sans surprise,

que les valeurs des coefficients de ruissellement devraient être majorées pour les bassins de cette nouvelle classe de pente.

Concernant les occupations du territoire, les écarts relatifs sont distribués de façon aléatoire peu importe l'occupation du territoire considéré et aucune tendance spécifique ne se dégage suggérant, par exemple, que des écarts plus importants sont observés pour certains types d'occupation du territoire (Figure 8.9). Il en va de même pour les classes hydrologiques. L'absence de biais significatif pour certaines occupations du territoire ou classes hydrologiques suggère que, même s'il n'est pas possible de valider de manière rigoureuse et quantitative les valeurs proposées dans le Tableau 4.3.1a, celles-ci n'en demeurent pas moins cohérentes entre elles et vraisemblables en regard de la présente analyse. La révision éventuelle de ces valeurs se fera après l'ajustement d'une équation empirique des temps de concentration prévue à la Phase II.

8.5 Synthèses et recommandations

Les paragraphes suivants donnent une synthèse des principaux résultats et recommandations issus de la comparaison des débits observés et des débits MÉRA :

- Généralement, les résultats montrent que la MÉRA (utilisant les temps de concentration calculés à partir du *Manuel de conception des ponceaux* et désignés par Q_{MTQ}) permet d'estimer des débits maxima annuels supérieurs aux valeurs estimées à partir des séries de débits mesurés (désigné par Q_o). Ainsi, l'écart relatif médian [$Q_{MTQ} - Q_o/Q_o$] pour la période de retour 5 ans est de l'ordre de +165% et de l'ordre de +100% pour la période de retour 25 ans. Cependant les estimations MÉRA sous-estiment les débits estimés à partir des séries observées pour 24% des bassins-versants pour la période de retour 25 ans alors que ces sous-estimations peuvent aller jusqu'à 76% pour certains bassins. La fraction de bassins où les débits sont sous-estimés pour la période de retour 5 ans est nettement inférieure (8%) de même que la sous-estimation maximale observée qui est de 46%.

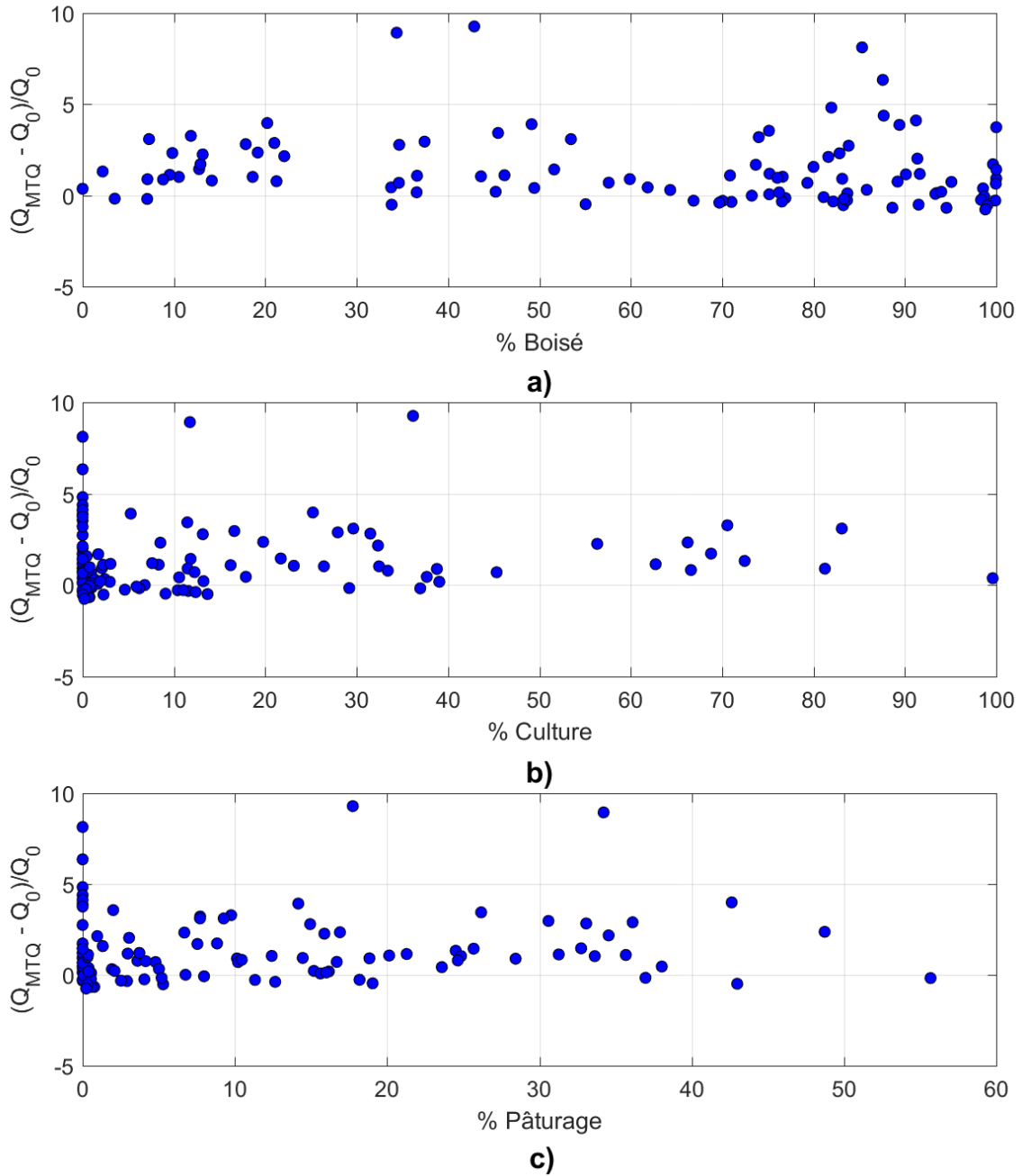


Figure 8.9 - Écarts relatifs entre débits MÉRA-MTQ et observés de période de retour 25 ans $[(Q_{MTQ}-Q_0)/Q_0]$ en fonction du pourcentage de la superficie du bassin : (a) boisé; (b) en culture; (c) en pâturage.

- Trois principaux facteurs ont été évoqués pour expliquer les surestimations ou sous-estimations importantes des débits MÉRA en certains bassins :

1. Les coefficients de ruissellement à ces bassins sont sous- ou surestimés;
2. Les temps de concentration à ces bassins sont sous ou surestimés;
3. Les débits observés à ces bassins sont sous ou sur-surestimés.

Une surestimation ou une sous-estimation importante en certains bassins pourrait donc s'expliquer par un ou une combinaison de ces facteurs. De même des effets de compensation (p. ex. sous-estimation des temps de concentration et surestimation des coefficients de ruissellement) pourraient dans certains cas se compenser pour produire des débits MÉRA proche des valeurs observées.

- Les analyses ont permis d'identifier les bassins présentant des écarts importants mais n'ont pas permis d'identifier le principal facteur responsable de ces écarts. En effet, l'absence d'estimation indépendante du temps de concentration empêche de quantifier le niveau de sous- ou de surestimation des temps de concentration estimés à partir des différentes équations empiriques retenues. Rappelons que ces équations empiriques proviennent de diverses études à travers le monde et qu'il demeure difficile d'en évaluer la performance sur les bassins sous étude puisqu'aucune estimation des temps de concentration n'a été réalisée dans le cadre de la Phase I du projet. Cette lacune sera compensée à la Phase II du projet où une estimation des temps de concentration sera réalisée.
- Sans qu'il n'ait été possible de procéder à une révision rigoureuse des valeurs des tables servant à l'estimation des coefficients de ruissellement (Tableaux 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux), les résultats suggèrent que ces valeurs sont cohérentes entre elles et, pour une majorité de bassins, conduisent à des coefficients de ruissellement réalistes et plausibles en regard des débits MÉRA estimés. La mise à jour éventuelle de cette table sera réexaminée à la lumière des travaux sur les temps de concentration réalisés au début de la Phase II du projet.
- Le pourcentage de lacs et milieux humides, mais également leur distribution spatiale dans le bassin, ont un impact majeur sur les débits de pointe. Ceux-ci ont un impact à la fois sur le laminage des débits de pointe (pris en compte dans la procédure du *Manuel de conception des ponceaux*) et sur les temps de concentration (retard dans l'écoulement non explicitement pris en compte par les équations empiriques des temps de concentration retenues et notamment celles proposées dans le *Manuel de conception des ponceaux*). Il n'a pas été dès lors possible de départager l'effet des lacs et des milieux humides sur le laminage et sur les temps de concentration. Ainsi le laminage considéré dans le *Manuel de conception des ponceaux* pourrait 'compenser' une estimation inadéquate des temps de concentration pour les bassins là où les lacs et milieux humides occupent une fraction importante du territoire.
- Une nouvelle classe de pente de bassin a été proposée (20% > pente > 13 %). Ce faisant une mise à jour du Tableau 3.4.1a du *Manuel de conception des ponceaux*

est nécessaire pour tenir compte de cette nouvelle classe de pente. En effet, l'utilisation des valeurs de la classe 'Montagneux' (pente > 8 %) pour l'estimation des coefficients de ruissellement de cette nouvelle classe conduit à une sous-estimation des coefficients de ruissellement pour cette nouvelle classe. Ce résultat est logique puisque, toute chose étant par ailleurs égale, on peut s'attendre à un ruissellement plus important sur un bassin de pente plus forte.

Suivant ces résultats, il est recommandé de procéder à une estimation indépendante des temps de concentration en chacun des bassins versants sous étude afin de départager les origines possibles des sous-estimations ou des surestimations importantes (temps de concentration, coefficient de ruissellement, quantile de débit extrême) pour certains bassins. Ce travail, prévu à la Phase II du projet, permettra de : 1) développer une équation empirique du temps de concentration mieux adaptée aux bassins québécois; 2) procéder à la mise à jour éventuelle du Tableau 3.4.1a du *Manuel de conception des ponceaux*; 3) revoir et valider la procédure du *Manuel de conception des ponceaux* relativement à la prise en compte des lacs et milieux humides dans l'application de la MÉRA.

Chapitre 9. Sites instrumentés

Dans le cadre de ce projet, quatre sites ont été instrumentés de façon à colliger des données de débit et pallier le manque de données pour des bassins-versants caractérisés par la présence de milieux humides. Les intervenants du MTMDET ont remarqué depuis quelques années des problèmes plus récurrents pour les ponceaux situés en aval de bassins-versants comprenant des milieux humides. L'intérêt est également de documenter l'influence des milieux humides sur les débits de pointe particulièrement pour des bassins-versants situés sur la Côte-Nord. Ainsi, quatre bassins-versants, dont deux se trouvant sur la Côte-Nord, ont été instrumentés. La Section 9.1 de ce chapitre localise les quatre sites alors que la Section 9.2 fait une brève description des sites. Le rapport d'étape 1 (Mailhot *et al.*, 2016a) peut également être consulté à ce sujet. La Section 9.3 décrit comment les sites ont été instrumentés alors que la Section 9.4 dresse un bilan des trois campagnes de mesure réalisées depuis le début du projet en 2015. Finalement, la Section 9.5 discute des extrêmes de pluie enregistrés aux différents pluviomètres.

9.1 Localisation des sites

Tel que mentionné dans le 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 9.1). Le bassin-versant, 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 (Figure 9.2).

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 9.1). L'exutoire du bassin 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 (Figure 9.3).

Le bassin-versant du site S3 se situe dans la partie amont du bassin-versant de la rivière La Chevrotière. Il est situé dans la région administrative de la Capitale-Nationale (03) plus précisément dans le Municipalité Régionale de Comté (MRC) de Portneuf (Figure 9.1). La station de jaugeage 050501 de la DEH est à la jonction de la route du Moulin à Saint-Gilbert (Figure 9.4).

Finalement, le bassin-versant du site S4 se situe à la tête du bassin-versant du ruisseau Rouge dans la région administrative de Saguenay – Lac-Saint-Jean et dans la MRC Maria-Chapdelaine (Figure 9.1). La station de jaugeage 062002 de la DEH se trouve à l'exutoire de ce bassin à la jonction de la rue Saint-Cyrille, au sud de la municipalité de Normandin (Figure 9.5).



Figure 9.1 – Localisation des quatre sites instrumentés



Figure 9.2 - Exutoire du bassin-versant du site S1 et emplacement de la station de jaugeage dans le ruisseau des Bacon. (A : Ruisseau des Bacon en amont de la station de jaugeage; B : Ruisseau des Bacon en aval de la station de jaugeage; Photos : Samuel Bolduc).



Figure 9.3 - Exutoire du site S2 (A : Emplacement de la station de jaugeage en amont du ponceau; B : Cours d'eau en aval du ponceau; Photos : Samuel Bolduc).



Figure 9.4 - Exutoire du site S3 (A : Rivière La Chevrotière en amont du ponceau sur la route du Moulin; B : Cours d'eau en aval de la station et à l'entrée du ponceau; Photos : Samuel Bolduc).



Figure 9.5 - Exutoire du site S4 (A : Ruisseau Rouge en amont du ponceau sur la route Saint-Cyrille; B : Cours d'eau en aval de la station et à l'entrée du ponceau; Photos : Samuel Bolduc).

9.2 Description des sites

Cette section décrit brièvement certaines caractéristiques des sites instrumentés dont les caractéristiques physiographiques générales (Section 9.2.1), l'occupation du territoire (Section 9.2.2) et le réseau hydrographique (Section 9.2.3). Le lecteur est invité à consulter Mailhot *et al.* (2016a) pour plus de détails concernant les sites instrumentés.

9.2.1 Caractéristiques physiographiques générales

Le Tableau 9.1 présente quelques caractéristiques physiographiques des bassins-versants instrumentés. La superficie des bassins varie d'un peu de moins de 3 km² à un peu plus de 26 km². Les bassins-versants de la Côte-Nord (S1 et S2) ont des pentes plus élevées que les deux autres bassins ($S_b = 5.8$ et 8.5 % respectivement) ce qui les place dans les classes de pente 2 et 3 respectivement (voir Tableau 2.3). Les sites S3 et S4 appartiennent quant à eux à la classe de pente 1. Pour tous les sites, les pentes du cours d'eau principal (S_c) sont faibles (< 2 %) particulièrement pour le site S2 où elle est de 0.19 % seulement.

Tableau 9.1 – Principales caractéristiques des bassins-versants instrumentés

Identifiant	Superficie A (km ²)	Longueur du cours d'eau L (km)	Pente du bassin S_b (%)	Pente du cours d'eau S_c (%)
S1	2.7	3.1	5.8	1.5
S2	6.6	6.6	8.5	0.19
S3	19.4	9.6	1.9	0.62
S4	26.8	14.2	2.1	0.51

9.2.2 Occupation du territoire

Les occupations du territoire en chaque site sont variées. Pour les sites S1, S3 et S4, l'occupation du territoire a été déterminée à partir de l'IAC (inventaire annuel des cultures; voir Section 5.2). Le bassin-versant S2 n'est pas couvert par l'IAC. La couverture du sol *circa 2000* a dès lors été utilisée pour caractériser l'occupation du territoire (voir Section 5.2). Les Figures 9.6, 9.7 et 9.8 montrent le pourcentage de la superficie des bassins-versants 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 bassin-versant. Les nombreuses visites de terrain ont permis d'identifier des zones humides non identifiées par 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 à dominance forestière (81.6 %). Des zones associées aux cultures et aux pâturages sont également présentes (7.9 %). Les milieux humides représentent 8.1 % du bassin-versant. À titre comparatif, cela correspond environ au 75^e percentile de la distribution des 101 bassins-versants retenus pour les analyses précédentes (voir Chapitre 2).

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 bassin-versant comprend des zones importantes de pâturages (23.4 %) et de cultures (16.7 %) dominées par les bleuets. La superficie des milieux humides est similaire au site S3 avec 7.9 %.

Finalement, pour le site S2, les zones humides herbacées recouvrent 26.7 % du bassin-versant. Ces zones sont des milieux humides de type tourbière minérotrophe (fen). À des fins de comparaison, le site S2 se retrouve en cinquième position quant à la fraction du bassin-versant occupé par des milieux humides parmi les 100 bassins-versants décrits au Chapitre 2. Le reste du bassin 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).

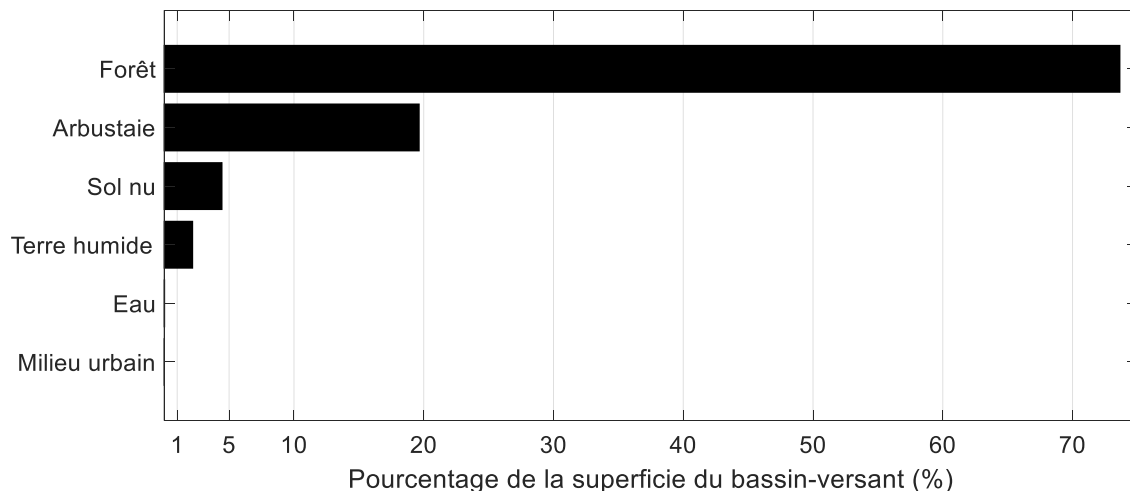


Figure 9.6 – Pourcentage de la superficie du bassin-versant S1 occupé par les différentes occupations du territoire.

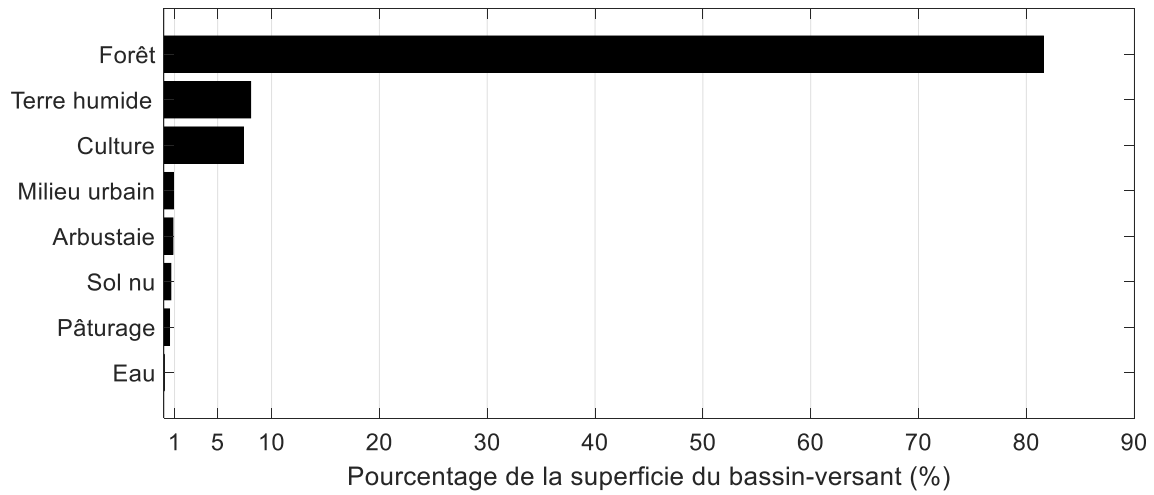


Figure 9.7 – Pourcentage de la superficie du bassin-versant S3 occupé par les différentes occupations du territoire.

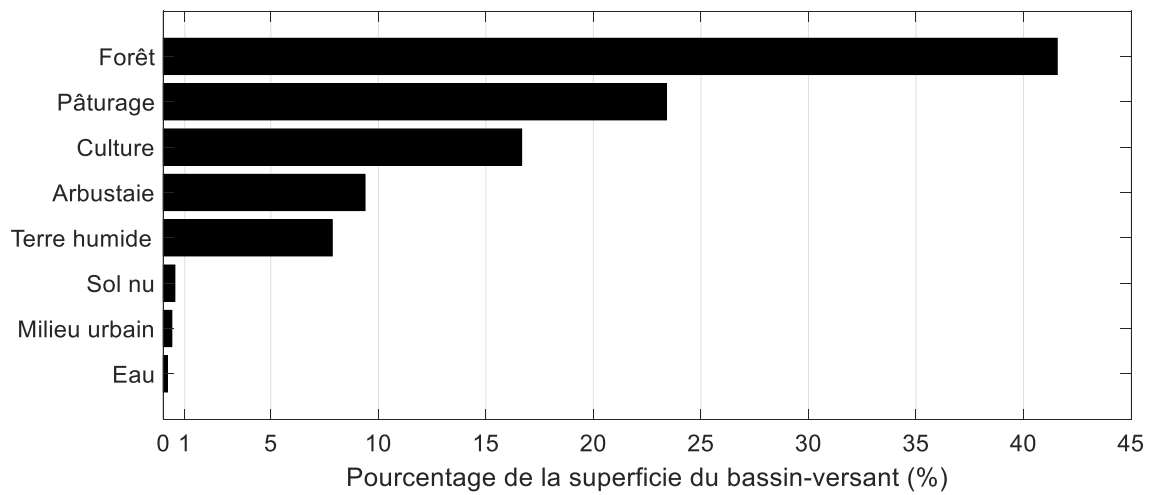


Figure 9.8 - Pourcentage de la superficie du bassin-versant S4 occupé par les différentes occupations du territoire.

9.2.3 Réseau hydrographiques

La Figure 9.9 présente le réseau hydrographique de chaque bassin-versant 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 (Figure 9.8). De plus, ce site a un réseau hydrographique complexe où l'on retrouve des cours d'eau d'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 9.9, toutefois ceux-ci sont tous inclus dans les zones humides herbacées (voir Section 10.1.2).

Il est important de mentionner que le site S3 comprend un lac d'une superficie de 14 142 m² se trouvant au milieu du bassin-versant (Figure 9.10). 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 le bassin-versant n'ait été affecté par des précipitations.

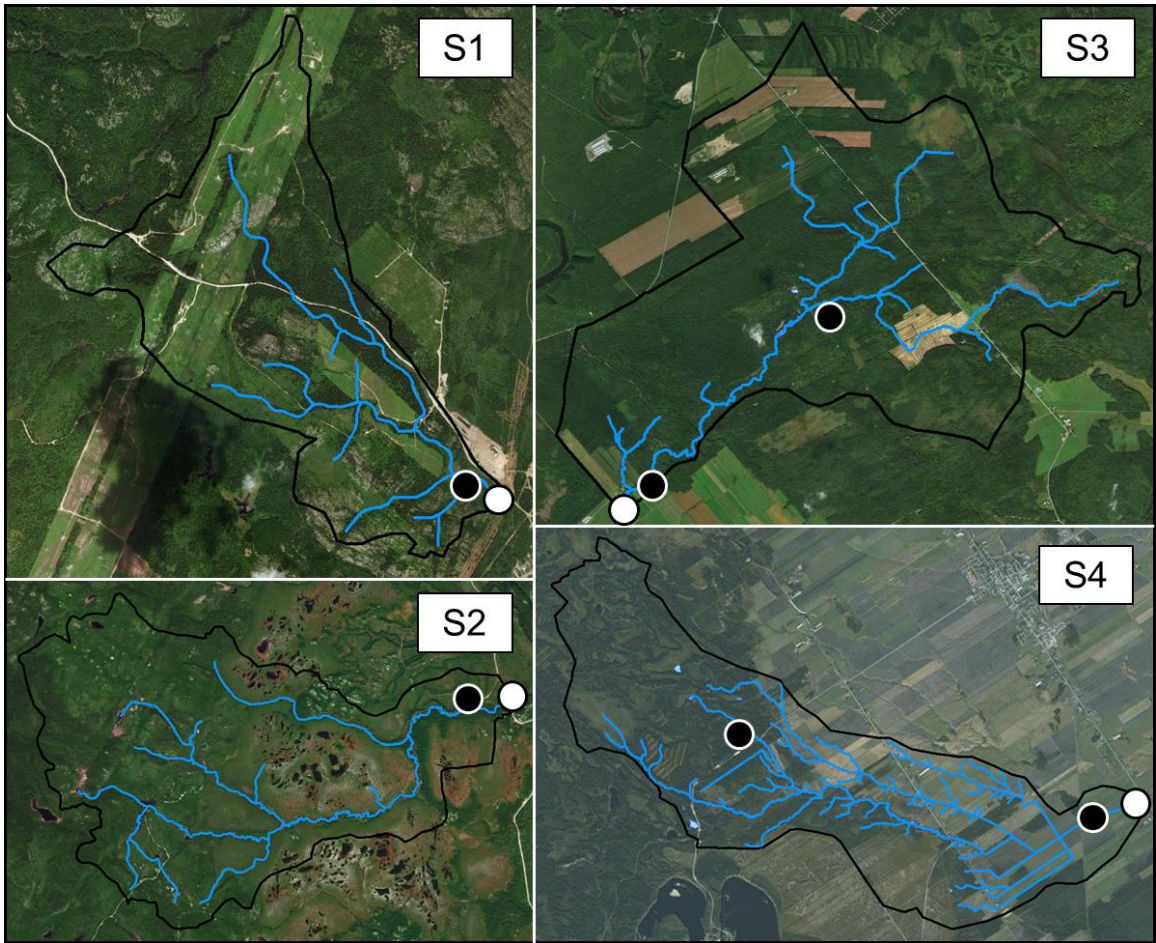


Figure 9.9 – Réseau hydrographique des sites instrumentés et localisation des appareils de mesure (point blanc : Station de jaugeage; point noir : station météorologique pouvant comprendre un pluviomètre, un capteur d’humidité du sol et un thermomètre).

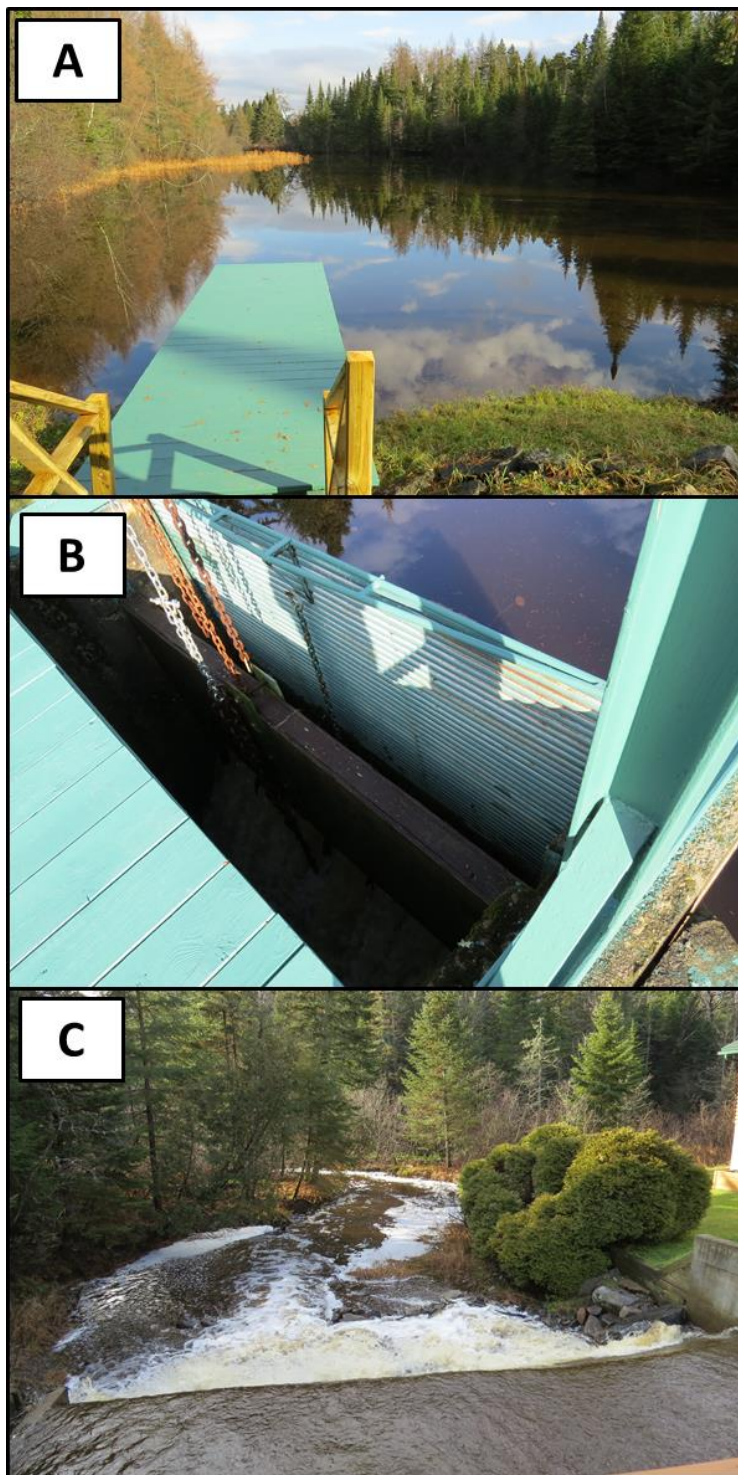


Figure 9.10 - Lac artificiel (A), vanne de vidange (B) et barrage avec vue vers l'aval (C) situé au milieu du bassin-versant du site S3 (Photos : Samuel Bolduc)

9.3 Instrumentation des sites

Pour les quatre sites, au moins un pluviomètre, un capteur d'humidité du sol, un thermomètre et un enregistreur de données ont été installés. Il est important de mentionner que pour deux sites, 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 (Tableau 9.2). Pour les bassins qui ne sont pas jaugés par la DEH, un limnimètre à bulle, fourni par la DEH, a été mis en place. Les paragraphes suivants décrivent chacun de ces instruments, le Tableau 9.2 indique le nombre d'unités achetées et les sites où les appareils ont été installés et l'Annexe K montre comment les différents appareils de recherche ont été mis en place et la Figure 9.9 montre où sont situés les appareils à l'intérieur des différents bassins-versants.

- Pluviomètre : Le pluviomètre sélectionné est le modèle TR-525M fabriqué par 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 $\pm 1.0\%$ à une intensité de pluie de 50 mm/heure;
- Capteur d'humidité du sol : Le capteur d'humidité du sol est le modèle 10HS et est fabriqué par 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 (m^3) dans un mètre cube de sol avec une précision de 3.3 % ou $\pm 0.033 m^3/m^3$.
- Thermomètre : La température et l'humidité relative sont mesurées avec l'appareil S-TMB-M006. Cet appareil peut mesurer des températures situées 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 un LPN 8/3 et est fabriqué par Hydrologic (voir la fiche technique sur le site <http://www.hydrologic.fr/pdf%20anglais/LPN%208-2%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.

Tableau 9.2 - Types et nombre d'instruments pour les différents bassins-versants 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

¹ Instrument fournit par la DEH

9.4 Bilan des campagnes de mesure

Le Tableau 9.3 présente les dates de début et de fin des campagnes de mesure 2015, 2016 et 2017 pour les quatre sites instrumentés. Pour les sites S1 et S2, les campagnes de mesure se sont terminées plus tôt que prévue en 2016 (cases bleues). Pour le site S1 l'arrêt de la campagne de mesure est dû à un bris d'équipement. Après de nombreuses vérifications, le problème a finalement été trouvé. Un petit tuyau de plastique permettant à l'air de passer du limnimètre au tuyau extérieur s'est asséché et a craqué. L'air envoyé par la limnimètre ne pouvait donc plus être acheminée jusque dans le cours d'eau. Ce tuyau a été remplacé et le problème n'a pas été rencontré à nouveau en 2017. Pour le site S2, le problème provient d'un barrage de castors situé en aval. Ce barrage a fait en sorte que les niveaux ont augmenté graduellement lors du mois d'août sans toutefois que les débits augmentent. En juin 2017, le barrage a été trouvé. Il s'agissait d'un barrage, à l'allure inachevé et de très petite dimension. Une brèche a alors été réalisée dans le barrage. Le barrage a été visité à nouveau quelques heures après pour vérifier si des castors étaient venus réparer la brèche. Aucune modification n'avait été apportée au barrage et aucun castor n'a été observé. À ce moment, le barrage a été complètement détruit.

Tableau 9.3 – Date de début et de fin des campagnes de mesure 2015, 2016 et 2017 sur les quatre sites instrumentés.

Année	S1		S2		S3		S4	
	Date Jour/Mois							
	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin	Début	Fin
2015	25/06	13/11	26/06	27/10	28/05	19/11	18/06	19/11
2016	19/05	5/08	19/05	22/08	31/04	9/11	10/05	8/11
2017	13/06	16/11	12/06	15/11	25/04	17/11	9/05	14/11

Les figures suivantes (Figure 9.11 à Figure 9.22) présentent les débits (m^3/sec) et les précipitations journalières (mm) enregistrées lors de toutes les campagnes de mesure sur tous les sites instrumentés. Pour toutes ces figures, l'onglet associé au mois en abscisse représente le premier jour de chaque mois. Il est important de mentionner que les courbes de tarage des sites S1 et S2 seront mises à jour lors des campagnes de mesure 2018, 2019 et 2020 prévue dans la phase deux du projet. En ce qui concerne les sites S3 et S4, les données de débit provient directement de la DEH. Les valeurs de débits des figures associées à ces sites pourront alors changer (Figures 9.11 à 9.16).

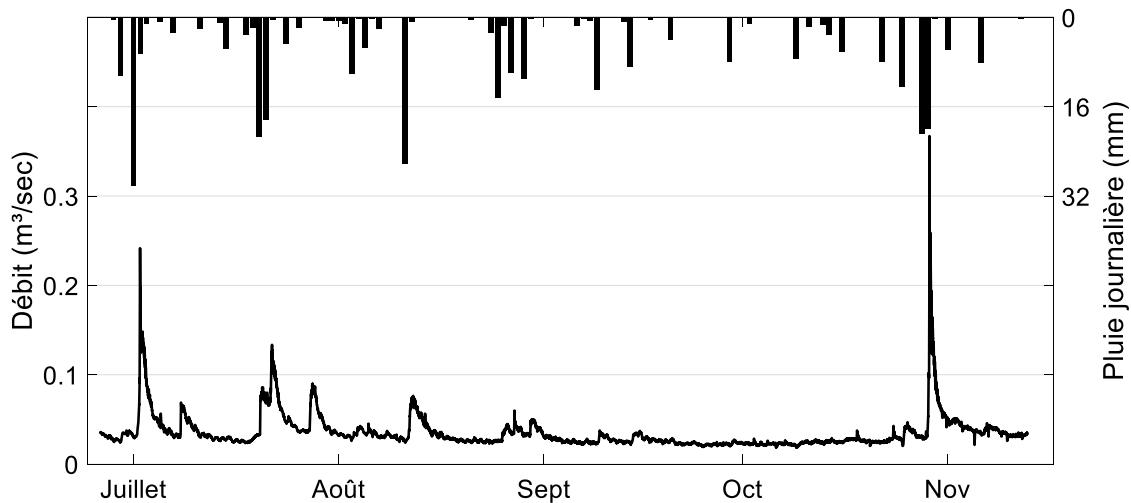


Figure 9.11 – Débits (m^3/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S1 en 2015

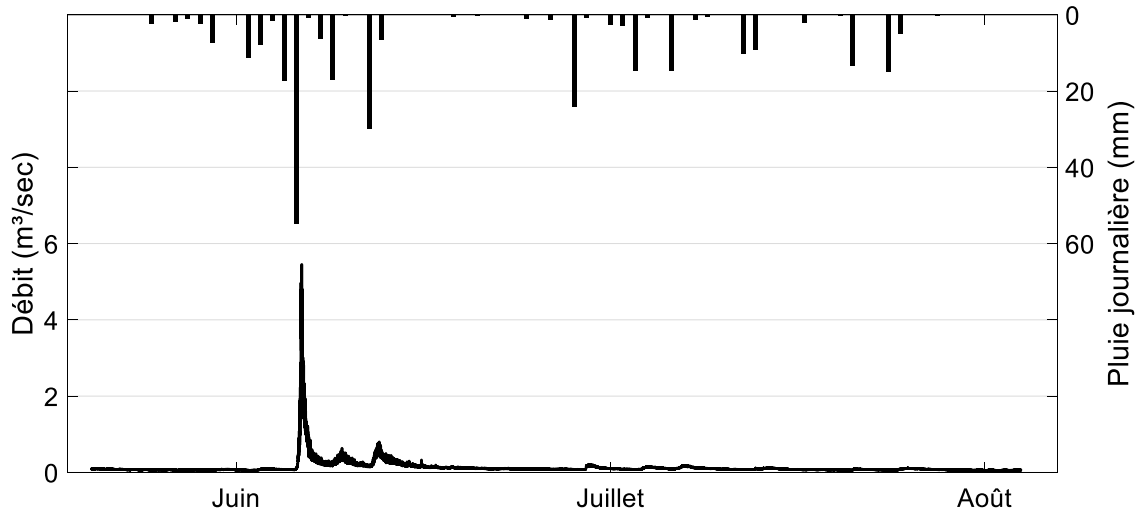


Figure 9.12 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S1 en 2016

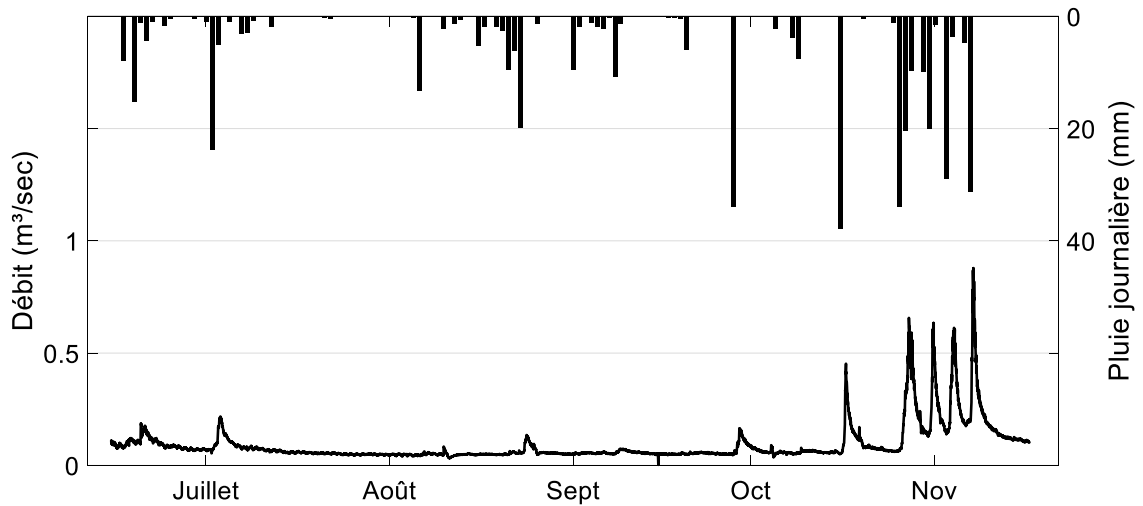


Figure 9.13 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S1 en 2017

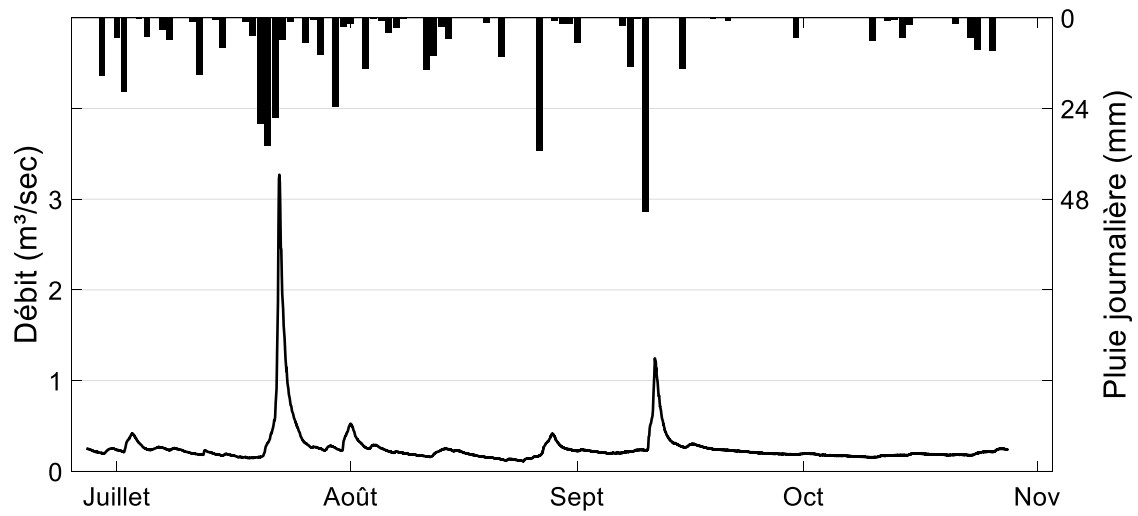


Figure 9.14 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S2 en 2015

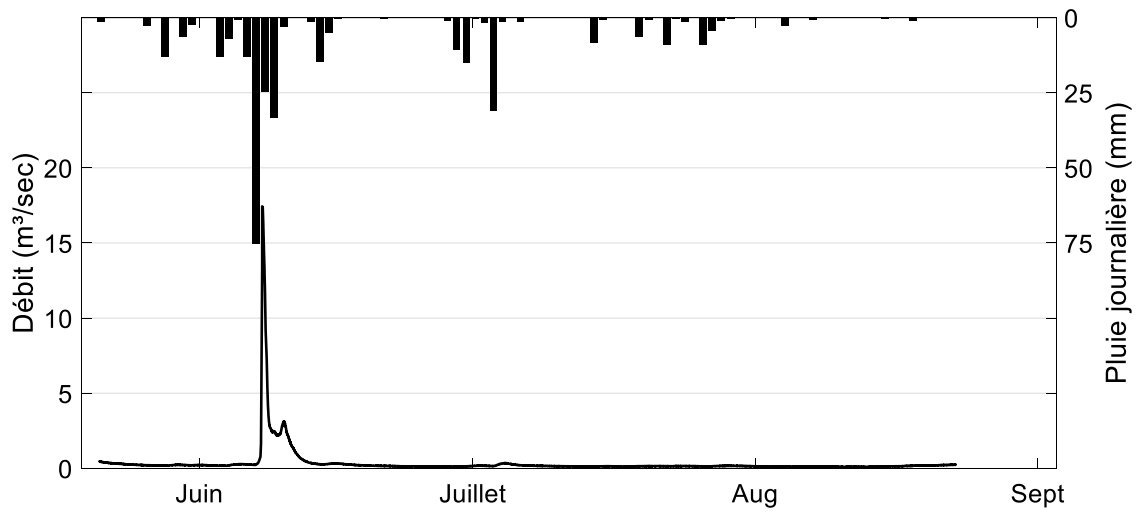


Figure 9.15 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S2 en 2016

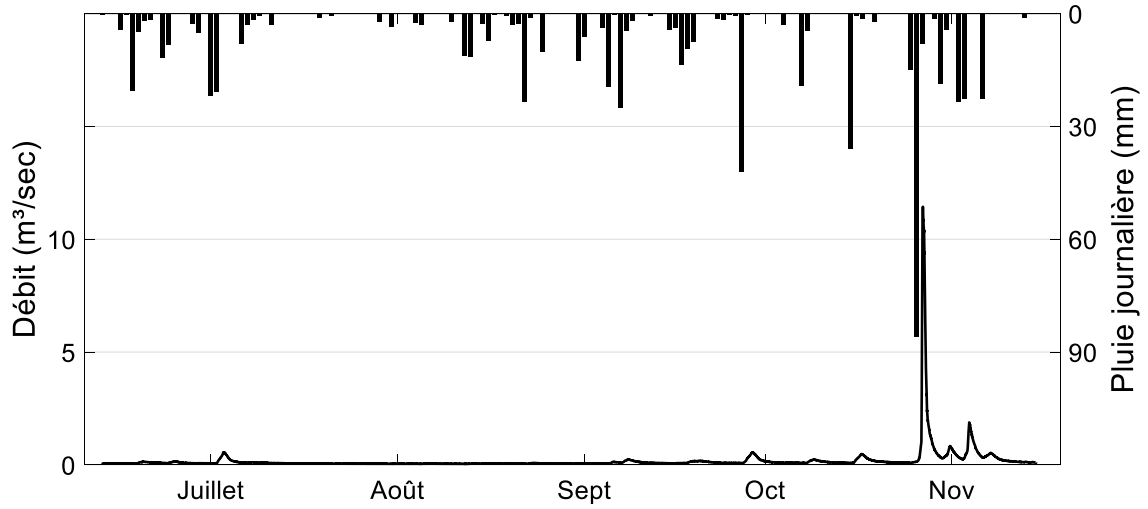


Figure 9.16 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S2 en 2017

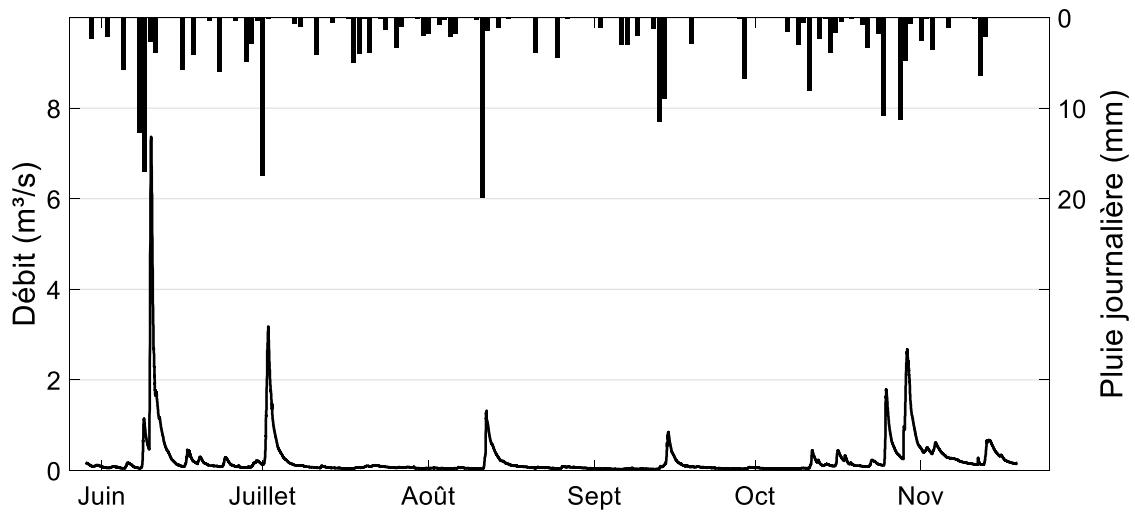


Figure 9.17 - Débits (m³/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S3 en 2015

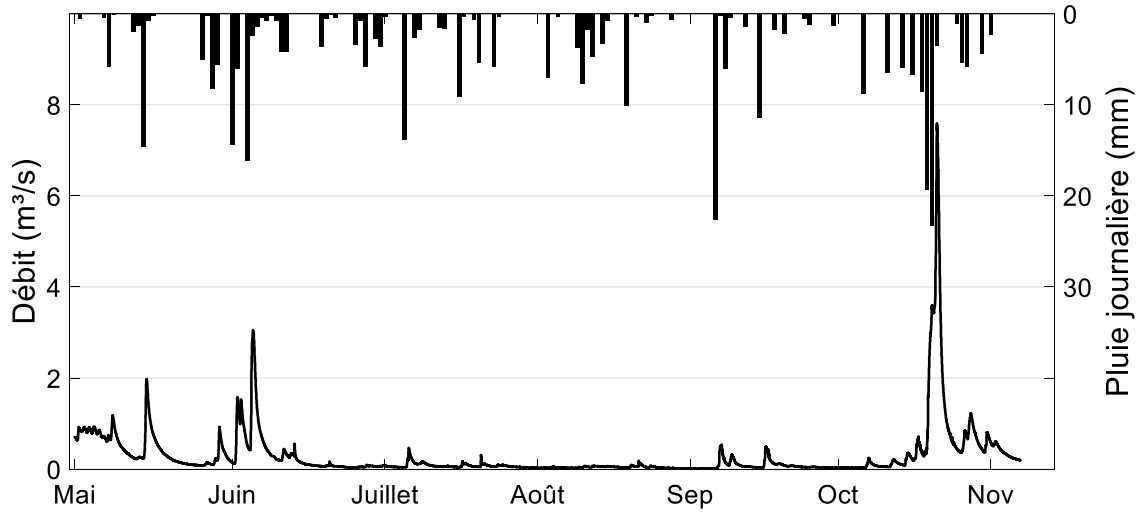


Figure 9.18 - Débits (m^3/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S3 en 2016

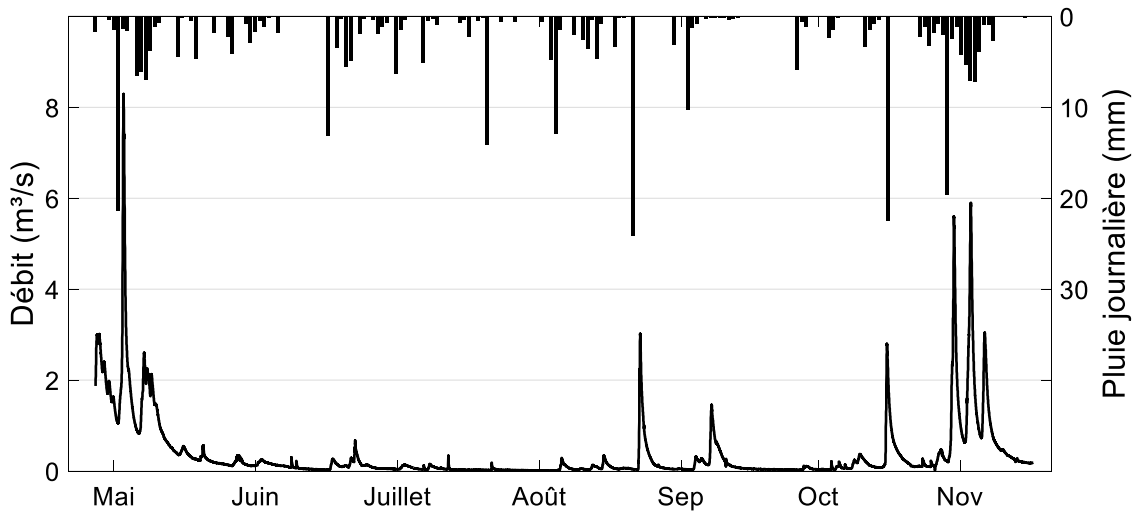


Figure 9.19 - Débits (m^3/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S3 en 2017

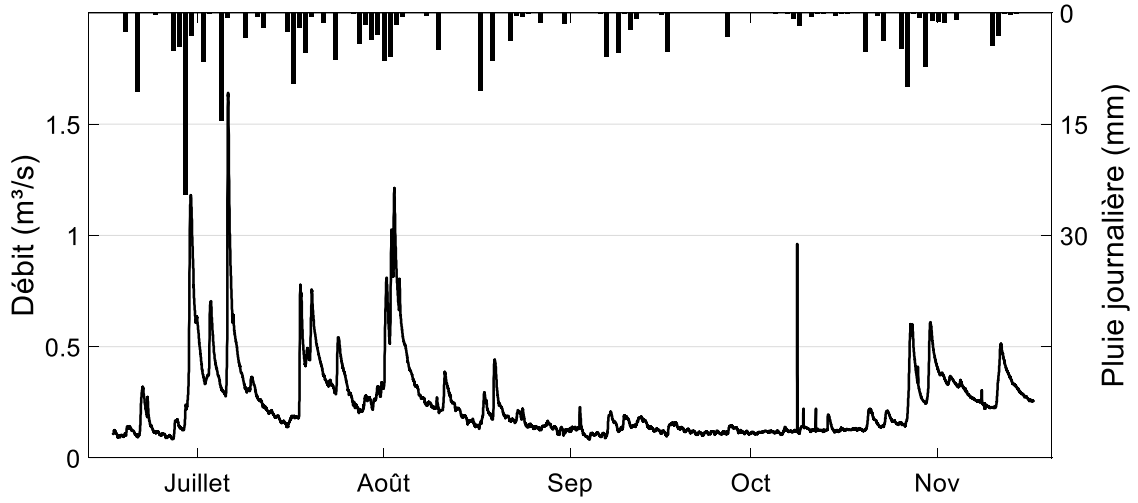


Figure 9.20 - Débits (m^3/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S4 en 2015

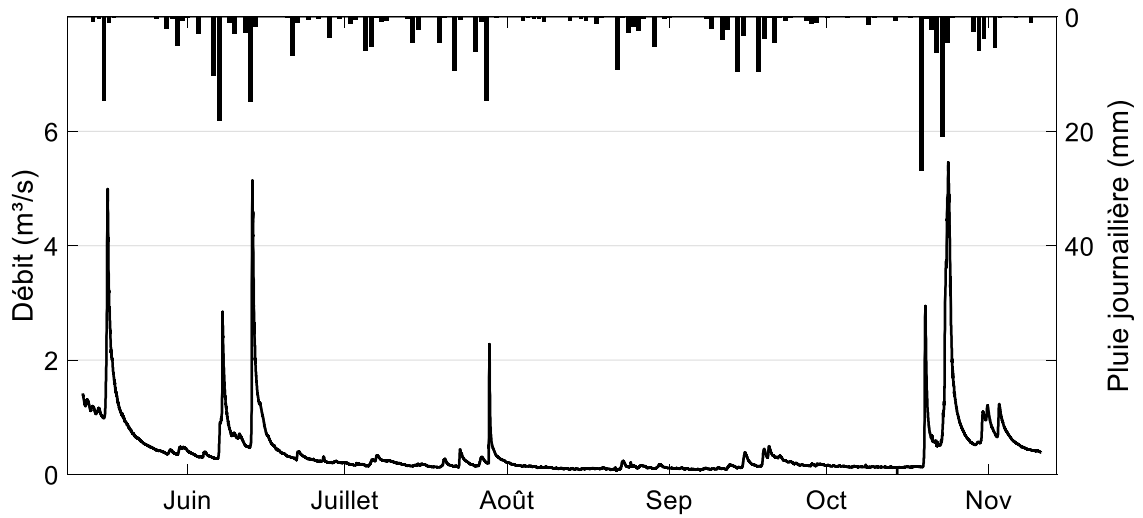


Figure 9.21 - Débits (m^3/sec) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S4 en 2016

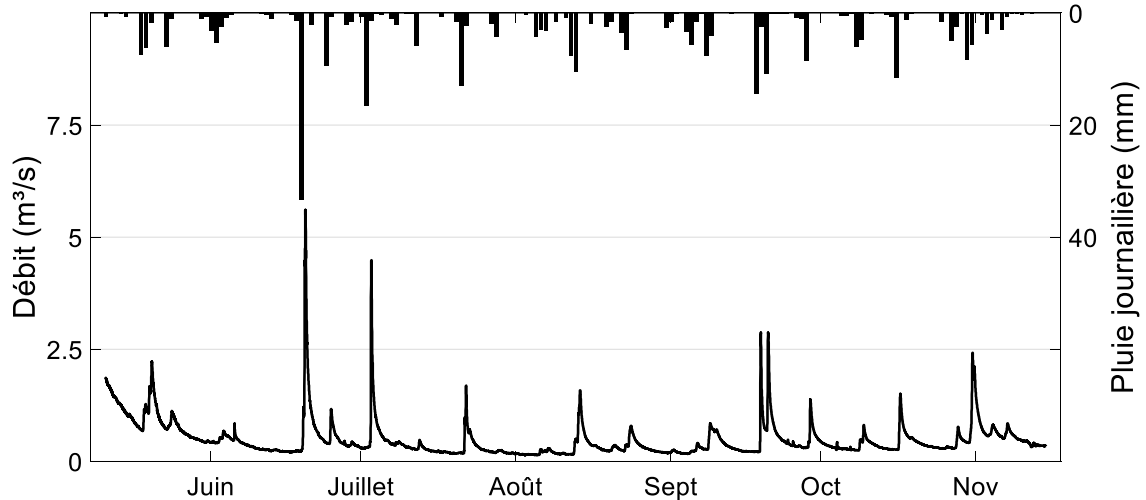


Figure 9.22 - Débits (m^3/s) et pluie journalière (mm) enregistrés sur le site S4 en 2017

9.5 Extrêmes de pluie

Afin d'identifier si des pluies de périodes de retour importantes ont été enregistrées par les pluviomètres installés sur les sites instrumentés, les hauteurs maximales de précipitation ont été calculées pour les durées 15 minutes, 30 minutes, 1, 2, 6, 12 et 24 heures pour les trois années de campagnes de mesure (2015, 2016 et 2017). Le Tableau 10.4 affiche les périodes de retour estimées pour toutes ces durées. Les périodes de retour ont été estimées à partir des courbe IDF de provenant d'Environnement Canada (EC) pour les stations météorologiques 7042378 (Forestville, site S1), 7047910 (Sept-Îles, site S2), 7016800 (Saint-Alban, site S3) et 7065640 (Normandin, site S4). L'Annexe L présente les hauteurs de pluie et les périodes de retour associées pour tous les sites lors des trois années de campagnes de mesure.

Pour le site S1, la campagne 2016 est caractérisée par des hauteurs de pluie importantes pour les durées 6, 12 et 24 heures (38, 58 et 72 mm respectivement) avec des périodes de retour estimées entre 6 et 8 ans. Pour ces trois durées, les hauteurs de pluie enregistrées proviennent du même événement ayant généré les débits les plus élevés aux cours des trois années de campagnes de mesure (Figure 10.12). Pour les années 2015 et 2017, aucune période de retour supérieure à trois ans n'a été estimée.

Pour le site S2, l'année 2015 a été caractérisée par une pluie intense de courte durée. Pour les durées de 15 et 30 minutes, des périodes de retour de plus de 50 ans et de près de 20 ans ont été estimées. Les hauteurs de pluie générées par ces événements restent somme toute modestes (15 mm) et n'ont pas causées une hausse marquée des débits en 2015. Pendant les campagnes de mesure 2016 et 2017, des hauteurs d'eau

importantes ont été enregistrées, associées à des événements de plus longues durées (6, 12 et 24 heures). Sur 24 heures, environ 90 mm de pluie ont été reçus sur le site ce qui correspond à des périodes de retour de l'ordre de 20 ans. Ces événements de pluie ont d'ailleurs générés les débits les plus forts pour leur année respective.

Le site S3 est le site pour lequel les extrêmes de pluie sont les plus faibles. Aucun événement de période de retour supérieur à deux ans n'a été enregistré en 2015 et un seul en 2016. En 2017, des périodes de retour plus élevées ont été estimées, associés à des événements de courtes durées. Ces précipitations n'ont toutefois pas eu d'effet majeur sur les débits.

Finalement, le site S4 a été touché par de nombreux événements de périodes de retour élevées notamment pour les années 2016 et 2017. En 2016, près de 30 mm de pluie ont été enregistrés sur des durées de 15 et 30 minutes d'où les périodes de retour estimées de 50 et 29 ans respectivement. En 2017, 59 et 69 mm de pluie ont été reçus sur le site sur des durées de 12 et 24 heures respectivement. Ces hauteurs de pluie sont associées à une période de retour d'environ 12 ans.

Tableau 10.1 – Période de retour (année) des extrêmes de pluie enregistrés aux différents sites

Site	Année	Durée						
		Minute		Heure				
		15	30	1	2	6	12	24
S1	2015			3	2		2	
	2016	2			2	6	8	6
	2017		2		2	2		
S2	2015	54	19	3	3	5	3	2
	2016	2	2			4	5	19
	2017	3	3	4	2	5	8	24
S3	2015							
	2016	2						
	2017	4	7	3	2	3	2	
S4	2015			2	2	3	3	3
	2016	50	29	14	6	7	8	4
	2017	4	10	13	6	5	12	12

Chapitre 10. Recommandations

Les travaux réalisés dans le cadre de la Phase I du projet conduisent les auteurs à formuler les recommandations suivantes quant à l'application de la méthode rationnelle et à la procédure décrite dans le *Manuel de conception des ponceaux*.

Tout d'abord concernant le domaine d'application de la MÉRA :

1. Étendre le domaine d'application de la méthode rationnelle à des bassins-versants allant jusqu'à 80 km².

Concernant, la délimitation des bassins-versants :

1. Privilégier la délimitation automatique des bassins-versants afin de diminuer le temps consacré à cette étape;
2. Valider la délimitation des lignes de contour des bassins-versants lorsque des méthodes d'automatisation sont employées à l'aide des cartes topographiques de données Lidar, de MNT ou encore de l'outil Info-Sol;
3. Porter une attention particulière aux milieux humides et utiliser les informations disponibles à ce sujet (couche détaillée des milieux humides, IAC et *circa 2000*).

Concernant l'estimation du temps de concentration :

1. Il est recommandé de remplacer, à court et moyen termes, la méthode MTQ en raison notamment de l'incohérence concernant la sélection des équations FAA-1 et Williams en fonction de la valeur du coefficient de ruissellement; en effet, le *Manuel de conception des ponceaux* propose d'utiliser l'équation FAA-1 lorsque le coefficient de ruissellement est inférieure à 0.4 alors que cette équation a été développée pour des secteurs majoritairement imperméables là où les coefficients de ruissellement sont élevés (voir Section 6.4);
2. Dans la mesure où une autre équation doit remplacer les équations FAA1 et Williams, il est suggéré d'utiliser l'équation NERC. Les équations Folmar et Miller et Watt et Chow peuvent également être envisagées;
3. Les équations IRDA, Sheridan-1 et Sheridan-2 ne sont pas recommandées puisque les résultats tendent à montrer que ces équations surestiment de façon importante les temps de concentration pour les bassins sous étude;
4. Les équations Espey-Morgan-Masch, FAA-2, Haktanir et Sezen, Mimikou et Wu ne sont pas recommandées puisque les résultats suggèrent qu'elles pourraient pour certains bassins sous-estimer les temps de concentration;
5. Il est fortement recommandé de procéder au développement d'une équation du temps de concentration adapté au contexte québécois ce qui est d'ailleurs prévu à la Phase II

du projet. En effet, il est clair, à la lumière des résultats précédents, que l'équation du temps de concentration utilisé a un impact majeur sur l'estimation des débits de pointe. Utiliser des équations empiriques développées et calibrées ailleurs dans le monde est difficilement justifiable et demeure la seule approche possible lorsque l'on ne dispose pas d'équation développée à partir d'un échantillon de bassins représentatifs de ceux auxquels on s'intéresse. Cette étape est cruciale si l'on veut disposer d'une évaluation des temps de concentration réaliste et applicable aux bassins visés par l'application de la MÉRA;

6. Une recommandation plus spécifique sur l'équation du temps de concentration à utiliser dans le cadre de l'application de la MÉRA pour les bassins du Québec sera formulée suite aux analyses réalisées dans la Phase II du projet.

Concernant l'estimation du coefficient de ruissellement :

1. Utiliser, comme première source d'information, les cartes pédologiques pour la classification hydrologique des sols. Lorsque ces dernières ne couvrent pas la zone désirée, les cartes de dépôts de surface doivent être utilisées;
2. La classification hydrologique des sols réalisée par l'IRDA (Gagné *et al.*, 2013) est à privilégier lors de l'utilisation des cartes pédologiques. Il est important de rappeler qu'une mise à jour de cette classification est prévue au printemps 2018. Des lors, une vérification sera nécessaire afin de vérifier si une classe hydrologique est associée à toutes les séries de sols des cartes pédologiques;
3. La mise à jour de la classification hydrologique des dépôts de surface réalisée dans le cadre de ce projet est à privilégier lors de l'utilisation des cartes de dépôts de surface;
4. L'utilisation d'un système d'information géographique et d'un modèle numérique de terrain est suggérée pour l'estimation de la pente moyenne d'un bassin-versant;
5. Dans la mesure où il n'est pas possible d'utiliser un système d'information géographique pour l'estimation de la pente moyenne d'un bassin-versant, il est recommandé de continuer d'utiliser la technique de la grille décrite dans le Manuel de conception des ponceaux à la Section 3.4.3;
6. Il est suggéré d'utiliser l'inventaire annuel des cultures du Canada pour caractériser l'occupation du territoire en raison de sa précision et de sa mise à jour annuel ainsi que la Couche détaillée des milieux humides du MDDELCC et de Canards Illimités pour l'identification des milieux humides;
7. Il est recommandé d'utiliser les coefficients de ruissellement du Tableau 3.4.1b du Manuel de conception des ponceaux pour les zones urbaines. Il n'est pas recommandé d'appliquer de facteurs de correction sur les coefficients de ruissellement en milieu urbain et ce, peu importe la période de retour considérée;
8. Il est recommandé de modifier le Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux en éliminant les classes hydrologiques AB et BC et en remplaçant la classe CD par D;

9. Il n'est pas recommandé actuellement d'appliquer un facteur de correction aux coefficients de ruissellement du Tableau 3.4.1a de Transports Québec (2017) peu importe la période de retour considérée;
10. Il est recommandé d'utiliser un coefficient de ruissellement commun pour les lacs et les milieux humides. Une valeur de 0.90 est suggérée considérant que l'impact des lacs et milieux humides sur la diminution des volumes de ruissellement est faible. L'influence des lacs et des milieux humides dans l'estimation des débits de pointe à partir de la méthode rationnelle, que ce soit en ce qui concerne les volumes de ruissellement, les temps de concentration et les débits de pointe sera analysée au cours de la Phase II du projet;
11. Il est recommandé d'utiliser un coefficient de ruissellement commun pour tous les dépôts rocheux. Une valeur de 0.90 est suggérée;
12. Une nouvelle classe de pente de bassin est proposée ($20\% > \text{pente} > 13\%$). Ce faisant une mise à jour du Tableau 3.4.1a du Manuel de conception des ponceaux est nécessaire pour tenir compte de cette nouvelle classe de pente, mise à jour qui sera réalisée dans le cadre de la Phase II du projet.

Bibliographie

AAC (2016), Inventaire annuel des cultures – Spécifications du produit conformément à la norme ISO 19131. Révision A, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 27 p. [En ligne] Consulté en février 2018 : <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/b8e4da73-fb5f-4e6e-93a4-8b1f40d95b51>.

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.

Ashford, N.J., Mumayiz, S., Wright, P.H. (2011). Airport engineering: Planning, design, and development of 21st century airports. Fourth edition, John Wiley & Son, Inc. New Jersey, 753 p.

Beaulieu, R., Breune, I., Guillou, M. (2007). Évaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants agricoles du Québec. Fiche Technique, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Agriculture, Pêcheries et Alimentation du Québec, McGill, 6 p.

Beran M. (1980). The Bransby Williams formulas-an evaluation. *Proc. Instn. Civ. Engrs.*, Part 1, 1980, 68(Feb.), 145-147.

Berger, J.-P., Leboeuf, A., Pomerleau, I. (2008). Norme et stratification écoforestière; Quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional. Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers, 101 p. [En ligne] Consulté en novembre 2016 : <https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/norme-stratification.pdf>.

Brière F.G. (2006). Distribution et collecte des eaux. Deuxième édition, revue et corrigée. Presse Internationales Polytechnique. 401 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.

Burrough, P. A., and McDonell, R. A., 1998. Principles of Geographical Information Systems (Oxford University Press, New York), 190 pp.

CAPSA (2014). Portrait, diagnostic et plan d'action des bassins-versants des rivières du secteur La Chevrotière. Pages 486 à 693 du Plan directeur de l'eau des secteurs d'intervention de la zone de gestion de la CAPSA: Sainte-Anne, Portneuf et La Chevrotière. Québec. [En ligne]

Consulté en décembre 2017 : http://www.capsa-org.com/images/documents_pde/pdeprelim/capsa_pdepreliminaire_4chevrotiere.pdf.

Chang, M., Watters, S.P., Sayok, A.K. (1989). A comparison of methods of estimating mean watershed slope. *Water Resources Bulletin*, 25(2), 327-333.

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 2015 : www.techmrt.ttu.edu/reports.php

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

Conger, D.H. (1971). Estimating the magnitude and frequency of floods in Wisconsin. Department of transportation, Division of highways, Madison, Wisconsin, 71-0076, 200 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. (1973). Linear theory of hydrologic systems. US Department of agriculture, Technical bulletin 1468, 327 p. [En ligne] Consulté en septembre 2016 : <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/160041/2/tb1468.pdf>.

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.

Edmondson, J.L., Davies, Z.G., McCormack, S.A., Gaston, K.J., Leake, J.R. (2011). Are soils in urban ecosystems compacted? A citywide analysis. *Biol. Lett.* 7; 771-774, DOI : 10.1098/rsbl.2011.0260.

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.

Fang X., Thompson D.B., Cleveland T.G., Pradhan P., Malla R. (2008). Time of concentration estimated using watershed parameters determined by automated and manual methods. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 134(2). 202–211. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:2(202).

Fang X., Thompson D.B., Cleveland T.G., Pradhan P. (2007). Variations of time of concentration estimates using NRCS velocity method. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 133(4). 314–322. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(314).

Folmar N.D., Miller A.C. (2008). Development of an empirical lag time equation. *J. Irrig. Drain, E-ASCE*, 134(4), 501-506. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2008)134:4(501).

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.

Gagné G., Beaudin I., Leblanc M., Drouin A., Veilleux G., Sylvain J.D., Michaud A.R. (2013). Classement des séries de sols minéraux du Québec selon les groupes hydrologiques. Rapport final, IRDA, Québec, Canada, 81 p. [En ligne] Consulté en septembre 2016 : http://www.irda.qc.ca/assets/documents/Publications/documents/gagne-et-al-2013_rapport_classement_sols_mineraux_groupes_hydro.pdf.

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 2015 : http://www.arr.org.au/wp-content/uploads/2013/Projects/ARR_Project_13_Stage3_report_DRAFT.pdf.

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.

Guillou, M. (2012). Analyse hydrologique et morphologique d'un cours d'eau agricole de la plaine du Saint-Laurent. Université Laval, Québec, Canada. Mémoire pour l'obtention d'une Maîtrise en génie agroalimentaire, 171 p.

Gupta, R.S. (1989). Hydrology and hydraulic systems. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 739 p.

Hannon, J.B. (1980). Underground disposal of storm water runoff. FHWA-TS-80-218, [En ligne] Consulté en septembre 2016 : <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/Ts80-218.pdf>.

Hatkanir, T., Sezen, N. (1990). Suitability of two-parameter gamma and three parameter beta distributions as synthetic unit hydrographs in Anatolia. *Hydrological Sciences Journal*, 35(2), 167-184, Doi: 10.1080/02626669009492416.

Heimstra, L. A. V., Reich, B. M. (1967). Engineering judgment and small area flood peaks. *Hydrology Papers*, Colorado State University, No. 19, 30 p. [En ligne] Consulté en novembre 2016 : <http://hermes.cde.state.co.us/drupal/islandora/object/co:11241>.

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

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.

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.

Institute of Hydrology. (1976). "Water balance of the headwater catchments of the Wye and Severen 1970-1975." Rep. No. 33, Institute of Hydrology, Oxfordshire, UK.

James, W., Rossman, L.E., James, W.R.C. (2010). User's guide to SWMM5, 13TH Edition. *Water systems models*, CHI Press, Guelph, Ontario, 905 p.

Jens, S.W. (1979). Design of urban highway drainage. FHWA Pub. No. TS-79-225, Federal Highway Administration, Washington, DC, [En ligne] Consulté en septembre 2016 : http://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/ts79_225.pdf.

Justin, J. D. (1915). Derivation of Runoff from Rainfall Data. *Trans. Amer. Soc. Civil Eng.* 77:348.

Kirpich Z.P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Eng.*, 10(6), 362.

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.

Lamontagne, L., Nolin, M.C. (1997). Dossier des noms de sol du Québec. Équipe pédologique du Québec 1997, Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec, Bulletin d'extension #8, 59 p. , [En ligne] Consulté en octobre 2016 : http://sis.agr.qc.ca/siscan/publications/surveys/pq/pqb8/pqb8_report.pdf

Lapp, P. 1996. The Hydrology and Water Quality of an Intensive Agricultural Watershed in Quebec. M.S. thesis, Dept. of Agricultural Engineering, Mc Gill University, Montreal, Canada. 125 p.

Law, F. (1956). The effect of afforestation upon the yield of water catchment areas. Technical. Rep., British association for advancement of sciences, Sheffield, England.

Li, M.-H., Chibber, P. (2008). Overland flow time of concentration on very flat terrains. *Journal of the transportation research board, Transportation research record*, December, No. 2060. DOI: 10.3141/2060-15.

Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.H. (1982). *Hydrology for engineers*, 3rd Ed., McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y. 508 p.

Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H. (1958). *Hydrology for engineers*. McGraw-Hill Book Company, 340 p.

Linsley, R.K., Kohler, M.A., Paulhus, J.L.H. (1949). *Applied hydrology*. McGraw-Hill, New York, New York, 689 p.

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.

Madramootoo, C.A. et P. Enright. 1988. Applicability of the Soil Conservation Service Equations for Runoff Prediction in the Ottawa – St Lawrence Lowlands. *Can. J. Civ. Eng.*, 15(5), 759-765, DOI: 10.1139/l88-100.

Mailhot, A., Bolduc, S., Pelletier, M., Talbot, G. (2016a). 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 d'étape 1 No. R1649, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports, 154 p.

Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G., Abdul-Hadi, F., Blais, P. (2016b). 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 d'étape 2, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, Ministère des transports, de la mobilité durable et de l'électrification des transports, 84 p.

Mailhot, A., Bolduc, S., Guillou, M. (2016c). 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, Direction de l'Agroenvironnement et du développement durable, Rapport Final, 151 p. Link : https://www.agrireseau.net/documents/Document_94081.pdf

Mailhot, A., Talbot, G., Panthou, G. (2014a). Mise à jour de certains paramètres du Manuel de conception des ponceaux et des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) PHASE I. INRS-Eau, Terre et Environnement, Ministère des Transports du Québec, Rapport de recherche R1505, 101 p.

Mailhot, A., Talbot, G., Panthou, G. (2014b). Mise à jour de certains paramètres du Manuel de conception des ponceaux et des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) PHASE II. INRS-Eau, Terre et Environnement, Ministère des Transports du Québec, Rapport de recherche R1515, 28 p.

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.

McDonnell, J. J. (1990). A rational for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment. *Water Resour. Res.*, 26(11), 2821-2832.

McEnroe, B. M., Young, C. B., Rome, A. C. (2007). Flood frequency relationships for small watersheds in Kansas. Report No. K-TRAN: KU-06-4, Final Report, Kansas department of transportation, Kansas state university, University of Kansas, 53 p. [En ligne] Consulté en novembre 2016 : <ftp://mdt.mt.gov/research/LIBRARY/K-TRAN-KU-06-4.PDF>.

McNeely Engineering. 1982. Design manual for open channel drainage in the Ottawa St. Lawrence Lowlands. 62 p.

MDDEFP et MAMROT (2014). Guide de gestion des eaux pluviales. Ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des parcs et le Ministère des affaires municipales, des régions et de l'occupation du territoire. [En ligne] Consulté en février 2016 : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide-gestion-eaux-pluviales.pdf>.

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.

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 inc. (IRDA), Québec, Canada, 142 pp.

Michaud, A.R., Giroux, M., Beaudin, I., Desjardins, J., Gagné, G., Duchemin, M., Deslandes, J., Landry, C., Beaudet, P., Lagacé, J. (2008). ODEP; Outil de diagnostic des exportations de phosphores. Projet «Gestion du risque associé aux facteurs source et transport du phosphore des sols cultivés au Québec», réalité dans la cadre de l'initiative d'appui aux conseillers

agricoles (PIACA-204). Institut de recherche et de développement en agroalimentaire inc. (IRDA) et Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada. <https://www.irda.qc.ca/fr/outils-et-services/odep/>

Mimikou, M. (1984). Regional relationships between basin size and runoff characteristics. *Hydrological Sciences Journal*, 29(1), 63-73, Doi: 10.1080/02626668409490922.

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

Montas H.J., P.G. Enright, C.A. Madramootoo. 1990. Évaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants du Québec. Agdex 750, MAPAQ, service du génie. 62 p.

MRN (2013). Norme de stratification écoforestière : Quatrième inventaire écoforestier du Québec méridional. Ministère des Ressources naturelles, Secteur des forêts, 101 p. [En ligne] Consulté en novembre 2016 : <http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/inventaire/pdf/norme-stratification-2013.pdf>

Mulholland, P. J., Wilson, G. V., Jardine, P. M. (1990). Hydrogeochemical response of forested watershed to storms : Effect of preferential flow along shallow and deep pathways. *Water Resour. Res.*, 26(2), 3021-3036.

Musgrave, G.W. (1955). How much water enters the soils. *USDA Yearbook*, U.S. Department of agriculture, Washington, DC, 151-159.

NERC (Natural Environmental Research Council), 1975. Flood studies report. London: Natural Environment Research Council, Volume 1 et 4.

Nouh, M. (1989). The use of the rational formula in infiltrating mountainous catchments. In *Proceedings of the international conference for centennial of Mannings formula and Kuichling's rational formula*, p. 226-237. Department of civil engineering, University of Virginia, Charlottesville, VA.

Perrone, J., Madramootoo, C.A., Lapp, P. (1988). Hydrologic characteristics of an agricultural watershed in rural Quebec. *Can. Agric. Eng.*, 40, 79-88. Link : http://csbe-scgab.ca/docs/journal/40/40_2_79_raw.pdf

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

Poirier, I. (2010). La canneberge au Québec et au Centre-du-Québec. Le modèle de développement durable, à la conquête de nouveaux marchés. Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'Alimentation, Direction régionale du Centre-du-Québec, Victoriaville, 35 p. [En

ligne] Consulté en février 2018 :
<http://www.notrecanneberge.com/images/stories/PDF/Divers/la%20canneberge%20au%20quebec.pdf>.

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

Ramser, C.E. (1927). Run-off from small agricultural areas. *Journal of agricultural research*, 34(9), 797-823.

Rao, , R.A., Delleur, J.W. (1974). Instantaneous unit hydrographs, peak discharges and time lags in urban areas. *Hydrological Sciences Bulletin*, 19(2), 185-198

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Miller, N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soil data. *J. Hydraul. Eng.*, 109, 62-70.

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.

Rocha Medrano, N.R. (2014). Débits de crue et analyse hydrologique de petits bassins versants. Université Laval, Québec, Canada. Mémoire pour l'obtention d'une Maîtrise en génie agroalimentaire, 155 p.

Roche, P.-A., Miquel, J., Gaume, E. (2012). Hydrologie quantitative : Processus, modèles et aide à la décision. Springer-Verlag, France, 590 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.

Saucier, J.-P., Berger, J.-P., D'avignon, H., Racine, P. (1994). Le point d'observation écologique. Ministère des Ressources Naturelles, Direction de la gestion des stocks forestiers, Service des inventaires forestiers, 116 p. [En ligne] Consulté en novembre 2016 :
<https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/connaissances/le-point-observation-ecologique-normes-tech-34.pdf>

Schaake, J. C., Geyer, J. C., Knapp, J. W. (1967). Experimental examination of the rational method. *J. Hydr. Eng. Div.-ASCE*, 93(6), 353-370.

Schwab, G. O., Frevert, R. K. (1985). Elementary soil and water engineering. 3rd Edition, Johnm Wiley & Sons, Inc., Toronto, 356 p.

Schwab, G. O. (1957). Elementary soil and water engineering. John Wiley & Sons, New York, 292 p.

Serban, P., Stanescu, V. Al., Simota, M. (1988). Contribution to the study of peatlands in influence on maximum flow. Proceedings of the international symposium on the hydrology of wetlands in temperate and cold regions, Joensuu, Finland, 6-8 june, 1988, vol. 1, Publications of the academy of Finland.

Sharafi S., Hosseini S.M. (2011). Methodology for identifying the best equations for estimating the time of concentration of watersheds in a particular region. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 137(11), 712-719. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000373.

Sheridan J.M. (1994). Hydrograph time parameters for flatland watershed. *Transactions of the ASCE*, 37(1), 103-113.

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. [En ligne] Consulté en avril 2016 : http://www.lwrri.lsu.edu/downloads/LWRRRI_Bulletins/May2005/LWRRRI_TCR_1984.pdf

Singh, V.P. (1988). Hydrologic systems: Volume 1, Rainfall-runoff modeling. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 480 p.

Snyder, F.F. (1938). Synthetic units hydrographs. Transactions, American Geophysical Union, 19, 447-454.

Soane, B.D. et Ouwkerk, C.van. (1995). Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil and Tillage Research*, 35: 5-22.

Tabi, M., Tardif, L., Carrier, D., Laflamme, G., Rompré, M. (1990). Inventaire des problèmes de dégradation de sols agricoles du Québec. Entente auxiliaire Canada-Québec. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. <https://www.irda.qc.ca/fr/outils-et-services/informations-sur-les-sols/inventaire-des-problemes-de-degradations-des-sols-agricoles-du-quebec/>

TDT (2014). Hydraulic design manual. Texas department of transportation, [En ligne] Consulté en septembre 2016: <http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hyd/hyd.pdf>.

Thomas, W. O., Monde, M. C., Davis, S. R. (2000). Estimation of time of concentration for Maryland streams. 79th Annual meeting of the transportation-research-board, Washington, D.C., Transportation research record, 1720, 95-99.

Titmarsh, G., Cordery, I., Pilgrim, D. (1995). Calibration Procedures for Rational and USSCS Design Flood Methods. *J. Hydraul. Eng.*, 121(1), 61–70. DOI : 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:1(61).

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

USDA-NRCS (2009). Hydrologic Soil Groups: Chapter 7. Part 630 Hydrology, National Engineering Handbook, [En ligne] Consulté en février 2018 : <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17757.wba>.

USDA-NRCS (1986). Urban hydrology for small watersheds. TR-55, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, [En ligne] Consulté en septembre 2016 : http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf.

Verry, E. S., Brooks, K. N., Barten, P. K. (1988). Streamflow response from an ombrotrophic mire. Proceedings of the international symposium on the hydrology of wetlands in temperate and cold regions, Joensuu, Finland, 6-8 june, 1988, vol. 1, Publications of the academy of Finland.

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.

Wanielista, M., Kersten, R., Eaglin, R. (1997). Hydrology : Water quality and quality control. New York, NY : John Wiley & Sons, Inc.

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.

Waugh, P., Jones, J., Urbonas, B., MacKenzie, K., Guo, J. (2002). Denver Urban Storm Drainage Criteria Manual. *Global Solutions for Urban Drainage*, 1-8. DOI: 10.1061/40644(2002)56.

Williams, G. B. (1922). Flood discharge and the dimensions of spillways in India. *The Engineer*, Sept. 29, 321-322.

Wong T.S.W. (2005). Assessment of time of concentration formulas for overland flow. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 131(4), 383-387. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:4(383).

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).

Wu, I.-P. (1963a). Design hydrographs for small watershed in Indiana. Journal of the hydraulics division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 89(6), 35-66.

Wu, I-P. (1963b). Hydrology of small watersheds in Indiana and hydrodynamics of overland flow. Final Report, Joint Highway Research Project, Purdue University, Lafayette, Indiana, 219 p.

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.

Zapata-Sierra, A., et Manzano-Agugliaro, F. (2008). Influence of six tree species on water infiltration soil. *Agroscienca*, 42 : 835-845.

Annexe A. Localisation des stations hydrométriques des bassins-versants

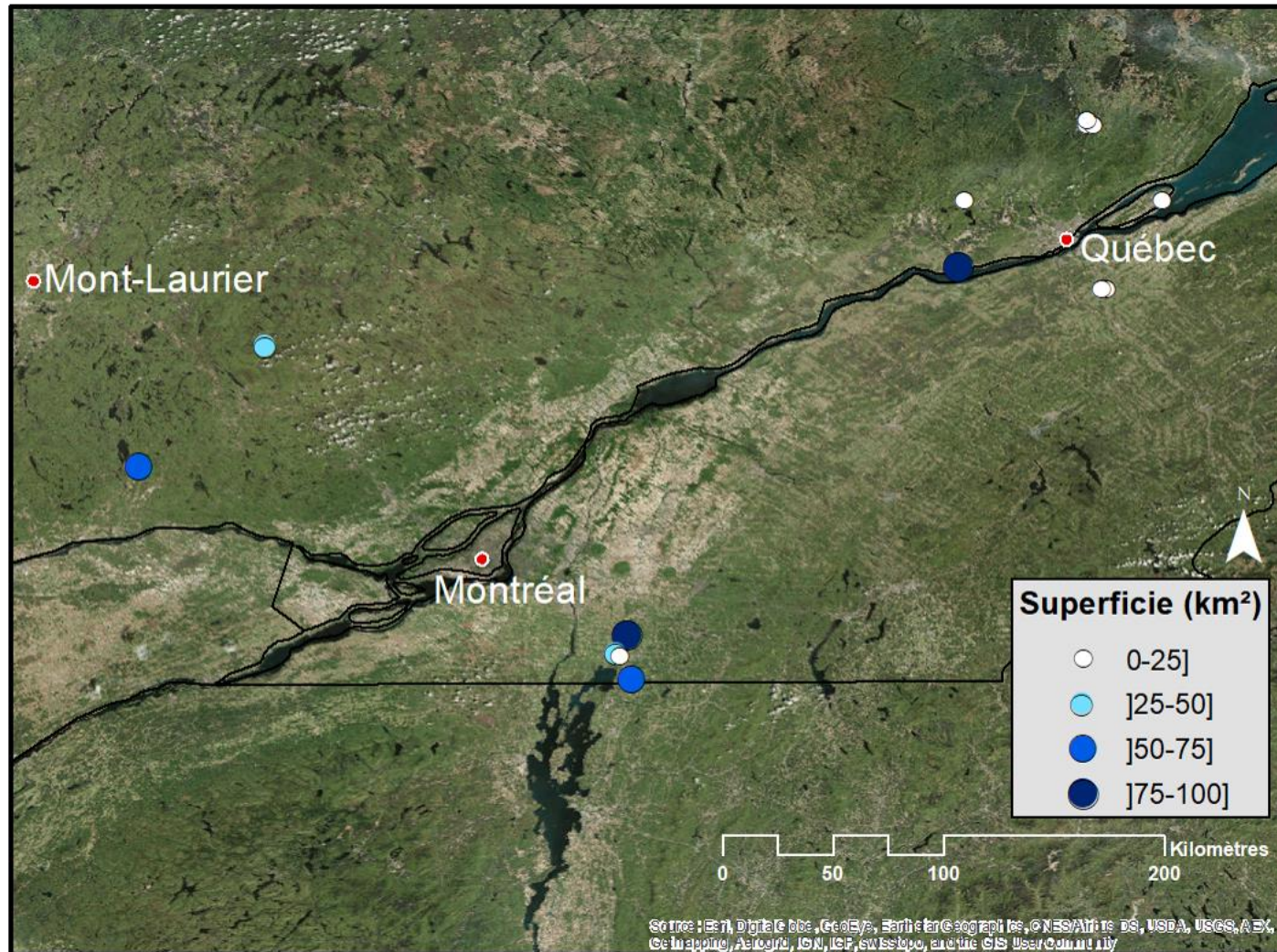


Figure A.1 - Localisation des stations hydrométriques des bassins-versants à l'étude et superficie correspondante pour le Québec.

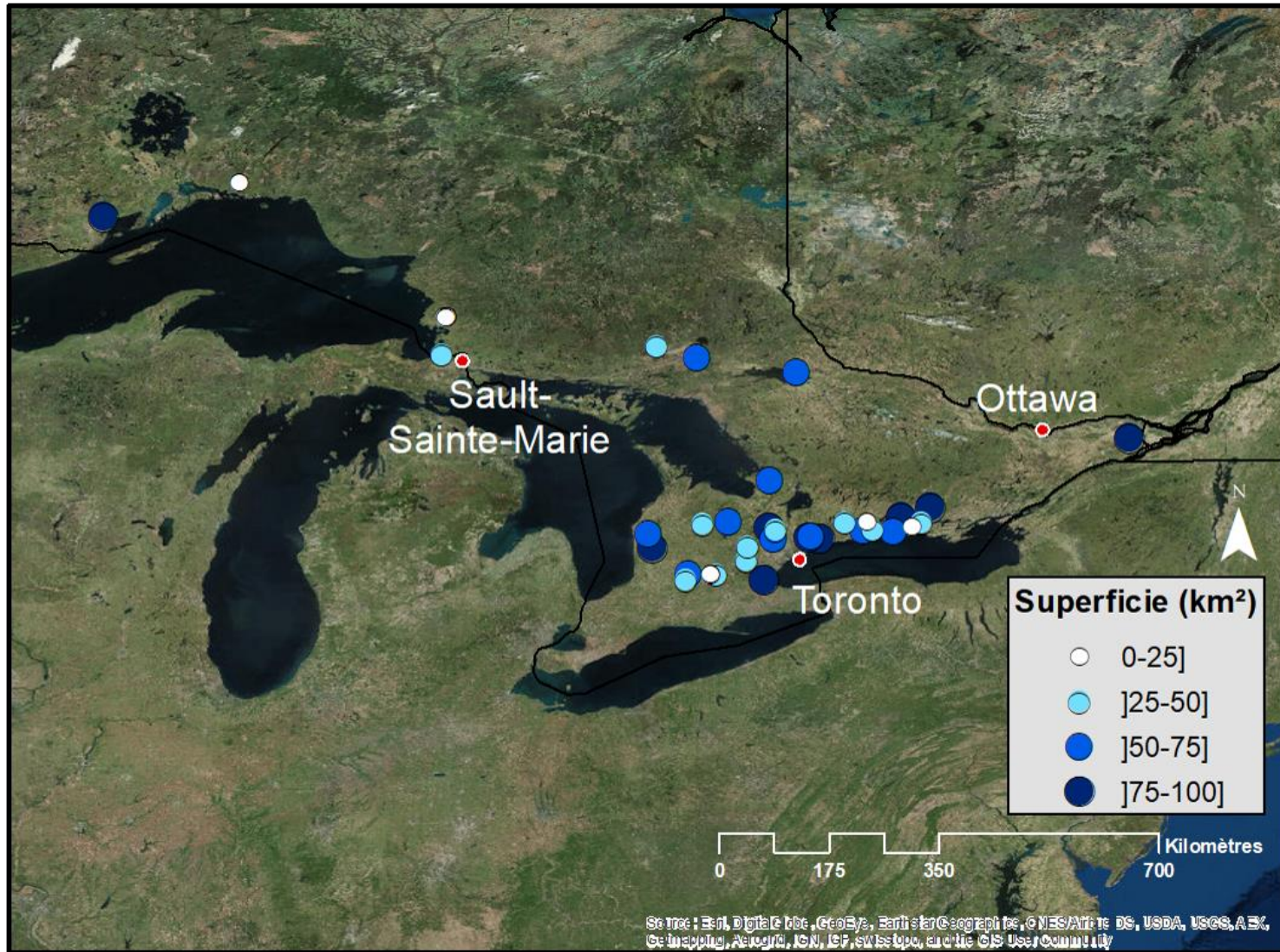


Figure A.2 - Localisation des stations hydrométriques des bassins-versants à l'étude et superficie correspondante pour l'Ontario.

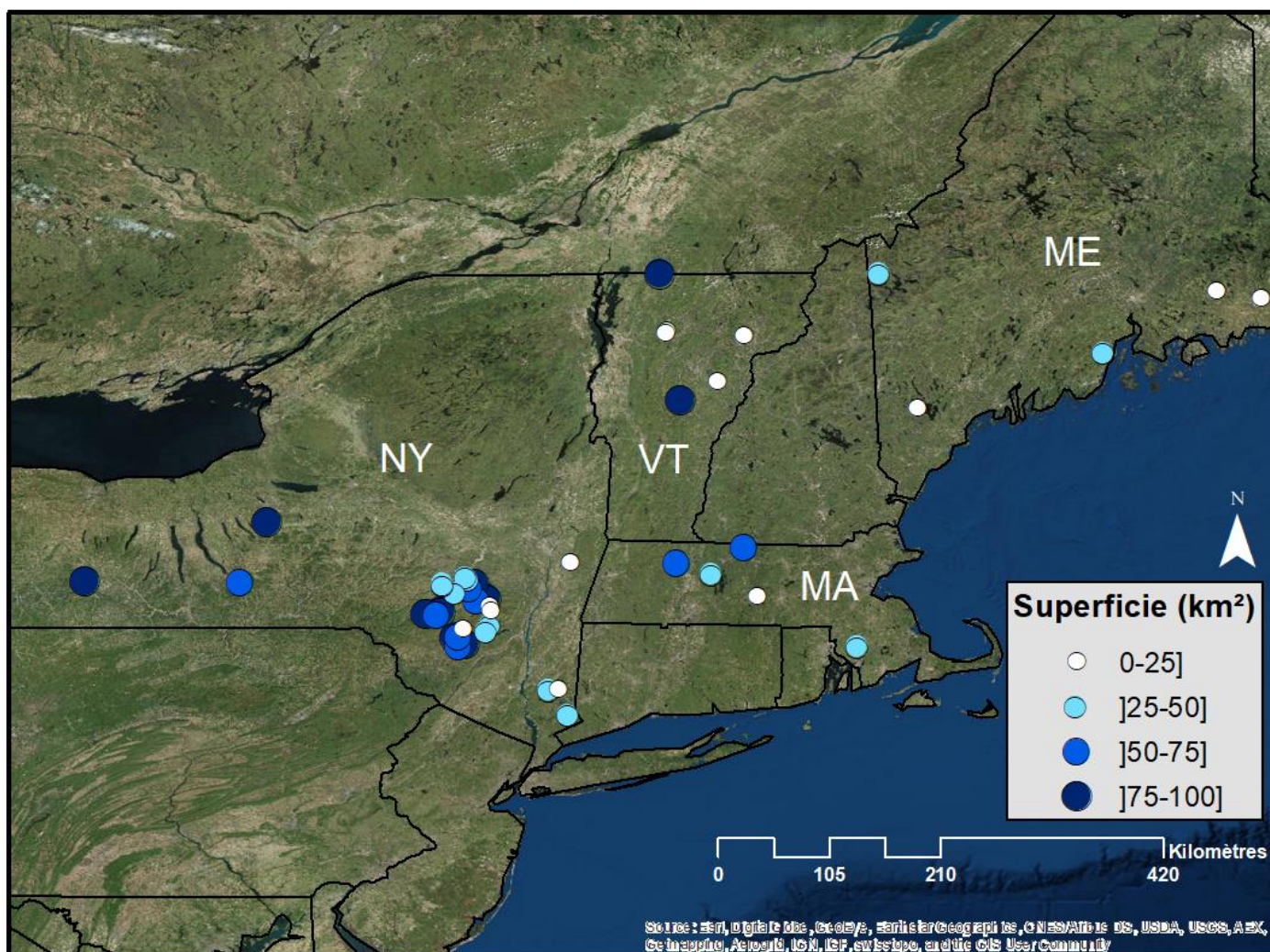


Figure A.3 - Localisation des stations hydrométriques des bassins-versants à l'étude et superficie correspondante pour les États-Unis (États : MA; Massachusetts, ME; Maine, NY; New York et VT; Vermont)

Tableau A.1 – Localisation des stations hydrométriques et provenance des données de débit pour les 101 bassins-versants à l'étude (DEH : direction de l'expertise hydrique, IRDA : Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement, ECCC : Environnement et Changement Climatique Canada, USGS : United States Geological Survey).

Nom/Numéro de la station	Localisation			Source	
	Province/État	Coordonnées			
		Lat.	Long.		
30426	Québec	45,13	-73,08	DEH	
50813		46,97	-71,66		
51002		47,27	-71,16		
51003		47,27	-71,14		
51004		47,29	-71,16		
120201		46,97	-70,86		
50812		46,70	-71,69		
30425		45,02	-73,02		
30423		45,20	-73,03		
40212		46,37	-74,50		
40409		45,88	-75,02		
30422		45,13	-73,04		IRDA
Fourchette Amont		46,60	-71,09		
Fourchette Aval	46,63	-71,08			
02AB020	Ontario	48,48	-89,32	ECCC	
02BA005		48,98	-87,38		
02BF004		46,52	-84,47		
02BF005		47,06	-84,43		
02BF006		47,05	-84,41		
02BF007		47,04	-84,41		
02BF008		47,05	-84,40		
02BF009		47,06	-84,40		
02BF012		47,06	-84,39		
02BF013		47,04	-84,42		
02CF013		46,64	-81,39		
02DB007		46,48	-80,82		
02DD013		46,26	-79,40		
02EC010		44,01	-79,69		
02ED017		44,73	-79,78		
02ED100		44,05	-79,80		
02FC017		44,09	-80,74		

Nom/Numéro de la station	Localisation			Source
	Province/État	Coordonnées		
		Lat.	Long.	
02FD002	Ontario	43,97	-81,51	ECCC
02FE014		43,76	-81,46	
02GA030		43,37	-80,55	
02GA031		43,58	-80,11	
02GA041		44,14	-80,36	
02GA044		43,38	-80,64	
02GA045		43,37	-80,63	
02GA046		43,38	-80,63	
02GD019		43,30	-80,97	
02GD026		43,38	-80,94	
02HB012		43,30	-79,87	
02HB020		43,77	-80,09	
02HC019		43,89	-79,06	
02HC023		43,89	-79,72	
02HC028		43,91	-79,22	
02HC038		43,92	-79,18	
02HD003		44,02	-78,44	
02HD004		44,02	-78,44	
02HD010		43,99	-78,00	
02HD018		44,06	-77,74	
02HH003		44,12	-78,70	
02HJ005		44,12	-78,39	
02HK008		44,34	-77,48	
02HK009		44,20	-77,91	
02HK011		44,11	-77,61	
02MC028		45,33	-74,64	
01021470	Maine	44,80	-67,73	USGS
01022294		44,86	-68,10	
01037380		44,33	-69,06	
01063310		43,86	-70,64	
01073000		45,00	-70,97	
01109070	Massachussets	41,84	-71,14	
01162500		42,68	-72,12	
01169900		42,54	-72,69	
01174565		42,46	-72,38	
01175670		42,27	-72,01	

Nom/Numéro de la station	Localisation		Source		
	Province/État	Coordonnées			
		Lat.		Long.	
01349700	New York	42,25	-74,30	USGS	
01349711		42,19	-74,28		
01349810		42,23	-74,39		
01350035		42,34	-74,45		
01350080		42,38	-74,41		
01350120		42,41	-74,45		
01350140		42,43	-74,47		
01360640		42,55	-73,59		
01362342		42,14	-74,27		
01362497		42,02	-74,27		
01363382		41,97	-74,29		
01365000		41,87	-74,49		
01365500		41,85	-74,54		
01374559		41,47	-73,76		
01374598		41,48	-73,69		
01374890		41,26	-73,60		
01413088		42,29	-74,56		
01414000		42,13	-74,70		
01414500		42,11	-74,73		
01415000		42,12	-74,82		
01421610		42,37	-74,67		
01421618		42,36	-74,66		
01434017		41,93	-74,54		
01434025		42,00	-74,50		
01434498		41,92	-74,57		
01521500		42,40	-77,71		
04233286		42,38	-76,39		
04237962		42,90	-76,17		
01135150		Vermont	44,48		-72,12
01139800			44,09		-72,34
01142500	43,93		-72,66		
04288225	44,52		-72,77		
04288230	44,50		-72,78		
04294300	45,00		-72,83		

Annexe B. Caractéristiques physiographiques

Tableau B.1 – Principales caractéristiques physiographiques des 101 bassins-versants à l'étude

Nom/Numéro de la station	Caractéristiques des bassins						
	Aire (km ²)	Lac (ha)	Longueur du cours d'eau (km)	Milieu humide (ha)	Pente du bassin-versant (%)	Pente (85-10) du cours d'eau (%)	Sinuosité
30426	28.7	0.3	12.7	43.0	0.9	0.2	1.2
50813	2.1	37.5	2.3	0.7	9.8	1.6	1.1
51002	3.6	0.0	2.3	1.3	9.4	2.3	1.5
51003	8.4	0.0	5.0	12.1	10.5	3.5	1.1
51004	1.1	0.0	1.2	0.0	12.6	10.5	1.1
120201	24.1	3.2	9.8	194.8	1.7	0.5	1.5
50812	96.3	17.8	35.6	1522.2	2.8	0.3	1.8
30425	70.1	14.2	21.9	443.0	6.3	0.2	2.1
30423	94.0	18.0	24.2	868.9	0.8	0.3	1.5
40212	39.7	177.4	15.2	82.2	11.9	1.5	1.3
40409	63.4	182.2	16.6	246.5	9.3	0.5	1.4
30422	11.4	0.9	6.5	8.6	1.2	0.2	1.1
Fourchette Amont	2.6	0.2	3.2	0.6	1.2	0.4	1.3
Fourchette Aval	2.5	0.4	2.7	20.7	5.0	0.5	1.3
02AB020	76.2	88.5	31.7	1279.6	4.4	0.4	1.7
02BA005	11.1	35.2	6.0	26.4	6.4	1.5	1.4
02BF004	45.0	80.4	14.8	307.2	5.4	1.1	1.3
02BF005	10.4	114.3	8.2	13.3	11.9	2.4	1.8
02BF006	8.1	112.5	5.9	6.7	11.1	2.9	2.0
02BF007	5.1	56.5	4.6	6.8	11.6	3.6	1.4
02BF008	3.5	31.2	3.7	6.3	12.3	4.0	1.3
02BF009	2.1	11.7	2.1	5.6	12.1	3.8	1.2
02BF012	0.9	11.7	1.0	2.8	11.7	7.8	1.1
02BF013	0.5	4.8	1.1	0.0	9.4	4.1	1.2
02CF013	27.9	418.1	16.3	116.3	10.2	0.2	1.5
02DB007	69.4	89.1	18.8	701.6	5.1	0.3	1.5

Nom/Numéro de la station	Caractéristiques des bassins						
	Aire (km ²)	Lac (ha)	Longueur du cours d'eau (km)	Milieu humide (ha)	Pente du bassin-versant (%)	Pente (85-10) du cours d'eau (%)	Sinuosité
02DD013	63.9	125.9	24.1	1041.8	2.7	0.2	1.6
02EC010	41.2	25.0	14.0	234.7	3.9	0.5	1.5
02ED017	57.0	5.5	24.7	718.4	3.4	0.3	2.3
02ED100	75.4	5.5	17.7	352.3	3.8	0.4	1.6
02FC017	47.8	7.8	24.2	1441.0	2.4	0.3	1.8
02FD002	65.8	12.8	24.1	1351.0	2.2	0.2	1.6
02FE014	76.5	4.2	21.1	431.8	2.2	0.2	1.4
02GA030	36.7	93.9	11.2	176.6	3.3	0.4	1.4
02GA031	39.4	5.5	14.3	682.1	2.8	0.7	1.2
02GA041	66.5	3.9	14.2	1876.7	0.9	0.2	1.2
02GA044	2.2	0.0	2.7	18.3	1.5	1.1	1.3
02GA045	4.8	0.9	4.1	34.6	2.8	1.3	1.3
02GA046	2.1	0.9	2.5	3.3	2.2	1.2	1.1
02GD019	43.6	1.7	14.6	92.3	1.0	0.2	1.4
02GD026	56.8	19.8	14.1	129.3	1.5	0.2	1.2
02HB012	79.9	14.5	26.9	1238.9	1.9	0.7	2.5
02HB020	36.3	7.7	16.7	442.2	3.7	0.4	2.1
02HC019	90.4	45.7	25.8	488.5	4.5	1.2	1.4
02HC023	60.2	83.3	16.3	302.0	4.3	0.6	1.6
02HC028	77.0	92.3	24.4	443.1	2.0	0.4	1.9
02HC038	65.2	59.3	20.9	412.7	3.1	0.7	1.4
02HD003	66.0	8.5	23.8	485.2	4.9	0.8	1.5
02HD004	47.4	2.0	15.2	358.8	5.0	1.2	1.4
02HD010	61.9	13.4	19.9	526.3	5.4	0.9	1.5
02HD018	12.2	6.7	6.9	189.0	5.2	1.4	1.6
02HH003	25.8	5.7	13.0	306.6	3.8	0.6	2.1
02HJ005	11.6	3.1	6.0	34.3	5.2	0.9	1.3
02HK008	85.6	59.8	22.6	2465.4	4.6	0.2	1.5
02HK009	79.4	1.3	22.2	1141.8	5.2	0.4	1.2
02HK011	34.0	35.5	10.1	818.7	4.6	0.8	1.2

Nom/Numéro de la station	Caractéristiques des bassins						
	Aire (km ²)	Lac (ha)	Longueur du cours d'eau (km)	Milieu humide (ha)	Pente du bassin-versant (%)	Pente (85-10) du cours d'eau (%)	Sinuosité
02MC028	88.0	14.1	33.0	3088.9	1.7	0.1	1.5
1021470	16.5	7.8	10.0	0.0	2.1	0.2	1.6
1022294	0.4	0.0	0.9	0.0	17.7	26.0	1.0
1037380	38.6	147.5	14.7	307.6	4.5	0.7	1.8
1063310	4.0	0.0	3.9	71.9	5.1	0.8	1.2
1073000	31.3	68.2	14.8	343.6	4.8	0.4	1.9
1109070	29.1	59.9	11.6	381.3	2.6	0.2	1.3
1162500	51.2	113.8	24.1	608.7	5.2	0.4	1.5
1169900	61.8	21.2	22.6	167.8	11.7	1.3	1.7
1174565	32.8	14.1	11.7	106.2	7.9	1.4	1.1
1175670	23.3	64.7	12.5	195.4	6.7	0.9	1.3
1349700	91.5	59.6	26.5	67.3	11.2	0.9	1.3
1349711	12.7	0.0	5.2	0.1	23.5	8.4	1.2
1349810	69.6	6.9	18.8	16.8	19.0	2.0	1.2
1350035	65.9	39.9	19.1	63.9	11.4	0.9	1.3
1350080	84.1	22.9	15.8	132.6	8.9	1.2	1.4
1350120	31.0	156.5	12.0	115.3	7.1	2.3	1.3
1350140	42.1	24.9	13.6	66.3	8.6	2.3	1.2
1360640	22.8	12.1	13.1	114.0	6.9	1.0	1.5
1362342	5.0	0.0	3.3	0.0	27.4	11.8	1.1
1362497	43.1	57.7	15.2	69.2	12.2	0.5	1.3
1363382	44.5	0.2	7.2	1.6	23.8	3.8	1.1
1365000	100.0	5.2	20.9	11.7	18.2	2.1	1.4
1365500	55.5	28.0	10.5	83.9	9.7	4.6	1.6
1374559	28.7	132.2	9.6	274.2	8.4	0.3	1.1
1374598	9.3	26.8	6.1	37.3	7.4	1.2	1.3
1374890	44.4	209.3	16.4	396.9	7.4	0.8	1.9
1413088	35.2	4.8	10.1	42.5	16.4	0.2	1.2
1414000	90.1	16.5	20.4	28.6	15.0	1.2	1.2
1414500	64.2	2.9	18.2	14.5	15.8	2.1	1.3

Nom/Numéro de la station	Caractéristiques des bassins						
	Aire (km ²)	Lac (ha)	Longueur du cours d'eau (km)	Milieu humide (ha)	Pente du bassin-versant (%)	Pente (85-10) du cours d'eau (%)	Sinuosité
1415000	85.7	41.4	17.9	66.8	13.3	0.9	1.3
1421610	40.6	40.0	14.4	79.8	8.8	1.3	1.2
1421618	37.4	8.0	9.3	10.4	12.8	1.8	1.2
1434017	59.0	1.1	20.2	5.5	15.0	1.7	1.2
1434025	9.6	0.0	5.2	0.0	17.2	4.6	1.1
1434498	87.2	18.5	22.9	13.4	14.7	1.4	1.2
1521500	78.6	12.0	21.1	49.4	7.3	1.1	1.4
4233286	70.6	15.1	16.6	149.0	7.5	1.2	1.4
4237962	88.8	18.2	22.9	174.7	8.2	1.5	1.8
1135150	8.4	1.0	4.9	1.3	9.0	4.5	1.2
1139800	22.9	8.3	8.7	9.3	15.5	3.0	1.7
1142500	79.2	12.5	22.1	109.0	12.0	1.1	1.5
4288225	12.1	1.0	5.0	2.5	26.0	9.5	1.2
4288230	9.8	0.0	3.6	0.0	20.9	10.0	1.1
4294300	91.8	593.1	18.8	617.5	4.9	0.8	1.7

Tableau B.2 – Répartition des classes hydrologiques des sols par rapport à la superficie totale des bassins-versants (%)

Nom/Numéro de la station	Répartition des classes hydrologiques des sols (%)					
	A	AB	B	BC	C	CD
30426	4.15	0.00	7.23	0.08	16.57	0.00
50813	0.00	0.00	1.71	0.00	0.03	0.00
51002	0.00	0.00	3.60	0.00	0.00	0.00
51003	0.00	0.00	8.24	0.00	0.00	0.00
51004	0.00	0.00	1.06	0.00	0.00	0.00
120201	0.00	0.04	5.57	7.05	9.45	0.00
50812	16.81	0.52	23.54	30.89	5.87	2.48
30425	6.55	0.68	1.49	2.41	16.50	35.20
30423	1.96	11.67	22.15	5.24	44.10	0.00
40212	0.00	1.55	33.35	0.40	1.78	0.00
40409	1.04	10.97	40.87	2.13	3.83	0.00
30422	0.00	0.00	4.96	0.00	6.34	0.00
Fourchette Amont	0.72	0.00	1.37	0.20	1.00	0.00
Fourchette Aval	0.84	0.00	0.00	0.94	0.31	0.00
02AB020	0.00	0.00	59.75	0.00	0.00	0.00
02BA005	0.00	0.00	0.00	0.00	10.43	0.00
02BF004	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	42.36
02BF005	0.00	0.00	0.00	9.10	0.00	0.00
02BF006	0.00	0.00	0.00	6.93	0.00	0.00
02BF007	0.00	0.00	0.00	4.47	0.00	0.00
02BF008	0.00	0.00	0.00	3.16	0.00	0.00
02BF009	0.00	0.00	0.00	1.89	0.00	0.00
02BF012	0.00	0.00	0.00	0.75	0.00	0.00
02BF013	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.00
02CF013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	21.51
02DB007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	57.32
02DD013	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.21
02EC010	9.36	0.00	0.00	1.22	4.14	21.55
02ED017	15.23	0.00	0.00	0.00	29.20	3.86
02ED100	28.79	0.00	0.00	1.01	10.91	23.39
02FC017	23.69	0.00	0.00	0.00	7.89	0.51
02FD002	31.55	0.00	0.00	0.77	0.00	18.12
02FE014	27.93	0.00	0.00	0.06	31.14	10.11
02GA030	19.05	0.00	0.00	0.80	0.84	10.62
02GA031	9.20	0.00	0.00	0.00	18.04	4.41
02GA041	2.98	0.04	0.00	0.00	41.58	1.73
02GA044	1.64	0.00	0.00	0.07	0.00	0.27

Nom/Numéro de la station	Répartition des classes hydrologiques des sols (%)					
	A	AB	B	BC	C	CD
02GA045	4.19	0.00	0.00	0.14	0.00	0.07
02GA046	1.83	0.00	0.00	0.04	0.00	0.24
02GD019	0.89	0.00	0.00	1.10	23.14	15.68
02GD026	5.41	0.00	0.00	3.23	36.19	7.96
02HB012	29.98	0.00	0.00	0.11	1.29	24.46
02HB020	24.24	0.00	0.00	0.31	5.31	0.00
02HC019	25.63	0.38	0.00	5.86	16.37	31.72
02HC023	8.58	0.00	0.00	1.80	2.20	40.19
02HC028	12.96	0.00	0.00	0.91	9.56	35.12
02HC038	18.93	0.87	0.00	1.28	6.02	30.83
02HD003	28.69	0.10	0.00	15.43	7.01	7.58
02HD004	24.26	0.31	0.00	12.98	4.57	0.67
02HD010	27.60	0.00	0.00	5.18	20.26	0.70
02HD018	5.48	0.00	0.00	0.00	6.17	0.00
02HH003	17.36	0.00	0.00	0.38	4.29	0.08
02HJ005	5.32	0.00	0.00	2.37	3.19	0.33
02HK008	12.10	0.00	27.44	0.00	6.60	12.57
02HK009	39.17	0.00	0.00	4.70	21.39	0.69
02HK011	17.97	0.00	0.00	0.18	4.91	0.79
02MC028	7.72	0.00	0.00	1.95	43.40	2.18
1021470	7.51	2.10	0.00	0.31	2.26	4.20
1022294	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.19
1037380	1.13	0.31	0.05	0.36	7.68	23.31
1063310	2.91	0.11	0.00	0.00	0.29	0.00
1073000	4.47	5.27	7.02	0.03	2.14	4.42
1109070	0.21	1.21	2.05	0.81	3.73	11.62
1162500	7.48	3.36	12.61	1.88	9.23	7.30
1169900	3.52	0.01	19.85	5.73	4.48	22.58
1174565	4.74	0.14	10.41	1.93	8.57	4.38
1175670	2.11	0.21	5.97	0.37	7.49	3.19
1349700	0.29	0.01	1.03	0.01	35.54	45.60
1349711	0.01	0.00	1.88	0.00	3.49	7.34
1349810	0.65	0.01	7.31	0.03	27.24	31.48
1350035	6.71	0.22	2.66	0.05	12.85	38.01
1350080	32.01	0.00	1.33	0.00	2.61	40.26
1350120	8.52	0.00	0.34	0.00	5.44	12.54
1350140	11.31	0.00	0.40	0.00	7.67	19.50
1360640	1.44	0.84	0.05	0.28	2.61	14.56
1362342	0.00	0.00	3.54	0.00	0.00	1.43
1362497	2.81	0.04	1.44	0.43	21.14	14.94

Nom/Numéro de la station	Répartition des classes hydrologiques des sols (%)					
	A	AB	B	BC	C	CD
1363382	0.87	0.00	0.58	0.32	15.98	26.54
1365000	0.80	0.00	2.76	0.62	46.95	48.00
1365500	2.42	0.06	8.25	0.51	11.65	28.64
1374559	0.02	0.00	6.90	7.99	4.86	2.36
1374598	0.00	0.01	4.26	2.38	0.36	0.42
1374890	0.63	1.24	20.06	2.06	6.05	2.28
1413088	1.36	0.18	6.50	0.22	6.57	18.99
1414000	0.65	0.79	12.91	0.09	21.02	49.89
1414500	0.83	0.35	3.38	0.22	20.12	38.03
1415000	0.93	1.51	7.93	0.13	24.99	45.91
1421610	6.04	1.21	0.90	0.15	7.49	19.34
1421618	0.15	0.33	2.74	0.05	8.80	23.87
1434017	0.62	0.00	0.34	2.27	30.05	25.27
1434025	0.00	0.00	0.00	0.06	2.39	7.17
1434498	1.04	0.00	0.58	1.91	40.65	42.16
1521500	4.42	0.49	3.02	3.37	7.66	57.92
4233286	5.36	1.26	0.79	2.36	20.43	36.58
4237962	7.62	0.82	15.42	16.08	24.07	17.87
1135150	0.00	0.06	0.16	0.00	3.35	4.77
1139800	5.21	0.07	2.81	0.02	0.24	14.35
1142500	6.90	1.29	8.08	0.87	16.84	39.22
4288225	0.51	0.12	0.00	0.00	3.01	8.41
4288230	1.18	0.00	0.00	0.00	3.33	5.30
4294300	3.87	1.20	0.00	1.40	25.44	44.87

Annexe C. Occupation du territoire

Tableau C.1 – Répartition de l'occupation du territoire par rapport à la superficie totale des bassins-versants (%)

Nom/Numéro de la station	Répartition de l'occupation du territoire (%)					
	Boisé	Culture	Lac	MH	Pâturage	Urbain
30426	7.09	81.24	0.01	1.51	10.14	0.00
50813	81.95	0.00	17.70	0.35	0.00	0.00
51002	99.64	0.00	0.00	0.36	0.00	0.00
51003	98.55	0.00	0.00	1.45	0.00	0.00
51004	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
120201	36.56	39.04	0.12	8.10	16.17	0.00
50812	55.05	9.08	0.18	15.80	19.05	0.84
30425	33.77	17.87	0.20	6.20	38.04	3.92
30423	34.62	45.31	0.14	9.21	10.21	0.51
40212	93.45	0.00	4.47	2.07	0.00	0.00
40409	89.20	0.11	2.88	3.89	3.60	0.32
30422	2.20	72.46	0.08	0.76	24.50	0.00
Fourchette Amont	7.07	36.96	0.05	0.23	55.69	0.00
Fourchette Aval	33.83	13.67	0.18	9.10	42.99	0.23
02AB020	76.92	1.00	1.16	16.79	0.51	3.62
02BA005	91.37	0.00	3.18	2.39	3.05	0.01
02BF004	76.63	0.08	1.69	6.83	12.42	2.36
02BF005	87.68	0.00	11.02	1.30	0.00	0.00
02BF006	85.32	0.00	13.85	0.83	0.00	0.00
02BF007	87.58	0.00	11.07	1.35	0.00	0.00
02BF008	89.40	0.00	8.82	1.77	0.00	0.00
02BF009	91.63	0.00	5.68	2.70	0.00	0.00
02BF012	83.84	0.00	13.08	3.08	0.00	0.00
02BF013	91.22	0.00	8.78	0.00	0.00	0.00
02CF013	75.12	0.00	14.99	4.17	2.01	3.70
02DB007	81.62	0.00	1.28	10.11	0.96	6.03
02DD013	74.00	0.00	1.97	16.31	7.72	0.00
02EC010	20.21	25.21	0.47	5.69	42.63	5.80
02ED017	37.43	16.61	0.10	12.59	30.59	2.68
02ED100	20.99	27.93	0.33	4.70	36.12	9.94
02FC017	12.76	21.69	0.16	30.17	32.74	2.48
02FD002	10.54	32.45	0.19	20.52	33.63	2.66
02FE014	12.90	68.79	0.05	5.64	8.83	3.78
02GA030	13.14	56.32	0.05	3.45	15.88	11.16

Nom/Numéro de la station	Répartition de l'occupation du territoire (%)					
	Boisé	Culture	Lac	MH	Pâturage	Urbain
02GA031	34.37	11.74	0.14	17.32	34.21	2.21
02GA041	3.52	29.19	0.06	28.22	36.96	2.05
02GA044	14.15	66.59	0.00	8.82	10.45	0.00
02GA045	11.85	70.57	0.19	7.64	9.75	0.00
02GA046	7.27	83.10	0.37	1.55	7.71	0.00
02GD019	9.53	62.72	0.04	2.12	21.28	4.32
02GD026	9.83	66.22	0.35	2.28	16.90	4.43
02HB012	18.61	26.41	0.18	15.50	24.85	14.44
02HB020	17.85	31.49	0.21	12.21	33.07	5.17
02HC019	36.61	16.20	0.51	5.41	35.68	5.61
02HC023	19.17	19.77	1.38	5.02	48.73	5.93
02HC028	8.81	38.78	1.20	5.75	28.44	17.02
02HC038	22.07	32.33	0.91	6.34	34.55	3.81
02HD003	51.61	11.82	0.13	7.35	25.68	3.41
02HD004	59.89	11.49	0.04	7.57	18.84	2.17
02HD010	43.60	23.12	0.22	8.50	20.13	4.43
02HD018	21.22	33.41	0.46	15.80	24.64	4.47
02HH003	46.18	8.33	0.22	11.90	31.27	2.11
02HJ005	42.87	36.16	0.27	2.96	17.74	0.00
02HK008	49.14	5.27	0.70	28.79	14.16	1.94
02HK009	45.48	11.46	0.02	14.39	26.17	2.49
02HK011	45.21	13.23	1.10	25.28	15.19	0.00
02MC028	34.66	13.16	0.16	35.00	14.94	2.08
1021470	61.85	37.67	0.48	0.00	0.00	0.00
1022294	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1037380	79.33	0.92	3.82	7.96	4.79	3.18
1063310	82.15	0.00	0.00	17.85	0.00	0.00
1073000	71.02	0.59	2.18	10.96	2.92	12.34
1109070	64.32	1.30	2.06	13.12	1.93	17.27
1162500	80.00	0.44	2.22	11.89	1.32	4.13
1169900	83.25	2.29	0.34	2.71	5.29	6.11
1174565	91.50	0.09	0.43	3.24	0.31	4.44
1175670	73.68	1.71	2.77	8.38	7.54	5.91
1349700	88.63	0.75	0.65	0.73	0.77	8.46
1349711	99.90	0.00	0.00	0.01	0.00	0.10
1349810	94.55	0.65	0.10	0.24	0.59	3.87
1350035	70.05	10.41	0.61	0.97	11.32	6.64
1350080	76.54	11.57	0.27	1.58	2.52	7.53
1350120	75.18	7.60	5.05	3.72	3.73	4.72
1350140	83.67	4.62	0.59	1.57	4.05	5.49

Nom/Numéro de la station	Répartition de l'occupation du territoire (%)					
	Boisé	Culture	Lac	MH	Pâturage	Urbain
1360640	73.24	6.79	0.53	5.00	6.76	7.67
1362342	99.95	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04
1362497	93.34	0.91	1.34	1.61	0.56	2.25
1363382	98.67	0.76	0.00	0.04	0.06	0.46
1365000	98.34	0.35	0.05	0.12	0.55	0.61
1365500	85.83	2.44	0.51	1.52	5.02	4.70
1374559	76.04	0.77	4.59	9.55	0.32	8.72
1374598	76.24	2.98	2.87	3.99	0.38	13.53
1374890	70.86	2.25	4.76	9.01	0.35	12.77
1413088	90.11	3.05	0.14	1.21	2.96	2.53
1414000	83.33	6.21	0.18	0.32	5.19	4.78
1414500	93.98	1.94	0.05	0.23	2.10	1.71
1415000	81.10	5.91	0.48	0.78	7.98	3.75
1421610	57.58	12.25	0.98	1.96	16.69	10.53
1421618	66.87	11.02	0.22	0.28	18.18	3.43
1434017	99.01	0.02	0.02	0.09	0.32	0.53
1434025	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1434498	98.80	0.19	0.21	0.15	0.24	0.40
1521500	82.85	8.51	0.15	0.63	6.68	1.18
4233286	69.69	12.38	0.21	2.11	12.65	2.96
4237962	53.45	29.63	0.21	1.97	9.27	5.49
1135150	83.14	2.12	0.12	0.16	14.46	0.00
1139800	95.09	0.00	0.36	0.41	4.14	0.00
1142500	75.16	1.66	0.16	1.38	15.62	6.03
4288225	83.70	0.00	0.08	0.21	16.00	0.00
4288230	0.00	99.61	0.00	0.00	0.39	0.00
4294300	49.43	10.57	6.46	6.72	23.59	3.23

Annexe D. Caractéristiques des séries disponibles

Tableau D.1 - Caractéristiques des séries disponibles aux 101 stations hydrométriques retenues et p-value du test de tendance (Mann-Kendall).

Nom/Numéro Station	Année de début et de fin d'opération		Nombre années opération	Nombre d'années selon le pourcentage de données disponibles pendant la période du 1er juin au 31 octobre					Mann-Kendall (p-value)
	Début	Fin		100%	]90%, 100%[	]80%, 90%]	[0%, 80%[	> 80%	
30426	2001	2015	15	3	10	0	2	13	0.13
50813	1997	2015	19	12	5	1	1	18	0.08
51002	1995	2015	21	7	11	0	3	18	0.88
51003	1995	2015	21	8	10	0	3	18	0.82
51004	1995	2015	21	7	7	1	6	15	0.84
120201	1997	2015	19	8	4	3	4	15	0.11
50812	1997	2015	19	9	3	2	5	14	0.58
30425	2001	2016	16	3	8	1	4	12	1.00
30423	1999	2016	18	6	7	0	5	13	0.76
40212	1997	2015	19	2	7	7	3	16	0.59
40409	1997	2016	20	9	7	1	3	17	0.77
30422	2001	2013	13	11	0	0	2	11	1.00
Fourchette Amont	2002	2015	14	11	1	1	1	13	0.13
Fourchette Aval	2002	2015	14	12	0	1	1	13	0.10
02AB020	1986	2016	31	22	6	1	2	29	0.32
02BA005	1989	2016	28	19	7	1	1	27	0.32
02BF004	1979	2016	38	27	3	1	7	31	0.43
02BF005	1981	2015	35	23	6	3	3	32	0.29
02BF006	1981	2015	35	31	1	2	1	34	0.20
02BF007	1981	2015	35	26	2	1	6	29	0.96
02BF008	1980	2015	36	28	5	0	3	33	0.65
02BF009	1981	2015	35	23	8	0	4	31	0.84

Nom/Numéro Station	Année de début et de fin d'opération		Nombre années opération	Nombre d'années selon le pourcentage de données disponibles pendant la période du 1er juin au 31 octobre					Mann-Kendall (p-value)
	Début	Fin		100%	]90%, 100%[	]80%, 90%]	[0%, 80%[	> 80%	
02BF012	1983	2015	33	24	3	1	5	28	0.74
02BF013	1989	2015	27	23	3	0	1	26	0.86
02CF013	1981	2016	36	18	10	3	5	31	0.06
02DB007	1980	2016	37	18	6	2	11	26	0.19
02DD013	1974	2016	43	36	2	2	3	40	0.35
02EC010	1969	2016	48	31	6	2	9	39	0.13
02ED017	1988	2016	29	19	8	1	1	28	0.10
02ED100	1997	2016	20	16	3	0	1	19	0.73
02FC017	2006	2016	11	8	2	0	1	10	0.47
02FD002	2005	2016	12	10	1	0	1	11	0.88
02FE014	2002	2016	15	13	1	0	1	14	0.08
02GA030	1969	2016	48	28	12	2	6	42	0.64
02GA031	1969	2016	48	37	9	0	2	46	0.60
02GA041	2006	2016	11	10	0	0	1	10	0.21
02GA044	1998	2015	18	16	0	0	2	16	0.82
02GA045	1998	2015	18	10	2	0	6	12	0.54
02GA046	1998	2015	18	15	1	0	2	16	0.30
02GD019	2006	2016	11	8	2	0	1	10	0.21
02GD026	2006	2016	11	8	2	0	1	10	0.37
02HB012	1970	2016	47	33	10	2	2	45	0.06
02HB020	1983	2016	34	22	9	0	3	31	0.63
02HC019	1969	2016	48	36	6	1	5	43	0.20
02HC023	2005	2016	12	10	1	0	1	11	0.76
02HC028	1969	2016	48	35	11	0	2	46	0.13
02HC038	2006	2016	11	9	1	0	1	10	0.59
02HD003	1969	2016	48	31	9	3	5	43	0.59
02HD004	2003	2016	14	7	6	0	1	13	0.36
02HD010	1969	2016	48	27	15	3	3	45	0.46
02HD018	2002	2015	14	12	0	0	2	12	1.00

Nom/Numéro Station	Année de début et de fin d'opération		Nombre années opération	Nombre d'années selon le pourcentage de données disponibles pendant la période du 1er juin au 31 octobre					Mann-Kendall (p-value)
	Début	Fin		100%	]90%, 100%[	]80%, 90%]	[0%, 80%[	> 80%	
02HH003	2004	2015	12	11	0	0	1	11	1.00
02HJ005	2002	2015	14	8	3	0	3	11	0.44
02HK008	2002	2016	15	11	2	0	2	13	0.95
02HK009	1983	2016	34	22	5	0	7	27	0.24
02HK011	1992	2016	25	21	2	0	2	23	0.34
02MC028	2006	2016	11	6	4	0	1	10	0.28
1021470	2000	2015	16	8	6	1	1	15	0.49
1022294	1995	2016	22	0	9	8	5	17	0.34
1037380	1998	2016	19	3	10	5	1	18	0.23
1063310	1995	2015	21	12	7	0	2	19	0.92
1073000	1990	2016	27	11	7	1	8	19	0.21
1109070	1988	2016	29	16	5	2	6	23	0.10
1162500	1988	2016	29	18	6	2	3	26	0.86
1169900	1990	2016	27	15	3	2	7	20	0.35
1174565	1995	2016	22	15	4	0	3	19	0.11
1175670	1990	2016	27	14	6	4	3	24	0.80
1349700	1996	2016	21	14	5	1	1	20	0.67
1349711	1997	2016	20	11	8	0	1	19	0.44
1349810	1997	2016	20	12	7	0	1	19	0.28
1350035	1998	2016	19	12	3	2	2	17	0.54
1350080	1990	2016	27	9	14	2	2	25	0.36
1350120	1990	2016	27	11	10	2	4	23	0.27
1350140	1996	2016	21	11	6	3	1	20	0.10
1360640	1990	2016	27	11	10	1	5	22	0.19
1362342	1997	2016	20	11	6	1	2	18	0.82
1362497	1997	2016	20	12	6	1	1	19	0.83
1363382	2000	2016	17	8	6	2	1	16	0.39
1365000	1992	2016	25	13	7	1	4	21	0.32
1365500	1999	2016	18	7	8	1	2	16	0.50

Nom/Numéro Station	Année de début et de fin d'opération		Nombre années opération	Nombre d'années selon le pourcentage de données disponibles pendant la période du 1er juin au 31 octobre					Mann-Kendall (p-value)
	Début	Fin		100%	]90%, 100%[	]80%, 90%]	[0%, 80%[	> 80%	
1374559	1995	2016	22	10	10	1	1	21	0.65
1374598	1996	2016	21	8	9	3	1	20	1.00
1374890	1995	2016	22	10	11	0	1	21	0.38
1413088	2000	2016	17	10	6	1	0	17	0.71
1414000	1996	2016	21	12	6	2	1	20	0.16
1414500	1990	2016	27	8	10	5	4	23	0.13
1415000	1990	2016	27	10	10	3	4	23	0.23
1421610	2000	2016	17	12	4	0	1	16	0.59
1421618	1997	2016	20	11	8	0	1	19	0.58
1434017	1991	2016	26	10	11	2	3	23	0.34
1434025	1991	2016	26	10	11	2	3	23	0.58
1434498	1991	2016	26	13	10	2	1	25	0.28
1521500	1996	2016	21	10	6	1	4	17	0.51
4233286	2002	2016	15	7	5	2	1	14	0.58
4237962	2001	2016	16	5	7	1	3	13	0.85
1135150	1991	2015	25	2	18	0	5	20	0.09
1139800	1998	2015	18	4	12	0	2	16	0.19
1142500	1990	2016	27	7	5	2	13	14	0.66
4288225	2000	2015	16	6	8	0	2	14	0.83
4288230	2000	2015	16	2	10	2	2	14	1.00
4294300	2001	2016	16	8	6	1	1	15	0.15

Annexe E. Quantiles de débit

Tableau E.1 - Distributions sélectionnées, valeurs des paramètres et débits maximum annuel de périodes de retour 2, 5, 10 et 25 ans estimés.

Numéro station hydrométrique	Nombre années valides	Distribution retenue	Valeurs des paramètres			Débit maximum annuel (m ³ /sec) pour diverses périodes de retour			
			Position (mm)	Échelle (mm)	Forme ¹	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans
30426	13	Gumbel	6.80	3.94		8.24	12.71	15.66	19.39
50813	18	Log-Normale	-1.24	0.69		0.29	0.51	0.70	0.96
51002	18	Log-Normale	0.02	0.53		1.02	1.59	2.01	2.58
51003	18	GEV	2.44	1.16	-0.38	2.90	4.78	6.55	9.64
51004	15	Log-Normale	-0.33	0.60		0.72	1.19	1.55	2.05
120201	15	Log-Normale	1.90	0.56		6.67	10.67	13.63	17.70
50812	14	Log-Normale	2.90	0.57		18.18	29.39	37.78	49.38
30425	12	Log-Normale	2.59	0.60		13.27	21.91	28.49	37.68
30423	13	Gumbel	13.20	8.58		16.35	26.07	32.50	40.63
40212	16	Log-Normale	2.37	0.65		10.73	18.46	24.52	33.19
40409	17	Log-Normale	1.95	0.77		7.00	13.35	18.70	26.79
30422	11	GEV	4.46	1.77	0.43	5.06	6.42	7.02	7.54
Fourchette Amont	13	GEV	1.01	0.39	-0.59	1.18	1.97	2.87	4.77
Fourchette Aval	13	Log-Normale	0.13	0.87		1.14	2.37	3.47	5.23
02AB020	29	Log-Normale	1.86	0.89		6.45	13.60	20.08	30.42
02BA005	27	Gumbel	1.96	1.64		2.56	4.41	5.64	7.19
02BF004	31	Log-Normale	1.63	1.01		5.10	11.90	18.54	29.73
02BF005	32	Log-Normale	0.09	0.69		1.09	1.95	2.64	3.65
02BF006	34	Log-Normale	-0.43	0.71		0.65	1.19	1.62	2.27

Numéro station hydrométrique	Nombre années valides	Distribution retenue	Valeurs des paramètres			Débit maximum annuel (m ³ /sec) pour diverses périodes de retour			
			Position (mm)	Échelle (mm)	Forme ¹	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans
02BF007	29	Log-Normale	-0.63	0.76		0.53	1.01	1.42	2.03
02BF008	33	GEV	0.44	0.40	-0.24	0.59	1.15	1.62	2.34
02BF009	31	Log-Normale	-0.35	0.91		0.70	1.52	2.27	3.48
02BF012	28	Log-Normale	-1.27	1.19		0.28	0.76	1.29	2.25
02BF013	26	Log-Normale	-2.17	0.89		0.11	0.24	0.36	0.54
02CF013	31	Log-Normale	0.72	0.67		2.06	3.61	4.84	6.62
02DB007	26	Log-Normale	2.06	0.62		7.81	13.18	17.33	23.20
02DD013	40	Log-Normale	1.50	0.66		4.50	7.85	10.50	14.33
02EC010	39	Log-Normale	0.25	0.97		1.28	2.91	4.47	7.05
02ED017	28	GEV	1.87	1.13	-0.43	2.32	4.24	6.14	9.61
02ED100	19	Log-Normale	1.10	1.05		3.00	7.26	11.52	18.86
02FC017	10	Gumbel	2.27	1.17		2.69	4.01	4.89	5.99
02FD002	11	Log-Normale	1.25	0.85		3.48	7.12	10.34	15.39
02FE014	14	Log-Normale	1.93	0.85		6.88	14.12	20.56	30.70
02GA030	42	Log-Normale	0.74	1.10		2.10	5.29	8.56	14.31
02GA031	46	GEV	0.98	0.35	-0.39	1.12	1.70	2.26	3.24
02GA041	10	Log-Normale	1.90	1.30		6.69	19.94	35.30	64.91
02GA044	16	GEV	0.20	0.15	-0.68	0.26	0.58	0.98	1.88
02GA045	12	Gumbel	0.52	0.25		0.61	0.89	1.08	1.31
02GA046	16	Log-Normale	-1.53	0.87		0.22	0.45	0.66	0.99
02GD019	10	Log-Normale	1.98	0.78		7.25	13.95	19.63	28.27
02GD026	10	Log-Normale	1.85	0.78		6.36	12.21	17.18	24.72
02HB012	45	Log-Normale	1.75	0.74		5.75	10.68	14.76	20.84
02HB020	31	Log-Normale	0.58	0.55		1.78	2.83	3.60	4.65

Numéro station hydrométrique	Nombre années valides	Distribution retenue	Valeurs des paramètres			Débit maximum annuel (m ³ /sec) pour diverses périodes de retour			
			Position (mm)	Échelle (mm)	Forme ¹	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans
02HC019	43	Log-Normale	2.12	0.86		8.37	17.20	25.06	37.45
02HC023	11	Log-Normale	1.53	0.64		4.62	7.90	10.45	14.09
02HC028	46	Log-Normale	1.80	0.93		6.03	13.16	19.78	30.56
02HC038	10	Log-Normale	1.67	0.76		5.34	10.09	14.09	20.09
02HD003	43	Gumbel	5.53	2.42		6.42	9.16	10.97	13.26
02HD004	13	Log-Normale	1.36	0.74		3.89	7.26	10.06	14.25
02HD010	45	Log-Normale	1.68	0.70		5.34	9.66	13.17	18.33
02HD018	12	Log-Normale	1.05	0.66		2.86	5.00	6.70	9.16
02HH003	11	Log-Normale	0.73	0.48		2.07	3.09	3.81	4.77
02HJ005	11	Gumbel	0.68	0.25		0.77	1.05	1.23	1.47
02HK008	13	GEV	2.06	0.72	-0.51	2.34	3.67	5.08	7.83
02HK009	27	Log-Normale	1.11	0.51		3.03	4.64	5.80	7.36
02HK011	23	Log-Normale	0.91	0.91		2.49	5.35	7.98	12.23
02MC028	10	GEV	2.08	1.03	-0.56	2.50	4.49	6.69	11.18
1021470	15	Log-Normale	0.65	0.80		1.92	3.76	5.34	7.76
1022294	17	Log-Normale	-3.04	1.58		0.05	0.18	0.36	0.76
1037380	18	Log-Normale	1.84	1.00		6.28	14.56	22.60	36.10
1063310	19	Log-Normale	-0.83	1.10		0.44	1.11	1.80	3.01
1073000	19	Log-Normale	1.58	0.88		4.84	10.12	14.90	22.49
1109070	23	Log-Normale	1.33	1.04		3.78	9.08	14.35	23.37
1162500	26	Gumbel	3.77	2.99		4.86	8.25	10.49	13.32
1169900	20	Log-Normale	3.38	1.06		29.45	71.84	114.50	188.22
1174565	19	Log-Normale	2.01	1.35		7.50	23.44	42.53	80.28
1175670	24	Log-Normale	0.72	0.98		2.06	4.71	7.24	11.47

Numéro station hydrométrique	Nombre années valides	Distribution retenue	Valeurs des paramètres			Débit maximum annuel (m ³ /sec) pour diverses périodes de retour			
			Position (mm)	Échelle (mm)	Forme ¹	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans
1349700	20	Log-Normale	3.74	1.15		42.20	111.32	184.82	317.38
1349711	19	Log-Normale	2.32	1.11		10.22	26.05	42.48	71.56
1349810	19	Log-Normale	3.85	1.08		46.77	116.48	187.68	312.11
1350035	17	Log-Normale	3.02	1.04		20.57	49.50	78.34	127.81
1350080	25	Log-Normale	2.45	1.57		11.54	43.22	86.21	180.03
1350120	23	Log-Normale	0.95	1.25		2.59	7.43	12.91	23.25
1350140	20	Log-Normale	2.48	1.25		11.89	34.02	58.93	105.89
1360640	22	Log-Normale	1.71	1.10		5.52	13.90	22.53	37.69
1362342	18	Log-Normale	0.83	0.90		2.30	4.89	7.26	11.06
1362497	19	Gumbel	23.68	15.64		29.41	47.14	58.87	73.69
1363382	16	GEV	24.40	13.99	-0.51	30.04	56.00	83.64	137.85
1365000	21	Gumbel	48.55	46.48		65.59	118.27	153.15	197.23
1365500	16	Log-Normale	3.34	0.71		28.11	51.13	69.91	97.58
1374559	21	Log-Normale	1.44	0.98		4.21	9.63	14.83	23.51
1374598	20	Log-Normale	0.72	1.07		2.05	5.07	8.13	13.45
1374890	21	Log-Normale	1.67	0.83		5.29	10.63	15.29	22.55
1413088	17	Log-Normale	1.64	0.90		5.15	10.97	16.29	24.84
1414000	20	Log-Normale	3.27	1.02		26.39	62.09	97.10	156.44
1414500	23	Log-Normale	2.80	0.95		16.44	36.51	55.40	86.43
1415000	23	Log-Normale	3.04	1.10		20.84	52.80	85.82	144.08
1421610	16	Log-Normale	1.97	0.96		7.14	15.99	24.37	38.20
1421618	19	Log-Normale	3.17	0.96		23.72	53.08	80.87	126.69
1434017	23	Gumbel	46.39	42.56		61.99	110.23	142.17	182.53
1434025	23	Gumbel	4.52	2.91		5.59	8.89	11.08	13.84

Numéro station hydrométrique	Nombre années valides	Distribution retenue	Valeurs des paramètres			Débit maximum annuel (m ³ /sec) pour diverses périodes de retour			
			Position (mm)	Échelle (mm)	Forme ¹	2 ans	5 ans	10 ans	25 ans
1434498	25	Log-Normale	4.12	1.19		61.35	167.16	282.27	493.51
1521500	17	Log-Normale	2.77	0.29		15.94	20.33	23.08	26.42
4233286	14	Log-Normale	2.90	1.27		18.17	52.84	92.32	167.40
4237962	13	Gumbel	10.83	5.05		12.68	18.40	22.19	26.98
1135150	20	Log-Normale	1.30	0.60		3.66	6.07	7.91	10.48
1139800	16	Log-Normale	2.07	0.69		7.94	14.21	19.26	26.63
1142500	14	Log-Normale	2.68	0.91		14.57	31.21	46.47	71.07
4288225	14	GEV	8.89	2.08	-0.63	9.74	14.08	19.23	30.42
4288230	14	GEV	6.46	2.79	-0.45	7.57	12.45	17.37	26.53
4294300	15	Log-Normale	3.10	0.69		22.13	39.61	53.71	74.30

1. Des distributions considérées seules la distribution GEV contient un paramètre de forme.

Annexe F. Association entre stations hydrométriques et stations météorologiques et données de précipitation disponibles.

Tableau F.1 - Association entre les stations hydrométriques et les stations météorologiques les plus près (O : signifie que ces durées sont disponibles pour les courbes IDF aux stations météorologiques).

Numéro/Nom station hydrométrique	Numéro station météo	Coordonnées		Distance Station hydro/Station météo (km)	Durées disponibles									
		Lat.	Long.		Minutes				Heures					
					5	10	15	30	1	2	6	12	24	
30426	433914	44.93	-73.05	22.0						O	O			
50813	7012240	46.87	-71.65	11.5			O	O	O	O	O	O	O	O
51002	7042388	47.32	-71.15	5.2	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
51003	7042388	47.32	-71.15	5.2	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
51004	7042388	47.32	-71.15	3.1	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
120201	7042557	47.01	-70.86	5.0									O	O
50812	7016900	46.73	-71.50	14.9	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
30425	433914	44.93	-73.05	10.2					O	O				
30423	433914	44.93	-73.05	29.5					O	O				
40212	7017100	46.32	-74.20	24.3	O	O	O	O					O	O
40409	7031375	45.90	-75.08	5.1	O	O	O	O	O	O	O			O
30422	433914	44.93	-73.05	21.9					O	O				
Fourchette Amont	7057518	46.55	-70.82	21.6										
Fourchette Aval				22.0		O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
02AB020	6048261	48.37	-89.33	12.6	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
02BA005	6047810	48.62	-87.00	48.6								O	O	O
02BF004	6057592	46.48	-84.51	5.0	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
02BF005	6057592	46.48	-84.51	64.4	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

Numéro/Nom station hydrométrique	Numéro station météo	Coordonnées		Distance Station hydro/Station météo (km)	Durées disponibles																
		Lat.	Long.		Minutes				Heures												
					5	10	15	30	1	2	6	12	24								
02BF006	6057592	46.48	-84.51	63.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
02BF007				62.4																	
02BF008				63.6																	
02BF009				64.7																	
02BF012				64.8																	
02BF013				62.3																	
02CF013	6068150	46.63	-80.80	45.4			0	0	0	0	0	0							0		
02DB007				16.8																	
02DD013	6085700	46.36	-79.42	11.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
02EC010	6158443	43.75	-79.48	33.4									0	0	0						
02ED017	6113490	44.85	-79.87	15.4									0	0	0						
02ED100	6110557	44.38	-79.69	37.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
02FC017	6145503	43.98	-80.75	11.9									0	0	0						
02FD002				61.1																	
02FE014	6148105	43.37	-81.00	57.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
02GA030	6149387	43.45	-80.38	16.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
02GA031	6142400	43.73	-80.33	25.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
02GA041	6145503	43.98	-80.75	35.6									0	0	0						
02GA044	6149387	43.45	-80.38	22.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
02GA045				21.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02GA046				21.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02GD019	6148105	43.37	-81.00	8.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
02GD026	6148105	43.37	-81.00	5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
02HB012	6153300	43.28	-79.88	2.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
02HB020	6142400	43.73	-80.33	19.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Numéro/Nom station hydrométrique	Numéro station météo	Coordonnées		Distance Station hydro/Station météo (km)	Durées disponibles									
		Lat.	Long.		Minutes				Heures					
					5	10	15	30	1	2	6	12	24	
02HC019	6153020	43.90	-79.07	1.1		0	0	0	0	0	0			0
02HC023	6158443	43.75	-79.48	24.6								0	0	0
02HC028	6153020	43.90	-79.07	12.0		0	0	0	0	0				0
02HC038	6153020	43.90	-79.07	9.2		0	0	0	0	0				0
02HD003	6150830	43.92	-78.67	21.4	0							0	0	0
02HD004	6150830	43.92	-78.67	21.4	0							0	0	0
02HD010	6151137	44.30	-77.80	37.8								0	0	0
02HD018	6158875	44.12	-77.53	17.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02HH003	6151042	44.03	-78.80	12.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02HJ005	6166418	44.23	-78.37	12.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02HK008	6150689	44.15	-77.39	21.9					0	0	0	0	0	0
02HK009	6151137	44.30	-77.80	14.5								0	0	0
02HK011	6158875	44.12	-77.53	6.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
02MC028	6101901	45.03	-74.80	34.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1021470	173261	45.18	-67.78	42.8		0	0	0	0	0	0	0	0	
1022294	173261	45.18	-67.78	43.9			0	0	0	0	0	0	0	0
1037380	177255	44.10	-69.12	25.9			0					0	0	0
1063310	178641	44.03	-70.98	33.5				0	0	0	0	0		
1073000	272842	44.78	-71.13	27.8								0	0	0
1109070	190840	41.95	-70.95	20.1					0	0	0	0	0	0
1162500	190666	42.63	-72.12	5.5					0	0	0	0	0	0
1169900	190120	42.40	-72.53	20.6					0	0	0	0		
1174565	190120	42.40	-72.53	13.8					0	0	0	0		
1175670	199923	42.27	-71.87	11.4					0	0				
1349700	306839	42.32	-74.43	13.1					0	0	0	0	0	0

Numéro/Nom station hydrométrique	Numéro station météo	Coordonnées		Distance Station hydro/Station météo (km)	Durées disponibles									
		Lat.	Long.		Minutes				Heures					
					5	10	15	30	1	2	6	12	24	
1349711	308406	42.17	-74.15	10.7			0	0		0	0	0	0	0
1349810	306839	42.32	-74.43	10.2						0	0	0	0	0
1350035	306839	42.32	-74.43	2.8						0	0	0	0	0
1350080	306839	42.32	-74.43	6.9						0	0	0	0	0
1350120	306839	42.32	-74.43	10.0						0	0	0	0	0
1350140	306839	42.32	-74.43	12.9						0	0	0	0	0
1360640	300042	42.75	-73.80	27.8						0				
1362342	308406	42.17	-74.15	9.9			0	0		0	0	0	0	0
1362497	308406	42.17	-74.15	19.0			0	0		0	0	0	0	0
1363382	301521	41.92	-74.57	23.3						0	0		0	0
1365000	301521	41.92	-74.57	8.6						0	0		0	0
1365500	301521	41.92	-74.57	8.3						0	0		0	0
1374559	309670	41.27	-73.80	22.9			0	0		0	0	0	0	0
1374598	309670	41.27	-73.80	25.0			0	0		0	0	0	0	0
1374890	309670	41.27	-73.80	16.6			0	0		0	0	0	0	0
1413088	306839	42.32	-74.43	10.7						0	0	0	0	0
1414000	301521	41.92	-74.57	26.3						0	0		0	0
1414500	301521	41.92	-74.57	25.1						0	0		0	0
1415000	301521	41.92	-74.57	30.8						0	0		0	0
1421610	306839	42.32	-74.43	20.3						0	0	0	0	0
1421618	306839	42.32	-74.43	19.5						0	0	0	0	0
1434017	301521	41.92	-74.57	2.4						0	0		0	0
1434025	301521	41.92	-74.57	10.4						0	0		0	0
1434498	301521	41.92	-74.57	0.8						0	0		0	0
1521500	303983	42.35	-77.70	5.2			0	0		0	0	0	0	0

Numéro/Nom station hydrométrique	Numéro station météo	Coordonnées		Distance Station hydro/Station météo (km)	Durées disponibles									
		Lat.	Long.		Minutes				Heures					
					5	10	15	30	1	2	6	12	24	
4233286	304174	42.45	-76.47	9.7						0	0	0	0	0
4237962	308383	43.07	-76.27	20.2						0	0	0	0	0
1135150	435632	44.47	-72.12	1.5						0	0	0	0	0
1139800	431565	44.02	-72.28	9.3			0	0						
1142500	438057	43.80	-72.78	18.0						0	0	0		
4288225	435366	44.57	-72.60	14.4						0	0	0		
4288230	435366	44.57	-72.60	16.1						0	0	0		
4294300	433914	44.93	-73.05	18.7						0	0			

Annexe G. Coefficients de ruissellement proposés dans la littérature

Tableau G.1 - Coefficients de ruissellement en milieu urbain (ASCE et WPCF, 1969)

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

Tableau G.2 - Coefficients de ruissellement associés aux cultures

Types de sol-topographie	Coefficient de ruissellement		Références
Sol sableux et graveleux	0.2		Dunne et Leopold (1978)
Loam	0.4		
Argile lourde	0.5		
Sol mince sur substratum rocheux	0.5		
Loam sableux-plat (0.5%)	0.30		Schwab (1957)
Argile et loam slimoneux-plat (0.5%)	0.50		
Argile compacte-plat (0.5%)	0.60		
Loam sableux-valonnée (5-10%)	0.40		
Argile et loam slimoneux-valonnée (5-10%)	0.60		
Argile compacte-valonnée (5-10%)	0.70		
Loam sableux-montagneux (10-30%)	0.52		
Argile et loam slimoneux-montagneux (10-30%)	0.72		
Argile compacte-montagneux (10-30%)	0.82		Schwab et Frevert (1985)
Classification hydrologique A ¹	0.2	0.6	
Classification hydrologique B ¹	0.4	0.7	
Classification hydrologique C ¹	0.4	0.7	
Classification hydrologique D ¹	0.5	0.8	

¹ Classification hydrologique (USDA, 1986)

Tableau G.3 - Coefficients de ruissellement associés aux prairies et terres en pâturage

Types de sol et topographie	Coefficient de ruissellement	Références
Sol sableux et graveleux	0.15	Dunne et Leopold (1978)
Loam	0.35	
Argile lourde	0.45	
Sol mince sur substratum rocheux	0.45	
Loam sableux-plat (0.5%)	0.10	Schwab (1957)
Argile et loam limoneux-plat (0.5%)	0.30	
Argile compacte-plat (0.5%)	0.40	
Loam sableux-valonnée (5-10%)	0.16	
Argile et loam limoneux-valonnée (5-10%)	0.36	
Argile compacte-valonnée (5-10%)	0.55	
Loam sableux-montagneux (10-30%)	0.22	
Argile et loam limoneux-montagneux (10-30%)	0.42	
Argile compacte-montagneux (10-30%)	0.60	Schwab et Frevert (1985)
Classification hydrologique A ¹ -Prairie	0.30	
Classification hydrologique B ¹ -Prairie	0.35	
Classification hydrologique C ¹ -Prairie	0.40	
Classification hydrologique D ¹ -Prairie	0.45	
Classification hydrologique A ¹ -Pâturage	0.10	
Classification hydrologique B ¹ -Pâturage	0.20	
Classification hydrologique C ¹ -Pâturage	0.25	
Classification hydrologique D ¹ -Pâturage	0.30	

1 Classification hydrologique (USDA. 1986)

Tableau G.4 - Coefficients de ruissellement associés au milieu boisé

Types de sol-topographie	Coefficient de ruissellement	Références
Sol sableux et graveleux	0.1	Dunne et Leopold (1978)
Loam	0.3	
Argile lourde	0.4	
Sol mince sur substratum rocheux	0.4	
Loam sableux-plat (0.5%)	0.10	Schwab (1957)
Argile et loam limoneux-plat (0.5%)	0.30	
Argile compacte-plat (0.5%)	0.40	
Loam sableux-valonnée (5-10%)	0.25	
Argile et loam limoneux-valonnée (5-10%)	0.35	
Argile compacte-valonnée (5-10%)	0.45	
Loam sableux-montagneux (10-30%)	0.30	
Argile et loam limoneux-montagneux (10-30%)	0.50	
Argile compacte-montagneux (10-30%)	0.60	Schwab et Frevert (1985)
Classification hydrologique A ¹	0.06	
Classification hydrologique B	0.13	
Classification hydrologique C	0.16	
Classification hydrologique D	0.20	McDonnel (1990)
Sol compacté et pente abrupte	0.43-0.61	
Forêt mixte avec loam sableux avec faible rétention et pente abrupte	0.33-0.59	Institute of Hydrology (1976) ²
Forêt mixte	0.28-0.68	Law (1956) ²
Classification hydrologique B et pente abrupte	0.52	Mulholland (1990)

1 Classification hydrologique (USDA. 1986)

2 Cité dans Dhakal *et al.* (2012)

Annexe H. Temps de concentration

Tableau H.1 – Estimation des temps de concentration pour les 101 bassins-versants à l'étude considérant les 14 équations empiriques retenues et détaillées au Chapitre 6 ainsi que la Méthode MTQ (EMM : Espey-Morgan-Masch, FM : Folmar et Miller, HS : Haktanir-Sezen, K : Kirpich, M : Mimikou, S : Sheridan, WC : Watt-Chow, Will : Williams, MTQ : MTMDET)

Nom/Numéro Station	Temps de concentration (en heures) selon les différentes équations empiriques retenues														
	EMM	FAA-1	FAA-2	FM	HS	IRDA	K	M	NERC	S-1	S-2	WC	Will	Wu	MTQ
30426	4.4	8.2	4.8	5.6	2.3	15.6	5.5	1.7	8.2	22.8	12.8	7.1	7.8	5.2	5.7
50813	1.1	1.6	0.9	1.9	0.6	3.7	0.6	0.6	2.2	4.8	2.8	0.8	1.2	0.5	1.6
51002	0.9	1.7	1.1	1.9	0.5	4.9	0.5	0.7	2.0	4.8	2.8	0.7	1.0	0.8	1.7
51003	0.8	2.2	1.5	3.0	1.0	7.9	0.8	1.0	2.6	9.6	5.5	1.0	1.9	0.6	2.2
51004	0.4	0.7	0.7	1.2	0.3	2.5	0.2	0.4	1.0	2.5	1.5	0.2	0.4	0.2	0.7
120201	2.5	5.7	3.7	4.7	1.8	14.2	3.0	1.6	5.7	17.9	10.1	3.9	5.0	3.1	5.5
50812	3.6	14.2	6.8	10.9	5.4	30.6	9.6	2.9	11.5	58.8	31.9	12.6	17.1	3.7	14.2
30425	4.3	9.7	3.1	7.9	3.6	25.6	7.8	2.5	10.2	37.7	20.7	10.2	11.8	6.3	11.8
30423	3.3	10.1	7.6	8.5	3.9	30.2	6.9	2.9	9.4	41.2	22.6	9.0	11.5	5.5	8.8
40212	1.4	4.8	2.4	6.3	2.6	18.7	2.7	2.0	5.3	26.9	15.0	3.4	5.8	1.4	4.8
40409	2.5	7.3	2.8	6.6	2.8	24.3	4.4	2.4	7.1	29.1	16.2	5.6	7.5	4.3	7.3
30422	4.0	5.8	3.1	3.6	1.3	9.3	3.3	1.2	6.0	12.4	7.1	4.2	4.4	4.3	4.1
Fourchette Amont	2.4	3.2	2.2	2.3	0.7	4.1	1.4	0.6	3.5	6.4	3.7	1.7	2.0	1.5	3.0
Fourchette Aval	2.1	3.1	1.4	2.1	0.6	4.0	1.1	0.6	3.1	5.5	3.2	1.4	1.7	1.2	3.1
02AB020	3.0	11.9	5.5	10.1	4.9	26.9	7.7	2.6	10.0	52.9	28.8	10.0	14.5	2.6	11.9
02BA005	1.3	2.8	1.7	3.4	1.2	9.2	1.3	1.2	3.4	11.4	6.6	1.6	2.6	1.1	2.8
02BF004	1.7	4.4	2.6	6.2	2.6	20.7	3.0	2.2	5.6	26.2	14.6	3.8	5.9	2.1	5.9
02BF005	1.0	2.6	1.5	4.2	1.6	8.9	1.4	1.1	3.6	15.3	8.7	1.8	3.3	0.5	3.3
02BF006	0.9	2.0	1.3	3.4	1.2	7.7	1.0	1.0	2.9	11.3	6.5	1.3	2.3	0.5	2.3
02BF007	0.8	1.7	1.2	2.9	1.0	6.0	0.8	0.8	2.5	9.0	5.2	1.0	1.8	0.4	1.8
02BF008	0.7	1.5	1.0	2.5	0.8	4.9	0.6	0.7	2.2	7.4	4.3	0.8	1.5	0.3	1.5
02BF009	0.7	1.2	0.8	1.7	0.5	3.6	0.4	0.6	1.7	4.3	2.6	0.5	0.9	0.3	1.2

Nom/Numéro Station	Temps de concentration (en heures) selon les différentes équations empiriques retenues														
	EMM	FAA-1	FAA-2	FM	HS	IRDA	K	M	NERC	S-1	S-2	WC	Will	Wu	MTQ
02BF012	0.4	0.6	0.5	1.0	0.3	2.3	0.2	0.4	1.0	2.1	1.3	0.2	0.4	0.2	0.4
02BF013	0.6	0.8	0.6	1.2	0.3	1.7	0.3	0.3	1.2	2.5	1.5	0.3	0.5	0.2	0.8
02CF013	4.8	7.3	1.8	6.6	2.8	15.4	7.0	1.7	9.5	28.7	16.0	9.1	10.3	4.0	10.3
02DB007	3.6	8.3	3.1	7.2	3.2	25.5	6.2	2.5	8.8	32.6	18.1	8.0	9.6	6.2	6.8
02DD013	4.3	10.8	4.5	8.4	3.9	24.4	8.4	2.4	10.6	41.0	22.5	11.0	13.1	5.1	8.0
02EC010	2.5	5.9	3.0	5.9	2.5	19.1	3.9	2.0	6.6	24.9	13.9	5.0	6.6	3.3	5.9
02ED017	3.3	9.8	4.5	8.6	4.0	22.9	7.1	2.3	9.5	42.0	23.1	9.2	12.3	3.1	8.6
02ED100	2.9	7.6	3.6	6.9	3.0	26.7	5.1	2.6	7.8	30.9	17.1	6.6	8.3	5.7	7.0
02FC017	3.4	10.6	5.3	7.2	3.2	20.7	5.9	2.2	8.6	32.6	18.0	7.7	9.7	3.9	10.6
02FD002	4.6	13.2	5.7	8.5	3.9	24.8	8.8	2.5	10.9	41.1	22.6	11.5	13.4	5.7	9.4
02FE014	4.3	10.6	4.8	7.8	3.5	26.9	7.6	2.6	10.0	36.4	20.1	9.9	11.3	7.3	7.8
02GA030	2.8	6.1	3.0	5.1	2.1	17.9	3.6	1.9	6.3	20.3	11.4	4.6	5.6	4.5	5.7
02GA031	2.2	6.5	4.0	6.0	2.5	18.6	3.6	2.0	6.3	25.5	14.2	4.6	6.5	2.6	6.5
02GA041	4.0	8.9	5.5	6.0	2.5	24.9	5.5	2.5	8.2	25.2	14.1	7.1	7.6	9.9	6.6
02GA044	1.4	2.5	2.3	2.1	0.6	3.7	0.8	0.6	2.6	5.6	3.3	1.0	1.5	0.6	2.5
02GA045	1.4	3.0	2.3	2.7	0.9	5.8	1.1	0.8	3.0	8.1	4.7	1.3	2.0	0.8	3.0
02GA046	1.3	2.3	1.8	1.9	0.6	3.7	0.7	0.6	2.4	5.1	3.0	0.9	1.3	0.6	2.3
02GD019	4.1	7.7	4.5	6.1	2.6	19.7	5.7	2.1	8.4	25.9	14.4	7.4	8.3	6.3	8.3
02GD026	3.9	7.3	3.9	6.0	2.5	22.8	5.4	2.3	8.1	25.0	14.0	6.9	7.6	8.2	7.6
02HB012	2.2	8.7	6.3	9.1	4.3	27.6	5.6	2.7	8.3	45.5	24.9	7.2	11.1	2.4	8.7
02HB020	2.9	8.7	4.2	6.6	2.9	17.8	4.8	1.9	7.6	29.2	16.3	6.2	8.4	2.7	8.7
02HC019	1.7	6.4	4.1	8.8	4.1	29.6	4.5	2.8	7.2	43.8	24.0	5.7	9.5	2.1	6.4
02HC023	2.3	5.6	2.9	6.6	2.8	23.6	4.1	2.4	6.8	28.7	16.0	5.2	7.2	3.7	7.2
02HC028	3.1	8.9	5.2	8.5	3.9	27.0	6.6	2.6	9.2	41.6	22.8	8.6	11.5	4.0	8.2
02HC038	2.2	6.5	3.9	7.7	3.5	24.6	4.7	2.5	7.4	36.1	19.9	6.0	8.9	2.7	6.5
02HD003	2.1	8.0	4.3	8.4	3.9	24.8	4.9	2.5	7.7	40.6	22.3	6.3	9.8	2.2	8.0
02HD004	1.6	5.7	3.6	6.3	2.7	20.6	2.9	2.2	5.6	26.9	15.0	3.7	6.0	1.9	5.7
02HD010	1.9	6.8	3.8	7.5	3.3	23.9	4.0	2.4	6.8	34.5	19.0	5.1	8.0	2.2	6.8
02HD018	1.3	3.1	2.0	3.5	1.2	9.7	1.4	1.2	3.5	11.7	6.7	1.7	2.6	1.5	3.1

Nom/Numéro Station	Temps de concentration (en heures) selon les différentes équations empiriques retenues														
	EMM	FAA-1	FAA-2	FM	HS	IRDA	K	M	NERC	S-1	S-2	WC	Will	Wu	MTQ
02HH003	2.3	6.9	3.7	5.7	2.3	14.7	3.4	1.7	6.1	23.2	13.0	4.4	6.2	1.9	6.9
02HJ005	1.7	3.7	2.0	3.4	1.2	9.4	1.6	1.2	3.9	11.5	6.6	2.1	2.9	1.6	3.7
02HK008	4.1	12.1	4.4	8.1	3.7	28.7	7.7	2.8	10.1	38.7	21.3	10.1	11.7	7.1	9.2
02HK009	3.0	9.8	4.2	8.0	3.6	27.5	6.0	2.7	8.6	38.1	21.0	7.8	10.3	4.4	9.1
02HK011	1.9	5.7	3.2	4.8	1.9	17.1	2.6	1.9	5.1	18.5	10.5	3.3	4.5	3.0	5.7
02MC028	5.9	17.7	7.3	10.4	5.1	29.1	13.0	2.8	13.9	54.8	29.9	17.2	19.3	6.9	11.0
1021470	4.0	8.3	3.7	4.8	1.9	11.5	4.4	1.4	7.1	18.3	10.3	5.6	6.3	3.5	6.0
1022294	0.2	0.4	0.5	1.0	0.2	1.5	0.1	0.3	0.7	2.0	1.2	0.1	0.3	0.0	0.4
1037380	2.2	5.3	2.8	6.1	2.6	18.4	3.6	2.0	6.4	26.1	14.5	4.6	6.6	2.4	6.6
1063310	1.6	3.6	2.0	2.6	0.8	5.2	1.2	0.8	3.2	7.6	4.4	1.5	2.1	0.9	3.6
1073000	3.0	8.1	3.4	6.2	2.6	16.4	4.6	1.8	7.3	26.3	14.6	5.9	7.7	2.8	7.3
1109070	4.2	8.4	3.5	5.3	2.1	15.7	5.0	1.8	7.7	21.0	11.8	6.4	7.0	5.7	6.0
1162500	3.0	9.7	4.1	8.5	3.9	21.5	6.4	2.2	9.0	41.1	22.6	8.4	11.7	2.5	9.0
1169900	1.6	5.5	2.6	8.1	3.7	23.9	3.9	2.4	6.6	38.7	21.3	5.0	8.5	1.5	5.5
1174565	1.5	4.4	2.5	5.3	2.1	16.8	2.3	1.9	4.8	21.2	11.9	2.9	4.7	1.6	4.4
1175670	1.9	5.0	2.5	5.5	2.2	13.9	2.9	1.6	5.5	22.4	12.6	3.7	5.6	1.4	5.0
1349700	2.0	5.9	2.5	9.0	4.2	29.8	5.1	2.8	7.8	44.9	24.6	6.5	10.3	2.4	10.3
1349711	0.5	1.3	0.9	3.1	1.1	9.9	0.6	1.2	2.2	10.1	5.8	0.8	1.6	0.5	1.6
1349810	1.3	3.9	1.9	7.2	3.2	25.6	2.9	2.5	5.5	32.8	18.1	3.6	6.4	1.6	6.4
1350035	1.9	4.9	2.1	7.3	3.2	24.8	3.9	2.5	6.6	33.3	18.4	5.0	7.7	2.5	7.7
1350080	1.6	4.8	2.5	6.4	2.7	28.4	3.0	2.7	5.7	27.8	15.5	3.9	5.8	3.5	4.8
1350120	1.1	3.5	2.4	5.4	2.2	16.3	1.9	1.8	4.3	21.6	12.1	2.4	4.3	1.1	3.5
1350140	1.1	3.4	2.2	5.8	2.4	19.3	2.1	2.1	4.6	24.3	13.6	2.7	4.7	1.3	3.4
1360640	1.7	4.5	2.4	5.7	2.3	13.7	2.8	1.6	5.4	23.4	13.1	3.5	5.7	1.2	4.5
1362342	0.4	1.1	0.8	2.3	0.7	5.9	0.4	0.8	1.6	6.6	3.8	0.5	1.0	0.2	1.1
1362497	2.7	5.8	2.0	6.3	2.6	19.6	4.3	2.1	7.1	26.8	15.0	5.5	7.3	3.4	7.3
1363382	0.8	1.9	1.0	3.9	1.4	19.9	1.1	2.1	3.0	13.6	7.7	1.3	2.3	2.1	2.3
1365000	1.2	4.0	1.9	7.7	3.5	31.3	3.0	2.9	5.7	36.0	19.9	3.9	6.8	2.0	6.8
1365500	0.8	2.2	1.7	4.9	1.9	22.5	1.3	2.3	3.4	19.2	10.8	1.7	3.1	1.5	3.1

Nom/Numéro Station	Temps de concentration (en heures) selon les différentes équations empiriques retenues														
	EMM	FAA-1	FAA-2	FM	HS	IRDA	K	M	NERC	S-1	S-2	WC	Will	Wu	MTQ
1374559	2.9	5.8	2.0	4.6	1.8	15.6	3.3	1.7	6.1	17.5	9.9	4.3	5.1	4.6	5.1
1374598	1.4	3.3	1.8	3.5	1.2	8.4	1.5	1.1	3.6	11.6	6.7	1.8	2.8	1.0	3.3
1374890	2.0	6.4	3.0	6.6	2.8	19.9	3.6	2.1	6.4	28.8	16.0	4.7	7.0	2.2	6.4
1413088	3.6	6.0	1.5	4.8	1.9	17.5	4.0	1.9	6.8	18.4	10.4	5.2	5.7	7.0	5.7
1414000	1.7	4.8	2.0	7.6	3.4	29.5	3.8	2.8	6.5	35.2	19.4	4.8	7.6	2.8	7.6
1414500	1.2	3.6	1.9	7.0	3.1	24.4	2.7	2.4	5.3	31.7	17.6	3.5	6.2	1.5	6.2
1415000	1.9	4.7	1.9	7.0	3.0	28.7	3.7	2.8	6.4	31.2	17.3	4.7	6.9	3.6	6.9
1421610	1.5	3.9	2.1	6.0	2.5	18.9	2.8	2.0	5.4	25.5	14.2	3.5	5.6	1.7	5.6
1421618	1.2	2.6	1.3	4.5	1.7	18.1	1.7	2.0	4.0	17.1	9.6	2.2	3.4	2.1	3.4
1434017	1.4	4.2	2.0	7.5	3.4	23.3	3.2	2.4	5.9	35.0	19.3	4.1	7.3	1.4	7.3
1434025	0.7	1.5	0.9	3.1	1.1	8.5	0.8	1.1	2.5	10.0	5.8	1.0	1.8	0.5	1.8
1434498	1.5	4.7	2.2	8.2	3.7	29.0	3.8	2.8	6.5	39.2	21.6	4.8	8.2	2.0	8.2
1521500	1.8	5.5	2.9	7.8	3.5	27.3	4.0	2.7	6.7	36.4	20.1	5.1	8.1	2.4	8.1
4233286	1.6	4.7	2.6	6.6	2.9	25.8	3.1	2.5	5.8	29.2	16.2	4.0	6.2	2.6	4.7
4237962	1.5	4.8	2.7	8.2	3.7	29.3	3.7	2.8	6.4	39.3	21.6	4.7	8.0	2.0	8.0
1135150	0.7	1.6	1.3	3.0	1.0	7.9	0.7	1.0	2.4	9.4	5.4	0.9	1.7	0.5	1.7
1139800	0.9	2.8	1.6	4.3	1.7	13.8	1.3	1.6	3.5	16.0	9.1	1.7	3.0	1.0	2.8
1142500	1.8	5.3	2.4	8.0	3.6	27.5	4.1	2.7	6.8	38.0	20.9	5.3	8.4	2.3	8.4
4288225	0.5	1.3	0.9	3.0	1.0	9.6	0.6	1.2	2.1	9.7	5.6	0.7	1.5	0.4	1.5
4288230	0.5	1.0	0.8	2.4	0.8	8.6	0.4	1.1	1.7	7.1	4.1	0.5	1.1	0.5	1.1
4294300	2.0	5.5	3.0	7.2	3.2	29.8	4.1	2.8	6.8	32.7	18.1	5.2	7.5	4.1	7.5

Annexe I. Coefficients de ruissellement estimés à partir des différentes équations empiriques du temps de concentration retenues

Tableau I.1 - Coefficients de ruissellement pour les 101 bassins-versants à l'étude estimés selon les 14 équations empiriques retenues et décrites au Chapitre 6 ainsi que la Méthode MTQ (EMM : Espey-Morgan-Masch, FM : Folmar et Miller, HS : Haktanir-Sezen, K : Kirpich, M : Mimikou, S : Sheridan, WC : Watt-Chow, Will : Williams, MTQ : MTMDDET).

Site	Coefficient de ruissellement (Transports Québec 2017)	Coefficients de ruissellement estimés en utilisant les différentes équations empiriques du temps de concentration retenues														
		EMM	FAA-1	FAA2	FM	HS	IRDA	K	M	NERC	S-1	S-2	WC	Will	Wu	MTQ
30426	0.37	0.16	0.25	0.17	0.19	0.10	0.40	0.19	0.08	0.25	0.53	0.35	0.23	0.24	0.18	0.20
50813	0.38	0.05	0.07	0.04	0.07	0.03	0.12	0.03	0.03	0.08	0.14	0.10	0.04	0.05	0.03	0.07
51002	0.26	0.06	0.10	0.07	0.10	0.04	0.21	0.04	0.05	0.11	0.21	0.14	0.05	0.07	0.05	0.10
51003	0.26	0.09	0.18	0.14	0.24	0.10	0.49	0.09	0.11	0.21	0.57	0.38	0.10	0.17	0.07	0.18
51004	0.26	0.08	0.13	0.13	0.20	0.07	0.35	0.05	0.09	0.17	0.35	0.24	0.05	0.09	0.05	0.13
120201	0.29	0.14	0.25	0.19	0.22	0.11	0.49	0.16	0.10	0.26	0.58	0.39	0.19	0.23	0.16	0.25
50812	0.18	0.12	0.33	0.19	0.27	0.16	0.59	0.25	0.10	0.29	0.96	0.61	0.30	0.38	0.12	0.33
30425	0.40	0.14	0.24	0.11	0.21	0.12	0.48	0.21	0.09	0.25	0.62	0.41	0.25	0.28	0.18	0.28
30423	0.29	0.08	0.19	0.15	0.17	0.09	0.42	0.14	0.08	0.18	0.52	0.34	0.17	0.21	0.12	0.17
40212	0.30	0.10	0.26	0.15	0.32	0.17	0.76	0.17	0.13	0.29	1.01	0.64	0.20	0.31	0.10	0.26
40409	0.27	0.08	0.15	0.08	0.14	0.08	0.34	0.11	0.07	0.15	0.39	0.26	0.13	0.16	0.11	0.15
30422	0.38	0.16	0.21	0.13	0.15	0.07	0.29	0.14	0.07	0.21	0.35	0.24	0.16	0.17	0.17	0.16
Fourchette Amont	0.34	0.27	0.34	0.26	0.27	0.12	0.44	0.18	0.12	0.36	0.56	0.38	0.22	0.25	0.20	0.32
Fourchette Aval	0.24	0.36	0.48	0.28	0.36	0.15	0.58	0.23	0.15	0.48	0.73	0.50	0.27	0.32	0.24	0.48
02AB020	0.18	0.08	0.21	0.12	0.19	0.11	0.38	0.15	0.07	0.18	0.62	0.40	0.18	0.24	0.07	0.21
02BA005	0.36	0.06	0.12	0.08	0.14	0.06	0.31	0.06	0.06	0.14	0.37	0.24	0.08	0.11	0.05	0.12
02BF004	0.42	0.08	0.17	0.11	0.21	0.11	0.52	0.12	0.10	0.20	0.62	0.40	0.15	0.21	0.10	0.21
02BF005	0.40	0.03	0.06	0.04	0.09	0.04	0.16	0.04	0.03	0.08	0.23	0.15	0.05	0.07	0.02	0.07
02BF006	0.42	0.02	0.04	0.03	0.06	0.03	0.11	0.03	0.03	0.05	0.15	0.10	0.03	0.05	0.01	0.05
02BF007	0.40	0.03	0.05	0.04	0.08	0.03	0.13	0.03	0.03	0.07	0.18	0.12	0.03	0.05	0.02	0.05
02BF008	0.39	0.05	0.08	0.06	0.12	0.05	0.19	0.04	0.05	0.10	0.26	0.17	0.05	0.08	0.02	0.08

Site	Coefficient de ruissellement (Transports Québec 2017)	Coefficients de ruissellement estimés en utilisant les différentes équations empiriques du temps de concentration retenues														
		EMM	FAA-1	FAA2	FM	HS	IRDA	K	M	NERC	S-1	S-2	WC	Will	Wu	MTQ
02BF009	0.37	0.11	0.17	0.13	0.22	0.09	0.38	0.08	0.10	0.22	0.44	0.30	0.09	0.14	0.07	0.17
02BF012	0.41	0.12	0.15	0.14	0.23	0.08	0.41	0.06	0.12	0.22	0.39	0.27	0.07	0.11	0.07	0.11
02BF013	0.39	0.06	0.08	0.06	0.10	0.04	0.13	0.03	0.04	0.10	0.17	0.12	0.04	0.06	0.02	0.08
02CF013	0.55	0.07	0.09	0.03	0.09	0.05	0.16	0.09	0.03	0.11	0.26	0.17	0.11	0.12	0.06	0.12
02DB007	0.39	0.08	0.15	0.07	0.13	0.07	0.34	0.12	0.06	0.15	0.41	0.26	0.14	0.16	0.12	0.12
02DD013	0.36	0.05	0.11	0.06	0.09	0.05	0.19	0.09	0.04	0.11	0.29	0.18	0.11	0.12	0.06	0.09
02EC010	0.39	0.04	0.08	0.04	0.08	0.04	0.22	0.05	0.03	0.09	0.27	0.17	0.07	0.09	0.05	0.08
02ED017	0.31	0.04	0.09	0.05	0.08	0.04	0.17	0.07	0.03	0.09	0.28	0.18	0.08	0.11	0.04	0.08
02ED100	0.34	0.05	0.09	0.05	0.09	0.05	0.24	0.07	0.04	0.10	0.27	0.17	0.08	0.10	0.08	0.09
02FC017	0.16	0.03	0.07	0.04	0.05	0.03	0.12	0.04	0.02	0.06	0.17	0.10	0.05	0.06	0.03	0.07
02FD002	0.23	0.06	0.15	0.08	0.10	0.06	0.25	0.11	0.04	0.13	0.37	0.23	0.13	0.15	0.08	0.11
02FE014	0.32	0.08	0.15	0.08	0.12	0.07	0.28	0.12	0.06	0.14	0.35	0.23	0.14	0.15	0.11	0.12
02GA030	0.33	0.06	0.11	0.06	0.09	0.04	0.25	0.07	0.04	0.11	0.28	0.18	0.08	0.10	0.08	0.10
02GA031	0.25	0.01	0.03	0.02	0.02	0.01	0.06	0.02	0.01	0.02	0.08	0.05	0.02	0.03	0.01	0.03
02GA041	0.30	0.24	0.45	0.31	0.33	0.16	1.04	0.31	0.16	0.42	1.05	0.66	0.38	0.40	0.50	0.36
02GA044	0.21	0.07	0.11	0.11	0.10	0.04	0.16	0.05	0.04	0.12	0.22	0.14	0.06	0.08	0.04	0.11
02GA045	0.18	0.02	0.04	0.03	0.04	0.02	0.07	0.02	0.02	0.04	0.09	0.06	0.02	0.03	0.01	0.04
02GA046	0.23	0.04	0.06	0.05	0.05	0.02	0.08	0.02	0.02	0.06	0.11	0.07	0.03	0.04	0.02	0.06
02GD019	0.43	0.12	0.19	0.13	0.16	0.09	0.37	0.15	0.08	0.20	0.44	0.29	0.18	0.20	0.16	0.20
02GD026	0.42	0.08	0.12	0.08	0.11	0.06	0.27	0.10	0.06	0.13	0.29	0.19	0.12	0.13	0.13	0.13
02HB012	0.24	0.04	0.12	0.09	0.12	0.07	0.27	0.08	0.05	0.11	0.39	0.25	0.10	0.14	0.04	0.12
02HB020	0.20	0.02	0.05	0.03	0.04	0.02	0.09	0.03	0.01	0.05	0.14	0.09	0.04	0.05	0.02	0.05
02HC019	0.33	0.06	0.16	0.11	0.21	0.11	0.53	0.12	0.08	0.18	0.72	0.45	0.15	0.22	0.07	0.16
02HC023	0.43	0.05	0.10	0.06	0.12	0.06	0.36	0.08	0.05	0.12	0.43	0.26	0.10	0.13	0.07	0.13
02HC028	0.35	0.09	0.20	0.13	0.19	0.10	0.47	0.16	0.08	0.20	0.66	0.41	0.19	0.24	0.11	0.19
02HC038	0.38	0.05	0.12	0.08	0.14	0.07	0.34	0.09	0.06	0.13	0.46	0.29	0.11	0.15	0.06	0.12
02HD003	0.23	0.03	0.10	0.06	0.10	0.05	0.24	0.07	0.04	0.09	0.35	0.22	0.08	0.11	0.03	0.10
02HD004	0.21	0.04	0.11	0.08	0.12	0.06	0.31	0.06	0.05	0.11	0.38	0.24	0.08	0.11	0.05	0.11
02HD010	0.25	0.04	0.12	0.07	0.13	0.06	0.36	0.08	0.05	0.12	0.50	0.30	0.09	0.14	0.05	0.12

Site	Coefficient de ruissellement (Transports Québec 2017)	Coefficients de ruissellement estimés en utilisant les différentes équations empiriques du temps de concentration retenues														
		EMM	FAA-1	FAA2	FM	HS	IRDA	K	M	NERC	S-1	S-2	WC	Will	Wu	MTQ
02HD018	0.31	0.08	0.14	0.10	0.16	0.07	0.37	0.08	0.08	0.16	0.39	0.26	0.09	0.13	0.08	0.14
02HH003	0.17	0.03	0.08	0.05	0.07	0.03	0.14	0.05	0.03	0.07	0.21	0.13	0.06	0.07	0.03	0.08
02HJ005	0.28	0.02	0.03	0.02	0.03	0.01	0.06	0.02	0.01	0.03	0.07	0.04	0.02	0.02	0.02	0.03
02HK008	0.22	0.02	0.06	0.03	0.04	0.02	0.11	0.04	0.02	0.05	0.14	0.09	0.05	0.05	0.04	0.04
02HK009	0.22	0.02	0.05	0.02	0.04	0.02	0.13	0.03	0.02	0.05	0.17	0.10	0.04	0.05	0.03	0.05
02HK011	0.16	0.06	0.13	0.08	0.12	0.06	0.30	0.07	0.06	0.12	0.32	0.21	0.09	0.11	0.08	0.13
02MC028	0.23	0.04	0.08	0.05	0.06	0.04	0.12	0.07	0.02	0.07	0.19	0.12	0.08	0.09	0.04	0.06
1021470	0.24	0.12	0.21	0.11	0.14	0.07	0.27	0.13	0.05	0.19	0.39	0.25	0.16	0.17	0.11	0.16
1022294	0.37	0.05	0.08	0.09	0.15	0.05	0.21	0.03	0.06	0.12	0.26	0.18	0.03	0.06	0.02	0.08
1037380	0.41	0.11	0.20	0.13	0.23	0.12	0.52	0.15	0.10	0.23	0.67	0.43	0.18	0.24	0.11	0.24
1063310	0.11	0.10	0.16	0.11	0.13	0.06	0.21	0.08	0.06	0.15	0.26	0.19	0.09	0.11	0.07	0.16
1073000	0.24	0.18	0.39	0.21	0.32	0.17	0.66	0.25	0.13	0.36	0.93	0.61	0.31	0.37	0.18	0.36
1109070	0.30	0.18	0.29	0.16	0.21	0.12	0.45	0.21	0.10	0.28	0.54	0.37	0.25	0.26	0.23	0.23
1162500	0.27	0.05	0.11	0.06	0.10	0.06	0.19	0.08	0.04	0.10	0.30	0.20	0.10	0.12	0.04	0.10
1169900	0.38	0.36	0.80	0.50	1.03	0.62	2.09	0.64	0.47	0.91	2.85	1.94	0.75	1.07	0.35	0.80
1174565	0.28	0.27	0.56	0.38	0.63	0.35	1.33	0.37	0.32	0.59	1.55	1.07	0.43	0.58	0.30	0.56
1175670	0.33	0.06	0.12	0.08	0.13	0.07	0.24	0.08	0.06	0.13	0.33	0.22	0.10	0.13	0.05	0.12
1349700	0.47	0.52	1.00	0.60	1.30	0.82	2.68	0.91	0.64	1.19	3.44	2.39	1.07	1.41	0.59	1.41
1349711	0.45	0.35	0.55	0.47	0.87	0.51	1.54	0.39	0.55	0.72	1.55	1.18	0.43	0.62	0.34	0.62
1349810	0.45	0.51	1.01	0.64	1.46	0.89	3.16	0.83	0.77	1.24	3.67	2.56	0.97	1.36	0.59	1.36
1350035	0.47	0.28	0.50	0.30	0.64	0.39	1.34	0.44	0.33	0.60	1.60	1.12	0.51	0.66	0.33	0.66
1350080	0.37	0.28	0.54	0.36	0.65	0.39	1.61	0.41	0.39	0.61	1.59	1.11	0.48	0.61	0.45	0.54
1350120	0.34	0.08	0.16	0.12	0.20	0.12	0.40	0.11	0.11	0.18	0.48	0.34	0.13	0.18	0.08	0.16
1350140	0.39	0.27	0.52	0.40	0.72	0.42	1.49	0.39	0.38	0.62	1.72	1.21	0.45	0.64	0.29	0.52
1360640	0.39	0.17	0.39	0.23	0.47	0.22	0.99	0.26	0.16	0.45	1.54	0.95	0.32	0.47	0.13	0.39
1362342	0.33	0.12	0.20	0.17	0.30	0.17	0.47	0.12	0.18	0.25	0.50	0.38	0.13	0.20	0.10	0.20
1362497	0.44	0.24	0.36	0.21	0.37	0.24	0.66	0.31	0.21	0.39	0.77	0.57	0.35	0.40	0.27	0.40
1363382	0.47	0.27	0.44	0.31	0.68	0.37	1.80	0.31	0.47	0.58	1.43	1.02	0.36	0.49	0.47	0.49
1365000	0.46	0.22	0.44	0.28	0.65	0.40	1.50	0.37	0.37	0.54	1.64	1.15	0.43	0.60	0.29	0.60

Site	Coefficient de ruissellement (Transports Québec 2017)	Coefficients de ruissellement estimés en utilisant les différentes équations empiriques du temps de concentration retenues														
		EMM	FAA-1	FAA2	FM	HS	IRDA	K	M	NERC	S-1	S-2	WC	Will	Wu	MTQ
1365500	0.44	0.15	0.28	0.24	0.44	0.25	1.10	0.20	0.28	0.36	1.00	0.71	0.23	0.34	0.22	0.34
1374559	0.34	0.12	0.19	0.10	0.16	0.09	0.34	0.13	0.09	0.19	0.37	0.26	0.16	0.17	0.16	0.17
1374598	0.28	0.14	0.24	0.16	0.24	0.13	0.41	0.14	0.12	0.25	0.50	0.36	0.16	0.21	0.11	0.24
1374890	0.26	0.06	0.12	0.08	0.13	0.08	0.25	0.09	0.06	0.12	0.31	0.22	0.10	0.13	0.06	0.12
1413088	0.43	0.15	0.21	0.09	0.18	0.10	0.39	0.16	0.10	0.22	0.41	0.29	0.19	0.20	0.23	0.20
1414000	0.46	0.23	0.43	0.26	0.57	0.35	1.28	0.37	0.31	0.52	1.42	1.00	0.43	0.57	0.31	0.57
1414500	0.47	0.15	0.28	0.19	0.42	0.26	0.88	0.24	0.22	0.36	1.03	0.73	0.27	0.39	0.17	0.39
1415000	0.47	0.24	0.41	0.24	0.52	0.32	1.22	0.36	0.30	0.50	1.28	0.90	0.41	0.52	0.35	0.52
1421610	0.45	0.12	0.21	0.14	0.28	0.16	0.55	0.17	0.14	0.26	0.66	0.46	0.20	0.26	0.13	0.26
1421618	0.51	0.38	0.59	0.40	0.83	0.47	1.93	0.46	0.50	0.78	1.87	1.32	0.53	0.70	0.52	0.70
1434017	0.46	0.37	0.71	0.46	1.01	0.62	1.98	0.61	0.50	0.87	2.52	1.77	0.70	0.98	0.37	0.98
1434025	0.49	0.11	0.18	0.13	0.28	0.15	0.50	0.12	0.15	0.24	0.56	0.40	0.14	0.20	0.09	0.20
1434498	0.46	0.71	1.39	0.87	1.93	1.21	4.12	1.22	1.01	1.69	4.94	3.45	1.41	1.93	0.84	1.93
1521500	0.40	0.05	0.09	0.06	0.12	0.07	0.27	0.08	0.06	0.11	0.32	0.22	0.09	0.12	0.06	0.12
4233286	0.39	0.31	0.64	0.43	0.80	0.46	1.98	0.48	0.42	0.73	2.15	1.45	0.57	0.77	0.43	0.64
4237962	0.44	0.03	0.07	0.05	0.11	0.06	0.27	0.06	0.05	0.09	0.33	0.22	0.07	0.11	0.04	0.11
1135150	0.40	0.12	0.20	0.17	0.30	0.15	0.56	0.12	0.15	0.26	0.63	0.44	0.14	0.21	0.09	0.21
1139800	0.32	0.09	0.18	0.13	0.25	0.13	0.55	0.11	0.12	0.21	0.61	0.41	0.13	0.19	0.09	0.18
1142500	0.44	0.16	0.31	0.19	0.40	0.24	0.84	0.26	0.20	0.36	1.02	0.71	0.31	0.41	0.19	0.41
4288225	0.40	0.18	0.33	0.27	0.54	0.29	1.07	0.20	0.32	0.43	1.08	0.78	0.23	0.36	0.17	0.36
4288230	0.44	0.19	0.31	0.27	0.51	0.26	1.08	0.18	0.32	0.42	0.96	0.70	0.21	0.32	0.20	0.32
4294300	0.43	0.12	0.24	0.16	0.29	0.17	0.80	0.20	0.15	0.28	0.85	0.56	0.24	0.30	0.20	0.30

Annexe J. Superficies et positions des lacs et milieux humides et facteurs de laminage correspondants (Figure 3.6 de Transports Québec, 2017) pour les bassins sous étude.

Tableau J.1 – Superficie des lacs et milieux humides (%), par rapport à la superficie du bassin-versant, position des lacs et milieux humides à l’intérieur des bassins-versants et facteur de laminage provenant de la Figure 3.6 de Transports Québec (2017).

Nom/Numéro de la station	Aire (km ²)	Superficie Lac (%)	Superficie Milieu humide (%)	Superficie lac et milieu humide (%)	Position des lacs et milieux humides (Figure 3.6 de Transports Québec, 2017)	Facteur de laminage
30426	28.7	0.01	1.50	1.51	B	0.84
50813	2.1	17.63	0.35	17.98	A	0.55
51002	3.6	0.00	0.36	0.36	B	0.98
51003	8.4	0.00	1.44	1.44	B	0.84
120201	24.1	0.13	8.09	8.22	B	0.68
50812	96.3	0.18	15.80	15.99	B	0.61
30425	70.1	0.20	6.32	6.53	B	0.70
30423	94.0	0.19	9.25	9.44	C	0.81
40212	39.7	4.47	2.07	6.55	C	0.83
40409	63.4	2.87	3.89	6.76	B	0.70
30422	11.4	0.08	0.76	0.84	B	0.90
Fourchette Amont	2.6	0.07	0.23	0.30	A	0.96
Fourchette Aval	2.5	0.17	8.31	8.48	C	0.81
02AB020	76.2	1.16	16.79	17.96	B	0.60
02BA005	11.1	3.19	2.39	5.58	B	0.71
02BF004	45.0	1.69	6.83	8.52	B	0.67
02BF005	10.4	11.02	1.28	12.30	B	0.64
02BF006	8.1	13.85	0.83	14.68	B	0.62
02BF007	5.1	11.09	1.33	12.43	B	0.64
02BF008	3.5	8.84	1.78	10.61	B	0.65
02BF009	2.1	5.61	2.67	8.28	C	0.81
02BF012	0.9	13.08	3.08	16.16	A	0.56
02BF013	0.5	8.78	0.00	8.78	C	0.81
02CF013	27.9	14.99	4.17	19.17	B	0.60
02DB007	69.4	1.28	10.11	11.39	B	0.65
02DD013	63.9	1.97	16.31	18.28	B	0.60
02EC010	41.2	0.61	5.69	6.30	B	0.70
02ED017	57.0	0.10	12.60	12.70	B	0.63
02ED100	75.4	0.07	4.67	4.75	B	0.73
02FC017	47.8	8.58	30.17	38.75	B	0.53
02FD002	65.8	0.19	20.52	20.72	B	0.59

Nom/Numéro de la station	Aire (km ²)	Superficie Lac (%)	Superficie Milieu humide (%)	Superficie lac et milieu humide (%)	Position des lacs et milieux humides (Figure 3.6 de Transports Québec, 2017)	Facteur de laminage
02FE014	76.5	0.05	5.64	5.70	A	0.67
02GA030	36.7	2.56	4.81	7.37	B	0.69
02GA031	39.4	0.14	17.32	17.46	B	0.60
02GA041	66.5	0.06	28.22	28.28	B	0.56
02GA044	2.2	0.00	8.38	8.38	B	0.67
02GA045	4.8	0.19	7.63	7.81	A	0.64
02GA046	2.1	0.41	1.55	1.97	A	0.77
02GD019	43.6	0.04	2.12	2.15	C	0.88
02GD026	56.8	0.35	2.28	2.62	B	0.79
02HB012	79.9	0.18	15.50	15.69	B	0.61
02HB020	36.3	0.21	12.19	12.40	A	0.59
02HC019	90.4	0.51	5.41	5.91	B	0.71
02HC023	60.2	1.38	5.02	6.40	B	0.70
02HC028	77.0	1.20	5.75	6.95	B	0.69
02HC038	65.2	0.91	6.33	7.24	B	0.69
02HD003	66.0	0.13	7.35	7.48	B	0.69
02HD004	47.4	0.04	7.57	7.61	A	0.64
02HD010	61.9	0.22	8.50	8.72	B	0.67
02HD018	12.2	0.55	15.40	15.95	B	0.61
02HH003	25.8	0.22	11.89	12.11	C	0.80
02HJ005	11.6	0.27	2.96	3.23	A	0.72
02HK008	85.6	0.70	28.79	29.49	B	0.55
02HK009	79.4	0.02	14.39	14.40	B	0.62
02HK011	34.0	1.05	24.08	25.13	B	0.57
02MC028	88.0	0.16	35.09	35.25	B	0.54
1021470	16.5	0.47	0.00	0.47	C	0.95
1037380	38.6	3.82	7.97	11.79	B	0.64
1063310	4.0	0.00	17.86	17.86	B	0.60
1073000	31.3	2.18	10.96	13.14	B	0.63
1109070	29.1	2.06	13.12	15.18	B	0.62
1162500	51.2	2.22	11.89	14.11	B	0.62
1169900	61.8	0.34	2.71	3.06	B	0.77
1174565	32.8	0.43	3.23	3.66	B	0.75
1175670	23.3	2.77	8.38	11.15	B	0.65
1349700	91.5	0.65	0.74	1.39	B	0.85
1349711	12.7	0.00	0.01	0.01	B	1.00
1349810	69.6	0.10	0.24	0.34	B	0.98
1350035	65.9	0.61	0.97	1.58	B	0.84
1350080	84.1	0.27	1.58	1.85	B	0.82
1350120	31.0	5.05	3.72	8.77	B	0.67

Nom/Numéro de la station	Aire (km ²)	Superficie Lac (%)	Superficie Milieu humide (%)	Superficie lac et milieu humide (%)	Position des lacs et milieux humides (Figure 3.6 de Transports Québec, 2017)	Facteur de laminage
1350140	42.1	0.59	1.57	2.17	B	0.80
1360640	22.8	0.53	5.01	5.54	B	0.71
1362497	43.1	1.34	1.60	2.94	B	0.78
1363382	44.5	0.00	0.04	0.04	B	1.00
1365000	100.0	0.05	0.12	0.17	B	1.00
1365500	55.5	0.50	1.51	2.02	B	0.81
1374559	28.7	4.61	9.56	14.17	B	0.62
1374598	9.3	2.87	3.99	6.87	B	0.69
1374890	44.4	4.72	8.95	13.66	B	0.63
1413088	35.2	0.14	1.21	1.34	B	0.85
1414000	90.1	0.18	0.32	0.50	B	0.95
1414500	64.2	0.05	0.23	0.27	B	1.00
1415000	85.7	0.48	0.78	1.26	B	0.86
1421610	40.6	0.98	1.96	2.95	B	0.77
1421618	37.4	0.21	0.28	0.49	B	0.95
1434017	59.0	0.02	0.09	0.11	B	1.00
1434498	87.2	0.21	0.15	0.37	B	0.98
1521500	78.6	0.15	0.63	0.78	B	0.90
4233286	70.6	0.21	2.11	2.32	B	0.80
4237962	88.8	0.21	1.97	2.17	B	0.80
1135150	8.4	0.12	0.16	0.28	B	1.00
1139800	22.9	0.36	0.41	0.77	B	0.90
1142500	79.2	0.16	1.38	1.53	B	0.84
4288225	12.1	0.08	0.21	0.29	B	1.00
4294300	91.8	6.46	6.72	13.18	B	0.63

Annexe K. Installation des équipements de recherche sur les sites instrumentés

Pour le site S1, un limnimètre et un pluviomètre ont été installés (Figure K.1). Le limnimètre se trouve dans une portion plus étroite du ruisseau des Bacon où la profondeur est acceptable pour l'utilisation d'un instrument de jaugeage de type bulleur. Il est à environ 50 mètres en amont du ponceau passant sous la route 138. Le pluviomètre a pour sa part été mis en place à 600 mètres en amont du limnimètre dans un espace dégagé à proximité d'une station de pompage appartenant à la municipalité de Longue-Rive. Tous les arbres environnant pouvant avoir un impact sur la captation de la pluie par le pluviomètre ont été coupés.

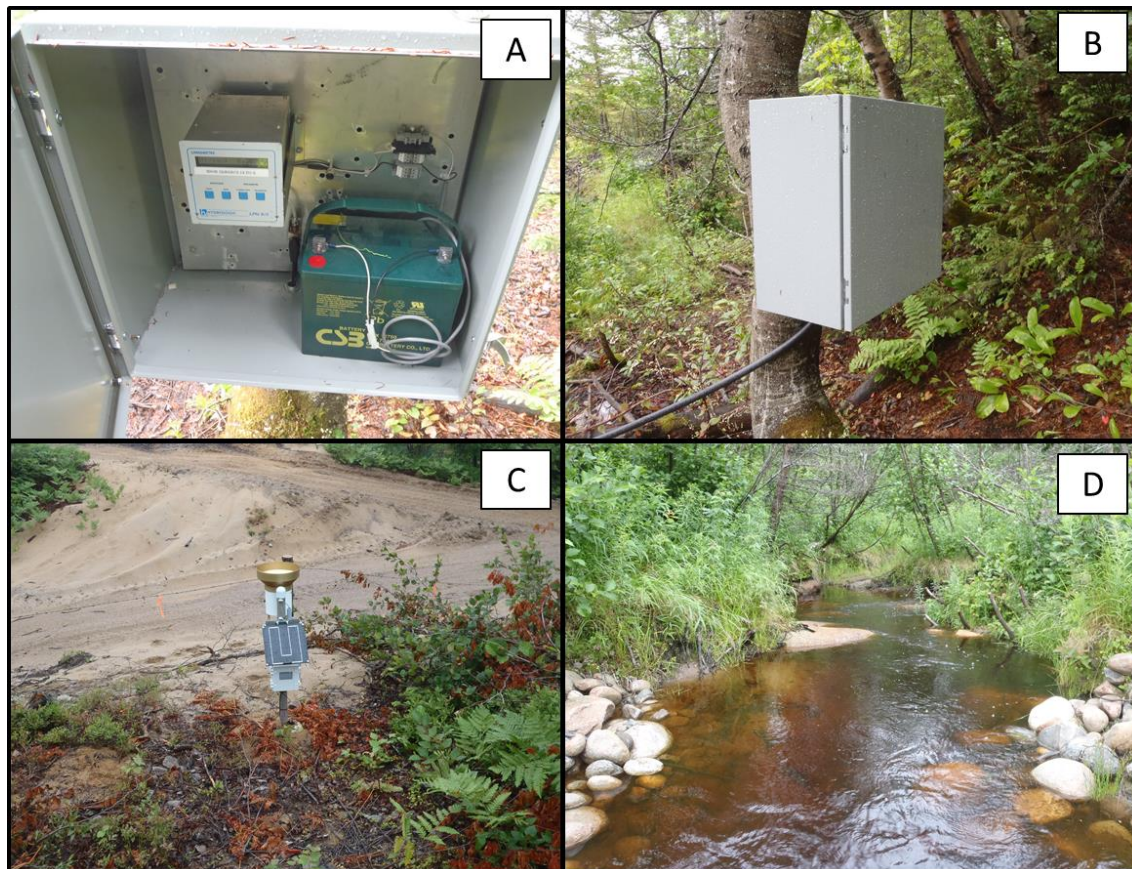


Figure K.1 - Instrumentation du site S1 (A et B : Limnimètre et boîtier ; C : Pluviomètre ; D : Emplacement du limnimètre ; Photos : Samuel Bolduc).

Pour le site S2, un instrument de jaugeage (limnimètre) et un pluviomètre ont été installés (Figure K.2). L'installation du limnimètre a été effectuée par un technicien de la DEH les 2 et 3 juin 2015. Il se trouve dans une zone profonde du cours d'eau à quelques mètres en amont d'un ponceau. Le pluviomètre est situé un peu en amont du limnimètre, près du cours d'eau et dans une clairière. Tous les arbres environnant pouvant avoir un impact sur la captation de la pluie par le pluviomètre ont été coupés.

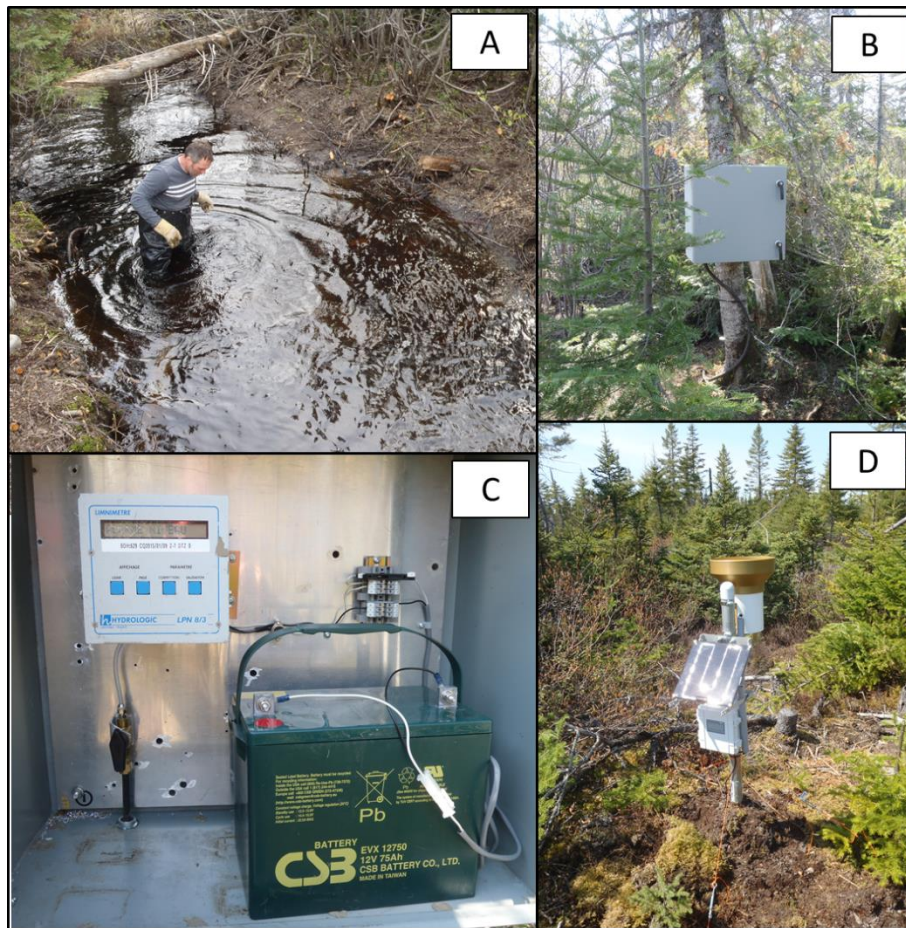


Figure K.2 - Instrumentation du site S2 (A : Emplacement du limnimètre ; B et C : Limnimètre et boîtier ; D : Pluviomètre ; Photos : Samuel Bolduc)

En raison de la superficie importante du site S3, deux pluviomètres ont été installés (Figure K.3). Un premier pluviomètre a été installé près de la station de jaugeage 050501 de la DEH. Il se trouve plus précisément dans un champ agricole laissé actuellement en friche. Ce champ est la propriété des fermes Aliments Breton et le chef de secteur Vincent Nadeau Morissette a préalablement donné son accord pour l'installation de l'appareil. Le second pluviomètre se trouve plus en amont près de la route d'Irlande. Il est situé dans une clairière près de la rivière La Chevrotière et n'est pas visible de la route. Les propriétaires d'un chalet situé près du site ont été rencontrés afin de les prévenir de la présence du pluviomètre et afin d'éviter différents inconvénients possibles. Pour ce site, plusieurs plantes et arbres ont été enlevés pour assurer une captation optimale de la pluie par le pluviomètre.

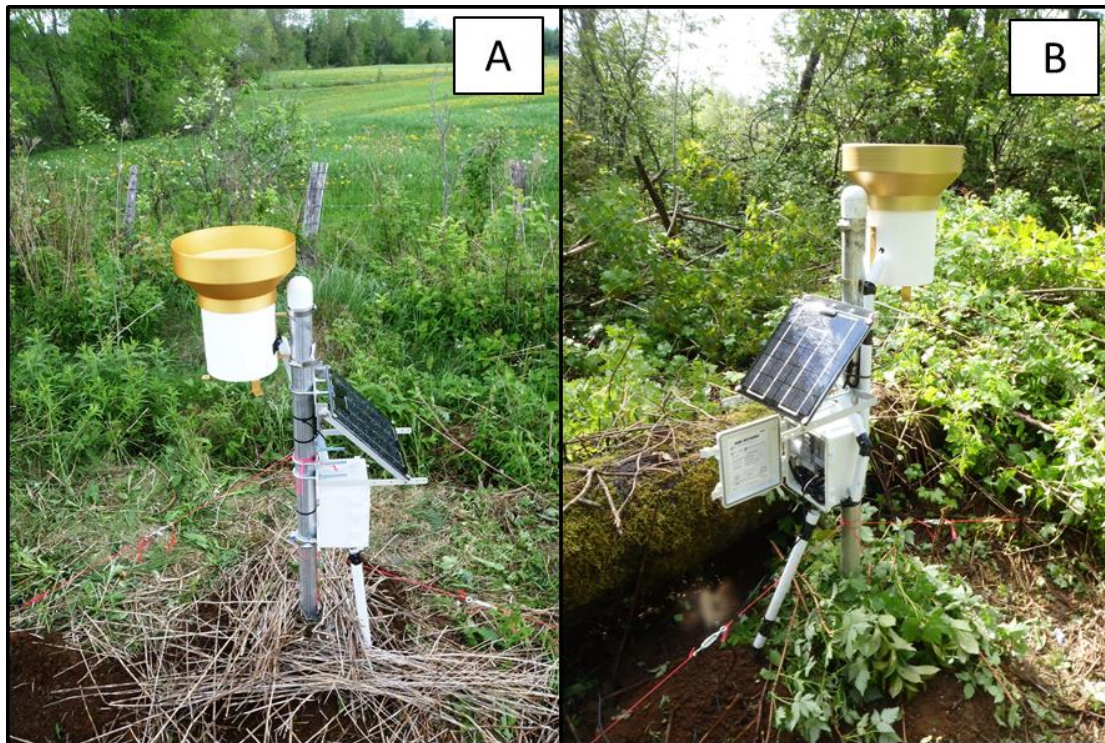


Figure K.3 - Pluviomètres installés sur le site S3 (A : Pluviomètre situé près de la station de jaugeage du CEHQ; B : Pluviomètre en bordure de la route d'Irlande; Photos : Samuel Bolduc).

Deux pluviomètres ont également été installés sur le site S4 (Figure K.4). L'un d'eux est situé à un peu plus d'un kilomètre de la station de jaugeage 062002 de la DEH et près du ruisseau Rouge. Il est localisé près du chemin de fer dans une zone occupée exclusivement par des graminées. Le pluviomètre est accessible par un chemin de gravier privé appartenant à M. Richard Levesque. La permission d'emprunter ce chemin a préalablement été demandé et accordé par M. Levesque. L'autre pluviomètre se trouve dans la forêt de démonstration Normandin. Il s'agit d'une forêt expérimentale où des modifications du territoire ont été réalisées de 1995 à 2005¹³.

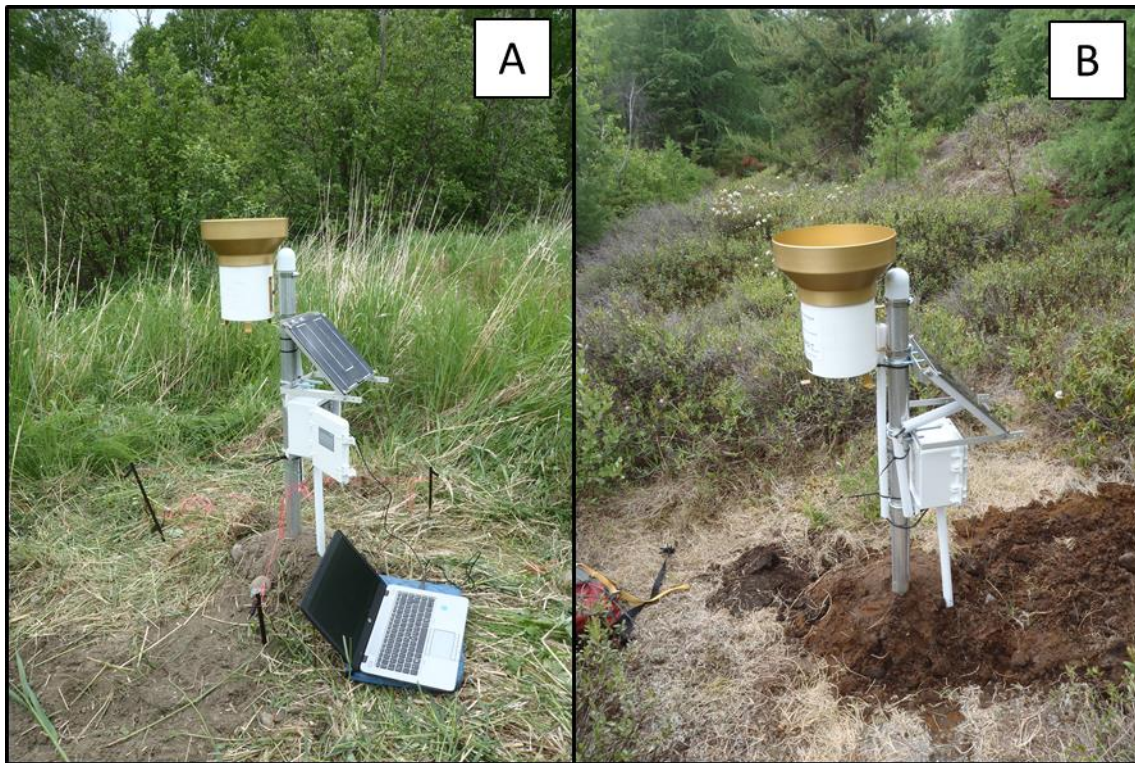


Figure K.4 - Pluviomètres installés sur le site S4 (A : Pluviomètre situé près du chemin de fer en bordure du ruisseau Rouge; B : Pluviomètre localisé dans la forêt de démonstration Normandin; Photos : Samuel Bolduc).

¹³ Pour plus de détails sur la Forêt Normandin : <http://www.groupeagir.com/index.php/connaitre-notre-regroupement/11-connaitre-notre-regroupement/23-la-corporation-d-amenagement-foret-normandin>

Annexe L. Événements extrêmes

Tableau L.1 – Hauteurs maximales de pluie enregistrées et période de retour correspondante pour le site S1.

Durée (h)	2015		2016		2017	
	Hauteur (mm)	PR ¹ (Année)	Hauteur (mm)	PR (Année)	Hauteur (mm)	PR (Année)
0.25	6.3	< 2	8	2	7.2	< 2
0.5	9.5	< 2	8.3	< 2	10.5	2
1	15.5	3	12.4	< 2	12.7	< 2
2	17.7	2	18.6	2	17.2	2
6	27	< 2	37.7	6	29.7	2
12	39.5	2	57.9	8	36.0	< 2
24	40.9	< 2	71.8	7	37.9	< 2

1- PR : Période de retour

Tableau L.2 – Hauteurs maximales de pluie enregistrées et période de retour correspondante pour le site S2.

Durée (h)	2015		2016		2017	
	Hauteur (mm)	PR ¹ (Année)	Hauteur (mm)	PR (Année)	Hauteur (mm)	PR (Année)
0.25	14.4	54	6.8	2	8.3	3
0.5	14.7	19	9.7	2	10	3
1	14.7	3	9.8	< 2	16.3	4
2	21.6	3	14.3	< 2	19.4	2
6	42.1	5	39.7	4	42.3	5
12	50.1	3	56.8	5	62.2	8
24	51.7	2	87.2	19	90.9	24

1- PR : Période de retour

Tableau L.3 - Hauteurs maximales de pluie enregistrées et période de retour correspondante pour le site S3.

Durée (h)	2015		2016		2017	
	Hauteur (mm)	PR (Année)	Hauteur (mm)	PR (Année)	Hauteur (mm)	PR (Année)
0.25	7.5	< 2	13.4	2	17	4
0.5	9.9	< 2	13.9	< 2	27.8	7
1	17.8	< 2	13.9	< 2	28.1	3
2	25.3	< 2	16.2	< 2	28.1	2
6	38	< 2	26.2	< 2	45.3	2
12	39	< 2	41.6	< 2	48.3	2
24	40.4	< 2	47.1	< 2	48.3	< 2

Tableau L.4 - Hauteurs maximales de pluie enregistrées et période de retour correspondante pour le site S4.

Durée (h)	2015		2016		2017	
	Hauteur (mm)	PR (Année)	Hauteur (mm)	PR (Année)	Hauteur (mm)	PR (Année)
0.25	8.6	< 2	27.9	50	14.9	4
0.5	11.2	< 2	28.6	29	22.5	10
1	16.3	2	28.8	14	28.3	13
2	18.8	2	28.8	6	28.7	6
6	31.5	3	38.9	7	35.6	5
12	42.4	3	53.3	8	58.5	12
24	49.8	3	54.9	4	69.4	11

