

Université du Québec  
Institut National de la Recherche Scientifique  
Centre Eau Terre Environnement

**SUIVI DE PERFORMANCE D'OUVRAGES DE GESTION DES EAUX  
PLUVIALES AU SITE DE BOUCHERVILLE ET ANALYSE DES PLUIES  
POUR L'AMÉLIORATION DE LA CONCEPTION DE CES OUVRAGES**

Par  
Véronique Guay

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de  
Maître ès sciences (M.Sc.)  
En Sciences de l'eau

**Jury d'évaluation**

Président du jury et  
examineur interne

André St-Hilaire  
INRS-ETE

Examineur externe

François Anctil  
Génie civil et génie des eaux  
Université Laval

Directrice de recherche

Sophie Duchesne  
INRS-ETE

Codirectrice de recherche

Geneviève Pelletier  
Université Laval



## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier ma directrice de recherche, Sophie Duchesne, qui a su me supporter, m'outiller et répondre à toutes mes inquiétudes. Merci Sophie pour ta patience et ta disponibilité. Merci également à ma codirectrice, Geneviève Pelletier pour avoir apporté son point de vue innovateur à mon projet. Merci à Paul Lessard et Guillaume Grégoire pour leur expertise et leurs conseils.

Un grand merci au personnel de la Ville de Boucherville qui m'a assistée tout au long de la collecte de données. Notamment, merci à Alexandre Caille pour avoir répondu à toutes mes questions et fourni tous les documents nécessaires. Merci à Claude Poirier ainsi qu'à toute l'équipe des travaux publics pour leur aide sur le terrain et leur grande ouverture.

Merci à tous les étudiants et stagiaires qui ont effectué l'analyse des échantillons au laboratoire d'environnement de l'Université Laval. Merci à Rachida, Isabelle, Jaril, Thomas, Yan, Charles-David. Merci aux stagiaires Camille et Nicolas pour m'avoir accompagnée à plusieurs reprises sur le site d'étude. Merci à Kelly, Emmanuel, Rose, Zakaria, Diane et Hadi pour m'avoir supportée et prêtée main forte tout le long de mon parcours.

Merci à la compagnie CHI pour l'accès gratuit au logiciel PCSWMM. Merci à la Ville de Québec pour l'accès aux données pluviométriques. Un merci tout particulier au FRQNT, au CRSNG et au groupe CSA pour la contribution au financement du projet et de mes études.

Merci à ma famille et mes amis qui m'ont offert du support et tendu l'oreille quand j'en avais besoin. Merci en particulier à mes parents, Martine, Marc-Olivier et William. Ce projet n'aurait vu le jour sans votre aide.



## RÉSUMÉ

Des suivis qualitatif et quantitatif d'ouvrages de contrôle à la source des eaux pluviales, soit des pavages perméables et cellules de biorétention, ont été effectués pour un stationnement incitatif situé à Boucherville. Le suivi a eu lieu de juillet 2020 à novembre 2021. Sur cette période, la réduction du volume de ruissellement des infrastructures de contrôle était en moyenne de 90,6 %. Le décalage du débit de pointe était en moyenne de 6,7 h et la réduction du débit de pointe était en moyenne de 98 %. Les taux d'enlèvement par les pavages perméables et cellules de biorétention ont été calculés pour les polluants typiques urbains, soit les matières en suspension, la demande chimique en oxygène, le phosphore total, l'azote total et la conductivité électrique. L'enlèvement des matières en suspension était en moyenne de 96 %. Le taux d'enlèvement de la demande chimique en oxygène était en moyenne de 79 %. L'enlèvement du phosphore total et de l'azote total était en moyenne de 81 % et 90 %, respectivement. La diminution de la conductivité électrique était en moyenne de -14 %.

Un suivi des végétaux a également été effectué de juin à septembre 2021. Le taux de survie des arbres à l'intérieur des cellules de biorétention s'élevait à 100 %. Pour les arbustes, le taux de survie des végétaux variait entre 54 à 100 %, tandis que pour les vivaces, le taux variait entre 0 et 100 %. Les végétaux avec les moins bons taux de survie étaient *Alchemilla mollis*, avec un taux de 0 % en haut de talus, *Rudbeckia fulgida* var. 'Pot of Gold', avec un taux de 74 % et *Saule pourpre Gracilis*, avec un taux de survie de 54 %.

Une analyse des pluies historiques de la Ville de Québec a aussi été effectuée, en vue, à terme, de proposer des pluies de conception pour les ouvrages de contrôle à la source des eaux pluviales. Les données pluviométriques aux 5 minutes du réseau de 34 pluviomètres de la Ville de Québec ont été traitées et séparées en événements pluviométriques selon onze scénarios. L'analyse a été faite pour les durées de pluies de 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 6 h, 12 h et 24 h. Les patrons temporels des événements ont ensuite été regroupés en quatre groupes par la méthode des k-moyennes. Le patron temporel le plus fréquent pour les durées allant de 15 min à 12 h est une pluie uniforme de faible intensité. Les autres patrons temporels varient grandement selon la durée de la pluie étudiée.

Mots clés : pavage perméable; biorétention; eaux pluviales; performance hydrologique; performance épuratoire; taux de survie; végétaux; patron temporel; pluie de conception; k-moyenne.

## ABSTRACT

The water quality and hydrologic performances were studied for bioretention cells and permeable pavement located in a parking lot in Boucherville. Between July 2020 and November 2021, the average runoff volume reduction was of 90.6 %. The average delay in peak flow was of 6.7 h and the average peak flow reduction was of 98 %. Removal rates were calculated for typical urban pollutants. The average suspended solids removal rate was of 96 %. The average removal rate for chemical oxygen demand was of 79 %. The average removal rates for total phosphorus and total nitrogen were of 81 % and 90 %, respectively. The average removal rate of electric conductivity was of -14 %.

Plant survival monitoring took place from June to September 2021. The survival rate of trees planted in bioretention cells was of 100 %. For bushes, survival rates varied between 54 and 100 %. For perennials, survival rates varied between 0 and 100 %. The plants with the least survival rates were *Alchemilla mollis* with 0 %, *Rudbeckia fulgida* var. 'Pot of Gold' with 74 % and *Saule pourpre Gracilis* with 54 %.

A historic rainfall analysis was also done with data from Quebec's city rain gauge network to help engineers choose a design storm when designing stormwater source control infrastructures. The network regroups 34 rain gauges with 5-minute interval data. Raw data were treated and separated into rain events using eleven scenarios. Analyses were performed for rainfall durations of 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 6 h, 12 h and 24 h. Rainfall distributions were then grouped into four using k-means clustering. The most common rainfall distribution for durations up to 12 h was a uniform, low intensity rainfall. Other rainfall distribution varied greatly according to rainfall duration.

Key words: permeable pavement; bioretention; stormwater; runoff; hydrologic performance; water quality performance; survival rate; plant; rainfall distribution; design rainfall; k-means.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>2</b>
1.1	MISE EN CONTEXTE .....	2
1.2	OBJECTIFS .....	3
<b>2</b>	<b>REVUE DE LITTÉRATURE.....</b>	<b>5</b>
2.1	CELLULES DE BIORETENTION .....	5
2.1.1	<i>Performance hydrologique des cellules de biorétention .....</i>	<i>5</i>
2.1.2	<i>Performance épuratoire des cellules de biorétention.....</i>	<i>7</i>
2.1.3	<i>Conception des cellules de biorétention .....</i>	<i>11</i>
2.2	PERFORMANCE DES PAVAGES PERMEABLES.....	14
2.2.1	<i>Performance hydrologique des pavages perméables.....</i>	<i>14</i>
2.2.2	<i>Performance épuratoire des pavages perméables .....</i>	<i>15</i>
2.2.3	<i>Conception des pavages perméables.....</i>	<i>18</i>
2.3	PLUIES .....	19
2.3.1	<i>Types.....</i>	<i>19</i>
2.3.2	<i>Évènements .....</i>	<i>19</i>
2.3.3	<i>Conception .....</i>	<i>21</i>
<b>3</b>	<b>METHODOLOGIE .....</b>	<b>24</b>
3.1	SUVIS DES OUVRAGES DE CONTROLE A LA SOURCE DES EAUX PLUVIALES.....	24
3.1.1	<i>Présentation générale du site à l'étude.....</i>	<i>24</i>
3.1.2	<i>Infrastructures de contrôle à la source.....</i>	<i>25</i>
3.1.3	<i>Schéma d'écoulement.....</i>	<i>37</i>
3.1.4	<i>Particularités du site .....</i>	<i>39</i>
3.1.5	<i>Suivi hydrologique.....</i>	<i>40</i>
3.1.6	<i>Suivi physico-chimique.....</i>	<i>47</i>
3.1.7	<i>Suivi des végétaux.....</i>	<i>50</i>
3.2	ANALYSE DES PLUIES HISTORIQUES.....	52
3.2.1	<i>Description des données du réseau de pluviomètres.....</i>	<i>52</i>
3.2.2	<i>Traitement et validation.....</i>	<i>53</i>
3.2.3	<i>Scénarios d'identification d'évènements pluvieux.....</i>	<i>55</i>
3.2.4	<i>Regroupement par la méthode des k-moyennes.....</i>	<i>57</i>

<b>4</b>	<b>RESULTATS.....</b>	<b>59</b>
4.1	RESULTATS DES SUIVIS DES OUVRAGES DE CONTROLE A LA SOURCE DES EAUX PLUVIALES .....	59
4.1.1	<i>Données pluviométriques.....</i>	59
4.1.2	<i>Données des sondes de hauteur d'eau .....</i>	66
4.1.3	<i>Suivi hydrologique.....</i>	70
4.1.4	<i>Suivi physico-chimique.....</i>	73
4.1.5	<i>Suivi des végétaux.....</i>	85
4.1.6	<i>Recommandations.....</i>	91
4.2	RESULTATS DE L'ANALYSE DES PLUIES HISTORIQUES .....	97
4.2.1	<i>Traitement des données.....</i>	97
4.2.2	<i>Scénarios de séparation d'évènements.....</i>	97
4.2.3	<i>Méthode de regroupement par k-moyennes.....</i>	99
4.2.4	<i>Pluies de courte durée.....</i>	102
4.2.5	<i>Pluies de très courtes durées .....</i>	106
4.2.6	<i>Pluies de longue durée.....</i>	109
4.2.7	<i>Sommaire des résultats.....</i>	113
<b>5</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>114</b>
<b>6</b>	<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>116</b>
<b>7</b>	<b>ANNEXE.....</b>	<b>122</b>
	ANNEXE I : COUPES-TYPES DES INFRASTRUCTURES DE CONTROLE A LA SOURCE.....	122
	ANNEXE II : CARACTERISTIQUES DES SOUS-BASSINS VERSANTS ET DES CONDUITES DU MODELE PCSWMM DU STATIONNEMENT INCITATIF DE BOUCHERVILLE, POUR LE SCENARIO HYPOTHETIQUE OU TOUTES LES SURFACES SONT IMPERMEABILISEES.....	125
	ANNEXE III : COMPARAISON GRAPHIQUE DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT MESURE A LA SORTIE DES OUVRAGES .....	129
	ANNEXE IV : CARACTERISTIQUES DES EVENEMENTS REGROUPES PAR LA METHODE DES K-MOYENNES.....	138

# LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1 RESUME DE LA PERFORMANCE HYDROLOGIQUE DES CELLULES DE BIORETENTION .....	7
TABLEAU 2.2 RESUME DE LA PERFORMANCE EPURATOIRE DES CELLULES DE BIORETENTION (LES PERFORMANCES NEGATIVES SONT NOTEES EN ROUGE) .....	10
TABLEAU 2.3 PARAMETRES DE CONCEPTION DES CELLULES DE BIORETENTION.....	12
TABLEAU 2.4 RESUME DE LA PERFORMANCE HYDROLOGIQUE DES PAVAGES PERMEABLES .....	15
TABLEAU 2.5 RESUME DE LA PERFORMANCE EPURATOIRE DES PAVAGES PERMEABLES (LES PERFORMANCES NEGATIVES SONT NOTEES EN ROUGE) .....	17
TABLEAU 2.6 PARAMETRES DE CONCEPTION POUR LES PAVAGES PERMEABLES A INTER BLOC .....	18
TABLEAU 2.7 EXEMPLES DE PLUIES DE CONCEPTION UTILISEES AU CANADA .....	23
TABLEAU 3.1- COMPOSITION DES TERREUX DE PLANTATION .....	32
TABLEAU 3.2 CARACTERISTIQUES DES ARBRES PLANTES DANS LES CELLULES DE BIORETENTION .....	33
TABLEAU 3.3 CARACTERISTIQUES DES ARBUSTES PLANTES DANS LES CELLULES DE BIORETENTION .....	34
TABLEAU 3.4 CARACTERISTIQUES DES HERBACES PLANTES DANS LES CELLULES DE BIORETENTION .....	35
TABLEAU 3.5 - PARAMETRES ET METHODES D'ANALYSES .....	50
TABLEAU 3.6- HAUTEUR DE PLUIE DE RECURRENCE 100 ANS POUR DIFFERENTES DUREES A LA STATION JEAN-LESAGE (TIRE D'ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA, 2019) .....	54
TABLEAU 3.7- SCENARIOS DE SEPARATION D'EVENEMENTS PLUVIEUX POUR LES PLUIES DE TRES COURTES DUREES (15 ET 30 MIN) .....	56
TABLEAU 3.8-SCENARIOS DE SEPARATION D'EVENEMENTS PLUVIEUX POUR LES PLUIES DE COURTES DUREES (1H ET 2 H) .....	56
TABLEAU 3.9- SCENARIOS DE SEPARATION D'EVENEMENTS PLUVIEUX POUR LES PLUIES DE LONGUES DUREES (6, 12 ET 24 H) .....	57
TABLEAU 4.1 CARACTERISTIQUES DES EVENEMENTS PLUVIOMETRIQUES .....	63
TABLEAU 4.2 PERFORMANCE HYDROLOGIQUE DES INFRASTRUCTURES DE CONTROLE A LA SOURCE POUR DIFFERENTS EVENEMENTS PLUVIEUX.....	71
TABLEAU 4.3 STATISTIQUES DES PERFORMANCES HYDROLOGIQUES DES OUVRAGES DU STATIONNEMENT INCITATIF DE BOUCHERVILLE .....	72
TABLEAU 4.4 PERFORMANCE D'ENLEVEMENT (EN TERMES DE CONCENTRATIONS) DES MES, DE LA DCO, DU P, DE L'AZOTE TOTAL ET DE LA CONDUCTIVITE POUR LES DIFFERENTS EVENEMENTS PLUVIEUX.....	76
TABLEAU 4.5 STATISTIQUES DES PERFORMANCES D'ENLEVEMENT DES PARAMETRES DE QUALITE DE L'EAU (EN TERMES DE CONCENTRATION) .....	77
TABLEAU 4.6 DECOMPTE DES VEGETAUX DANS LES CELLULES DE BIORETENTION DU SITE ET TAUX DE SURVIE POUR L'ANNEE 2021 .....	90
TABLEAU 4.7 NOMBRE D'EVENEMENTS CLASSES PAR SCENARIO ET DUREE .....	98
TABLEAU 4.8 CARACTERISTIQUES EXTERNES DES EVENEMENTS D'UNE HEURE POUR LES SCENARIOS D A G .....	99

TABLEAU 4.9 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA HAUTEUR DE PLUIE TOTALE D'UN ÉVÉNEMENT POUR LES DEUX MÉTHODES DE REGROUPEMENT POUR LE SCENARIO 1H-D .....	102
TABLEAU 7.1 CARACTÉRISTIQUES DES SOUS-BASSINS DU MODÈLE SWMM.....	125
TABLEAU 7.2 CARACTÉRISTIQUES SUPPLÉMENTAIRES DES SOUS-BASSINS DU MODÈLE SWMM .....	127
TABLEAU 7.3 CARACTÉRISTIQUES DES CONDUITES DU MODÈLE SWMM.....	128
TABLEAU 7.4 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA PÉRIODE DE RETOUR DES ÉVÉNEMENTS D'UNE HEURE POUR LES SCÉNARIOS D À G.....	138
TABLEAU 7.5 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA HAUTEUR DE PLUIE TOTALE DES ÉVÉNEMENTS D'UNE HEURE POUR LES SCÉNARIOS D A G.....	138
TABLEAU 7.6 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LE MOIS D'OCCURRENCE DES ÉVÉNEMENTS D'UNE HEURE POUR LES SCÉNARIOS D A G.....	138
TABLEAU 7.7 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA PÉRIODE DE RETOUR DES ÉVÉNEMENTS DE DEUX HEURES POUR LES SCÉNARIOS D A G .....	139
TABLEAU 7.8 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA HAUTEUR DE PLUIE TOTALE DES ÉVÉNEMENTS DE DEUX HEURES POUR LES SCÉNARIOS D A G .....	139
TABLEAU 7.9 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LE MOIS D'OCCURRENCE DES ÉVÉNEMENTS DE DEUX HEURES POUR LES SCÉNARIOS D A G .....	139
TABLEAU 7.10 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA PÉRIODE DE RETOUR DES ÉVÉNEMENTS DE 15 MINUTES POUR LES SCÉNARIOS A A C .....	140
TABLEAU 7.11 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA HAUTEUR DE PLUIE TOTALE DES ÉVÉNEMENTS DE 15 MINUTES POUR LES SCÉNARIOS A A C .....	140
TABLEAU 7.12 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LE MOIS D'OCCURRENCE DES ÉVÉNEMENTS DE 15 MINUTES POUR LES SCÉNARIOS A A C .....	140
TABLEAU 7.13 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA PÉRIODE DE RETOUR DES ÉVÉNEMENTS DE 30 MINUTES POUR LES SCÉNARIOS A A C .....	140
TABLEAU 7.14 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA HAUTEUR DE PLUIE TOTALE DES ÉVÉNEMENTS DE 30 MINUTES POUR LES SCÉNARIOS A A C .....	141
TABLEAU 7.15 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LE MOIS D'OCCURRENCE DES ÉVÉNEMENTS DE 30 MINUTES POUR LES SCÉNARIOS A A C .....	141
TABLEAU 7.16 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA PÉRIODE DE RETOUR DES ÉVÉNEMENTS DE SIX HEURES POUR LES SCÉNARIOS H A K .....	141
TABLEAU 7.17 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA HAUTEUR DE PLUIE TOTALE DES ÉVÉNEMENTS DE SIX HEURES POUR LES SCÉNARIOS H A K .....	142
TABLEAU 7.18 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LE MOIS D'OCCURRENCE DES ÉVÉNEMENTS DE SIX HEURES POUR LES SCÉNARIOS H A K .....	142
TABLEAU 7.19 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA PÉRIODE DE RETOUR DES ÉVÉNEMENTS DE 12 HEURES POUR LES SCÉNARIOS H A K .....	142

TABLEAU 7.20 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA HAUTEUR DE PLUIE TOTALE DES ÉVÉNEMENTS DE 12 HEURES POUR LES SCÉNARIOS H A K .....	143
TABLEAU 7.21 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LE MOIS D'OCCURRENCE DES ÉVÉNEMENTS DE 12 HEURES POUR LES SCÉNARIOS H A K .....	143
TABLEAU 7.22 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA PÉRIODE DE RETOUR DES ÉVÉNEMENTS DE 24 HEURES POUR LES SCÉNARIOS H A K .....	143
TABLEAU 7.23 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LA HAUTEUR DE PLUIE TOTALE DES ÉVÉNEMENTS DE 24 HEURES POUR LES SCÉNARIOS H A K .....	144
TABLEAU 7.24 NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS PAR GROUPE DE K-MOYENNES SELON LE MOIS D'OCCURRENCE DES ÉVÉNEMENTS DE 24 HEURES POUR LES SCÉNARIOS H A K .....	144



# LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES CRITERES DE SEPARATION D'EVENEMENTS PLUVIEUX .....	21
FIGURE 3.1 VUE AERIENNE DU STATIONNEMENT INCITATIF DE BOUCHERVILLE .....	24
FIGURE 3.2 VUE D'UNE CELLULE DE BIORETENTION, DU PAVAGE ALVEOLE ET DU PAVAGE PERMEABLE.....	25
FIGURE 3.3 PAVAGE PERMEABLE A INTERBLOC DE TYPE INFLO .....	26
FIGURE 3.4 LOCALISATION DU PAVAGE PERMEABLE A INTERBLOC MONTREE EN BLEU (ADAPTE DE GOOGLE MAPS, 2021) .....	26
FIGURE 3.5 IMPERMEABILISATION DES INTERSTICES ENTRE LES BLOCS DE PAVAGE .....	27
FIGURE 3.6 LOCALISATION DU PAVAGE PERMEABLE IMPERMEABILISE AVEC UN POLYMERE DANS LES ENCADRES EN VERT (ADAPTE DE GOOGLE MAPS, 2021).....	28
FIGURE 3.7 LOCALISATION DES CELLULES DE BIORETENTION DANS LES ENCADRES EN JAUNE (ADAPTE DE GOOGLE MAPS, 2021) .....	29
FIGURE 3.8 ABAISSEMENT DE LA BORDURE ET BASSIN DE STOCKAGE DES SEDIMENTS A L'ENTREE DES CELLULES DE BIORETENTION .....	30
FIGURE 3.9 SORTIE DES DRAINS PERFORES SOUS LE MEDIA FILTRANT DE LA BIORETENTION DANS LE PUISARD DE TROP-PLEIN.....	31
FIGURE 3.10 PUISARD DE TROP-PLEIN DANS UNE BIORETENTION .....	31
FIGURE 3.11 PAVAGE ALVEOLE .....	36
FIGURE 3.12 LOCALISATION DU PAVAGE ALVEOLE DANS LES ENCADRES EN ORANGE (ADAPTE DE GOOGLE MAPS, 2021) .....	37
FIGURE 3.13 PUISARDS ET DIRECTION DU DRAINAGE SUR LE SITE .....	38
FIGURE 3.14 ÉCOULEMENT SOUTERRAIN SUR LE SITE .....	38
FIGURE 3.15 LOCALISATION DE LA PARTIE DU SITE A L'ETUDE (DELIMITEE PAR LA LIGNE ROUGE POINTILLEE) .....	39
FIGURE 3.16 VUE DU FOSSE ET DE L'AUTOROUTE 132 A PARTIR DU SITE .....	40
FIGURE 3.17 PLUVIOMETRE A AUGET BASCULANT .....	41
FIGURE 3.18 LOCALISATION DU PLUVIOMETRE PAR RAPPORT AU SITE (ADAPTE DE GOOGLE MAPS, 2021) .....	41
FIGURE 3.19 LOCALISATION DES EQUIPEMENTS DE MESURE DE DEBIT .....	42
FIGURE 3.20 SONDES HOBO (A DROITE) ET ISCO (A GAUCHE) .....	43
FIGURE 3.21 SONDE GLOBAL WATERS .....	44
FIGURE 3.22 DEVERSOIR A JAUGEAGE VOLUMETRIQUE.....	45
FIGURE 3.23 METHODE D'ECHANTILLONNAGE MANUEL.....	48
FIGURE 3.24 PERCHE D'ECHANTILLONNAGE.....	48
FIGURE 3.25 VUE DE LA CREPINE (A DROITE) ET DE LA SONDE DE PRESSION DE L'ECHANTILLONNEUR AUTOMATIQUE (A GAUCHE) A L'INTERIEUR DU REGARD RP2-B .....	49
FIGURE 3.26 LOCALISATION DES SITES DE SUIVI VEGETAL DU PAVAGE ALVEOLE NOTE PAR DES TRIANGLES ROUGES (ADAPTE DE GOOGLE MAPS, 2021).....	51

FIGURE 3.27 RESEAU DE PLUVIOMETRES DE LA VILLE DE QUEBEC .....	52
FIGURE 4.1 LOCALISATION DES PLUVIOMETRES VOISINS D'ENVIRONNEMENT CANADA (ADAPTE DE GOOGLE EARTH, 2022).....	59
FIGURE 4.2 CUMULS MENSUELS DES PLUVIOMETRES DU SITE A L'ETUDE ET DE L'AEROPORT DE ST-HUBERT .....	60
FIGURE 4.3 COMPARAISON SUR UNE BASE JOURNALIERE DES PRECIPITATIONS MESUREES AU SITE ET A LA STATION DE L'AEROPORT ST-HUBERT (LA LIGNE POINTILLEE ILLUSTRE LE RATIO 1:1 ET LA LIGNE PLEINE REPRESENTA LA REGRESSION LINEAIRE DES DONNEES, DONT LE COEFFICIENT DE DETERMINATION EST AUSSI PRESENTE SUR LA FIGURE).....	61
FIGURE 4.4 COMPARAISON SUR UNE BASE JOURNALIERE DES PRECIPITATIONS MESUREES AU SITE ET A LA STATION MCTAVISH (LA LIGNE POINTILLEE ILLUSTRE LE RATIO 1:1 ET LA LIGNE PLEINE REPRESENTA LA REGRESSION LINEAIRE DES DONNEES, DONT LE COEFFICIENT DE DETERMINATION EST AUSSI PRESENTE SUR LA FIGURE).....	61
FIGURE 4.5 CARACTERISATION DES EVENEMENTS PLUVIEUX DE BOUCHERVILLE PAR RAPPORT AUX COURBES IDF DE L'AEROPORT DE ST-HUBERT .....	65
FIGURE 4.6 EXEMPLE DE VALIDATION DES DONNEES DES SONDES .....	67
FIGURE 4.7 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 30 OCTOBRE 2021 .....	69
FIGURE 4.8 CONCENTRATIONS EN MES A L'AVAL DU PUISARD P-14 ET A L'EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES DE CONTROLE A LA SOURCE .....	74
FIGURE 4.9 CONCENTRATIONS EN PHOSPHORE A L'AVAL DU PUISARD P-14 ET A L'EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES DE CONTROLE A LA SOURCE .....	79
FIGURE 4.10 CONCENTRATIONS EN AZOTE A L'AVAL DU PUISARD P-14 ET A L'EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES DE CONTROLE A LA SOURCE .....	81
FIGURE 4.11 CONCENTRATIONS EN AN DCO A L'AVAL DU PUISARD P-14 ET A L'EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES DE CONTROLE A LA SOURCE .....	82
FIGURE 4.12 SUIVI DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DANS LE TEMPS .....	84
FIGURE 4.13 PAVAGE PERMEABLE AU SITE #3 LE 1 <sup>ER</sup> JUIN 2021 .....	85
FIGURE 4.14 PAVAGE PERMEABLE AU SITE #3 LE 8 JUILLET 2021 .....	86
FIGURE 4.15 RECOUVREMENT VEGETAL DU PAVAGE ALVEOLE A PROXIMITE DES CELLULES DE BIORETENTION.....	87
FIGURE 4.16 RECOUVREMENT VEGETAL DU PAVAGE ALVEOLE POUR LES AUTRES SITES .....	88
FIGURE 4.17 LOCALISATION DES VEGETAUX PAR RAPPORT AU TALUS D'UNE CELLULE DE BIORETENTION .....	89
FIGURE 4.18 ESPACEMENT ENTRE LA BORDURE ABAISSEE A L'ENTREE D'UNE CELLULE DE BIORETENTION ET D'UN BASSIN DE STOCKAGE DES SEDIMENTS.....	91
FIGURE 4.19 CONTOURNEMENT DU BASSIN DE STOCKAGE DES SEDIMENTS PAR LES EAUX DE RUISSELLEMENT ENTRANT DANS UNE CELLULE DE BIORETENTION (LA DELIMITATION EN ROUGE REPRESENTA LE CHEMIN DES EAUX DE RUISSELLEMENT).....	92

FIGURE 4.20 CREUSEMENT DU TERREAU A L'ENTREE D'UNE CELLULE DE BIORETENTION PAR LES EAUX DE RUISSELLEMENT .....	93
FIGURE 4.21 EXEMPLE DE PERFORMANCE DE <i>RUDBECKIA FULGIDA</i> VAR. ' <i>POT OF GOLD</i> ' DANS LES CELLULES DE BIORETENTION DU SITE DE BOUCHERVILLE .....	94
FIGURE 4.22 EXEMPLE DE PERFORMANCE DE <i>ALCHEMILLA MOLLIS</i> DANS LES CELLULES DE BIORETENTION DU SITE DE BOUCHERVILLE .....	95
FIGURE 4.23 EXEMPLE DE PERFORMANCE DE <i>SAULE POURPRE GRACILIS</i> DANS LES CELLULES DE BIORETENTION DU SITE DE BOUCHERVILLE .....	95
FIGURE 4.24 EXEMPLE D'ENVAHISSEMENT DES VIVACES PAR LES ARBUSTES .....	96
FIGURE 4.25 ACCUMULATION ET TRANSPORT DES SEDIMENTS SUR LE PAVAGE PERMEABLE IMPERMEABILISE DURANT UN EVENEMENT DE PLUIE .....	97
FIGURE 4.26 CUMUL DES PRECIPITATIONS EN FONCTION DU TEMPS POUR LE SCENARIO 1 H-D AVEC QUATRE GROUPES DE K-MOYENNES ET AVEC LES DONNEES BRUTES .....	100
FIGURE 4.27 CUMUL DES PRECIPITATIONS EN FONCTION DU TEMPS POUR LE SCENARIO 1 H-D AVEC QUATRE GROUPES DE K-MOYENNES ET AVEC LES DONNEES STANDARDISEES .....	100
FIGURE 4.28 PATRONS TEMPORELS MOYENS POUR LE SCENARIO 1 H-D AVEC LES DONNEES BRUTES ET QUATRE GROUPES DE K-MOYENNES.....	101
FIGURE 4.29 PATRONS TEMPORELS MOYENS POUR LE SCENARIO 1 H-D AVEC LES DONNEES STANDARDISEES ET QUATRE GROUPES DE K-MOYENNES .....	101
FIGURE 4.30 REGROUPEMENT PAR K-MOYENNES EN PATRONS TEMPORELS MOYENS D'UNE DUREE D'UNE HEURE SELON LES SCENARIOS D, E, F ET G .....	103
FIGURE 4.31 REGROUPEMENT PAR K-MOYENNES EN PATRONS TEMPORELS MOYENS D'UNE DUREE DE DEUX HEURES SELON LES SCENARIOS D, E, F ET G .....	105
FIGURE 4.32 REGROUPEMENT PAR K-MOYENNES EN PATRONS TEMPORELS MOYENS D'UNE DUREE DE 15 MIN SELON LES SCENARIOS A, B ET C.....	107
FIGURE 4.33 REGROUPEMENT PAR K-MOYENNES EN PATRONS TEMPORELS MOYENS D'UNE DUREE DE 30 MIN SELON LES SCENARIOS A, B ET C.....	108
FIGURE 4.34 REGROUPEMENT PAR K-MOYENNES EN PATRONS TEMPORELS MOYENS D'UNE DUREE DE SIX HEURES SELON LES SCENARIOS H, I, J ET K .....	110
FIGURE 4.35 REGROUPEMENT PAR K-MOYENNES EN PATRONS TEMPORELS MOYENS D'UNE DUREE DE 12 HEURES SELON LES SCENARIOS H, I ET K .....	111
FIGURE 4.36 REGROUPEMENT PAR K-MOYENNES EN PATRONS TEMPORELS MOYENS D'UNE DUREE DE 24 HEURES SELON LES SCENARIOS H ET I .....	112
FIGURE 7.1 COUPE-TYPE D'UNE CELLULE DE BIORETENTION (TIRE DU RAPPORT DU GROUPE-CONSEIL GENIPUR 2018) .....	122
FIGURE 7.2 COUPE-TYPE DU PAVAGE PERMEABLE A INTERBLOC (TIRE DU RAPPORT DU GROUPE-CONSEIL GENIPUR, 2018) .....	123

FIGURE 7.3 COUPE-TYPE DU PAVAGE PERMEABLE ALVEOLE (TIRE DU RAPPORT DU GROUPE-CONSEIL GENIPUR, 2018) .....	124
FIGURE 7.4 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 17 AOUT 2020 .....	129
FIGURE 7.5 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 29 AOUT 2020 .....	130
FIGURE 7.6 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 29 SEPTEMBRE 2020.....	130
FIGURE 7.7 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 19 OCTOBRE 2020 .....	131
FIGURE 7.8 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 21 OCTOBRE 2020 .....	131
FIGURE 7.9 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 24 OCTOBRE 2020 .....	132
FIGURE 7.10 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 26 OCTOBRE 2020 .....	132
FIGURE 7.11 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 22 NOVEMBRE 2020 .....	133
FIGURE 7.12 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 30 NOVEMBRE 2020 .....	133
FIGURE 7.13 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 15 AVRIL 2021.....	134
FIGURE 7.14 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 30 AVRIL 2021.....	134
FIGURE 7.15 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 26 JUIN 2021.....	135
FIGURE 7.16 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 08 JUILLET 2021.....	135
FIGURE 7.17 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 25 JUILLET 2021.....	136
FIGURE 7.18 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 24 SEPTEMBRE 2021.....	136
FIGURE 7.19 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 22 OCTOBRE 2021 .....	137
FIGURE 7.20 COMPARAISON DU DEBIT DE RUISSELLEMENT SIMULE AVEC LE DEBIT EFFLUENT DES INFRASTRUCTURES POUR L'EVENEMENT DU 30 OCTOBRE 2021 .....	137

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

CEAEQ : Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec

DCO : Demande chimique en oxygène

IDF : Intensité-durée-fréquence

MELCC : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

MES : Matières en suspension

N : Azote total

NRCS : *Natural Resources Conservation Service*

P : Phosphore total

RP : Regard pluvial

SEA : Service Atmosphérique – Environnement Canada

# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Mise en contexte

L'urbanisation des villes a donné naissance à de nouvelles problématiques en gestion des eaux pluviales. Auparavant, l'eau pluviale était soit interceptée par le couvert végétal, soit elle tombait sur le sol. L'eau interceptée pouvait rejoindre l'atmosphère par évaporation. L'eau au sol était infiltrée et l'excédent ruisselait vers les milieux récepteurs. L'action des végétaux permettait également de retourner une partie de l'eau vers l'atmosphère par évapotranspiration.

Suite à l'imperméabilisation de la majorité du territoire urbain, le cycle naturel de l'eau a été modifié. En effet, la multiplication des infrastructures imperméables a augmenté non seulement la quantité d'eau de ruissellement à gérer, mais a également augmenté la vitesse à laquelle l'eau ruisselle tout en diminuant l'interception, l'infiltration et, par conséquent, la recharge de la nappe phréatique (Delleur, 1982). L'imperméabilisation des surfaces peut faire augmenter les volumes de ruissellement de surface de 3 à 5 fois par rapport à une surface végétalisée (Société Québécoise de Phytotechnologie, 2018).

La modification du paysage urbain est marquée par l'enlèvement d'arbres et de végétation. L'interception par le couvert végétal et l'évapotranspiration s'en voient diminuées. L'action combinée de l'enlèvement des végétaux et de l'augmentation des vitesses et du débit de pointe des eaux de ruissellement entraîne un accroissement de l'érosion du sol et des risques d'inondation (Delleur, 1982; Société Québécoise de Phytotechnologie, 2018).

D'un autre côté, les polluants générés par les zones urbaines s'accumulent sur le territoire majoritairement imperméable. Lors d'une pluie, les polluants sont entraînés vers les milieux récepteurs. Un bassin versant de plus de 10 % de surface imperméable a un impact sur le milieu récepteur à l'aval (Shaver *et al.*, 1995).

Pour remédier à ces enjeux, les exigences réglementaires se sont de plus en plus resserrées. Dans le but de répondre aux nouvelles exigences, la gestion des eaux pluviales prend un virage plus durable en mettant en place des ouvrages qui favorisent l'infiltration, l'évapotranspiration, la rétention et l'amélioration de la qualité de l'eau de ruissellement. Les ouvrages de contrôle à la source font partie des solutions mises de l'avant pour atténuer les impacts de l'urbanisation et des changements climatiques sur les réseaux et milieux récepteurs. Ces ouvrages ont pour but de gérer les eaux pluviales près de la source, c'est-à-dire avant qu'elles ne rejoignent les

conduites d'égout pluviales. Les contrôles à la source peuvent prendre la forme de cellules de biorétention, de pavage perméable, de toits verts, de tranchées d'infiltration, etc. Il est à noter qu'en favorisant l'infiltration, l'évapotranspiration et la rétention de l'eau de ruissellement par le biais des ouvrages de contrôle à la source, celle-ci n'est plus disponible pour les usagers domestiques, industriels, agricoles et municipaux en aval du bassin versant. Les eaux de ruissellement soutirées du bassin versant peuvent donc avoir des impacts négatifs à considérer.

Une autre problématique dans le domaine de la gestion des eaux pluviales est le choix de la pluie de conception. Le choix des paramètres d'une pluie synthétique, tel que son patron temporel, a un impact important sur la conception d'infrastructures. Les patrons temporels peuvent provenir de distributions plus ou moins aléatoires ou provenir d'analyses effectuées sur des pluies réelles de certaines régions (MDDEP & MAMROT, 2014). Or, le choix de la distribution temporelle utilisée pour la conception des ouvrages de gestion des eaux pluviales n'est pas une chose simple et ne fait pas l'unanimité ; ceci en raison, notamment, du manque de connaissances au sujet de la pluviométrie locale à fine échelle dans plusieurs régions, ainsi qu'au manque de connaissances sur l'impact du choix des pluies de conception sur la performance réelle des ouvrages.

## 1.2 Objectifs

Le mémoire est séparé en deux sections distinctes. La première section concerne le suivi des ouvrages de contrôle à la source des eaux pluviales. Ces ouvrages sont encore peu étudiés dans les conditions climatiques du sud du Québec. Il existe quelques mémoires qui ont évalué la performance hydrologique et épuratoire de ces ouvrages (Brodeur-Doucet, 2018; Geheniau, 2014; Pineau, 2019). Or, peu d'études ont évalué la performance hydrologique et épuratoire en plus de faire le suivi de la survie et de la croissance des végétaux. De plus, plusieurs facteurs tels que la conception, le type de sol, le pourcentage d'aire drainée, la localisation, la topographie, les paramètres de conception et la hauteur de la nappe peuvent avoir un impact sur leur performance. Il est donc important de collecter des données dans plusieurs contextes.

Le premier objectif du mémoire est d'évaluer la performance hydrologique et épuratoire d'un site comprenant des ouvrages de contrôle à la source des eaux pluviales dans un site du Sud du Québec. Il sera également question d'évaluer le taux de survie des végétaux plantés dans les cellules de biorétention et de suivre la croissance des végétaux dans les pavages perméables alvéolés.

Concrètement, pour atteindre ces objectifs, les tâches suivantes ont été effectuées :

- Effectuer un suivi quantitatif et qualitatif des ouvrages de contrôle à la source sur le site pendant les saisons estivales de 2020 et 2021;
- Calculer les performances hydrologique et épuratoire du site;
- Effectuer des décomptes des végétaux dans les cellules de biorétention durant la saison estivale de 2021;
- Effectuer un suivi photographique de la croissance des végétaux dans les alvéoles des pavages perméables à plusieurs endroits durant la saison estivale de 2021.

La deuxième section concerne l'analyse des pluies historiques. L'analyse des caractéristiques et des patrons temporels des pluies à faible résolution est encore rare dans le domaine (Shamsudin *et al.*, 2010). L'objectif de cette partie du mémoire est donc d'analyser les pluies historiques de la ville de Québec afin d'aider les ingénieurs-concepteurs dans le choix de l'intrant pluvieux le mieux adapté pour la conception des infrastructures urbaines. Pour ce faire, il sera également question de déterminer l'influence de différents critères de début et de fin dans l'identification des événements pluvieux.

## 2 REVUE DE LITTÉRATURE

### 2.1 Cellules de biorétention

Les cellules de biorétention ont été conçues pour reproduire les processus naturels des milieux non urbanisés. Elles permettent donc d'avoir un impact au niveau hydrologique et au niveau de la qualité de l'eau. Les prochaines sections présenteront une revue de littérature sur les performances épuratoires et hydrologiques des cellules de biorétention. Une section présente aussi les paramètres de conception et leur impact sur les performances des ouvrages.

#### 2.1.1 Performance hydrologique des cellules de biorétention

Les cellules de biorétention sont des dépressions de faible profondeur. Elles ont pour but d'imiter le cycle naturel hydrologique (MDDEP & MAMROT, 2014; Société Québécoise de Phytotechnologie, 2018). En effet, l'eau de pluie qui ruisselle vers les cellules de biorétention peut être infiltrée et stockée dans le média poreux mis en place. Une fois dans le sol, l'eau peut soit être captée par les végétaux, infiltrée plus profondément dans le sol ou, en cas de surplus, dirigée vers les drains. L'eau captée par les végétaux retourne à l'atmosphère par évapotranspiration, tandis que l'eau infiltrée peut rejoindre la nappe phréatique. D'un point de vue hydrologique, les critères de suivi de la performance des infrastructures vertes sont donc la réduction du volume de ruissellement rejeté au réseau pluvial, la diminution du débit de pointe dans le réseau et le décalage du débit de pointe par rapport à la pointe d'intensité de la pluie (Khan *et al.*, 2012a).

Les performances hydrologiques des cellules de biorétention varient selon le site et les éléments de conception. En effet, la Société Québécoise de Phytotechnologie (2018) estime une réduction du volume de ruissellement de 45 à 85 %, tout dépendant du type de sol sous-jacent. Une cellule de biorétention avec un sol perméable peut permettre une réduction du volume de ruissellement de 85 %. Un sol peu perméable permet une réduction moyenne aux alentours de 45 %. Une étude effectuée en sol argileux montre une réduction du volume de ruissellement moyen de 51,3 % pour 11 évènements pluvieux en climat subtropical humide (Jaber, 2015). Le site a également une influence sur la performance des cellules de biorétention en raison du climat. Une étude effectuée à Calgary, en climat continental humide, a déterminé qu'une cellule de biorétention réduisait en moyenne le volume de ruissellement de 91,5 % pour 24 évènements de pluie, réduisait le débit de pointe de 95,3 % pour 19 évènements et décalait le débit de pointe de 42 min pour 19 évènements (Khan *et al.*, 2012a). Deux cellules de biorétention ont également été

étudiées en conditions hivernales en Norvège. La réduction du débit de pointe était de 42 % pour 44 événements pluvieux. Un décalage du débit de pointe de 117 min a aussi été observé en climat subarctique (Muthanna *et al.*, 2008). Une autre étude en conditions hivernales, réalisée à Montréal, en climat continental humide, montre une réduction du volume de ruissellement de 76,6 % pour 67 événements pluvieux (Geheniau, 2014). En plus du climat, les éléments de conception tels que le type de média filtrant, son épaisseur, les types et le nombre de végétaux, etc. ont un impact sur la performance des cellules de biorétention. Ballestro *et al.* (2005) ont observé une réduction moyenne du débit de pointe de 85 % et un décalage du débit de pointe moyen de 615 min pour une cellule de biorétention dans le New Hampshire en climat continental humide. Une performance de réduction du volume de ruissellement entre 54,6 et 86,4 % a été observée pour trois différents sites au Maryland (climat continental humide), en Caroline du Nord (climat subtropical humide) et en Pennsylvanie (climat continental humide) comprenant des cellules de biorétention (Davis *et al.*, 2012). En Virginie, une cellule de biorétention a été étudiée en climat subtropical humide. En moyenne, la réduction du volume de ruissellement était de 97 % pour 28 événements de pluie et la réduction du débit de pointe était de 99 % pour 5 événements de pluie (DeBusk & Wynn, 2011). Deux étudiantes à la maîtrise ont travaillé sur une cellule de biorétention située au marché public de Longueuil de 2016 à 2018 en climat continental froid et humide. Pineau (2019) a observé une réduction du volume de ruissellement de 20,6 %, une réduction du débit de pointe de 86,4 % et un décalage du débit de pointe moyen de 49 min pour 38 événements. Brodeur-Doucet (2018) a trouvé une réduction du volume de ruissellement de 70 % et une réduction du débit de pointe de 94 % pour 10 événements pluvieux. Une réduction du débit de pointe moyenne de 96,5 % a été observée sur 16 événements pluvieux en Caroline du Nord, en climat subtropical humide (Hunt *et al.*, 2008). Li *et al.* (2009) a étudié la performance de six cellules de biorétention situées au Maryland pour un climat continental humide et en Caroline du Nord en climat subtropical humide. Les résultats montrent une réduction du débit de pointe de 86 à 99 % en moyenne. En bref, les performances des cellules de biorétention varient grandement d'un site à un autre. Il est donc important d'effectuer le suivi des performances de celles-ci à long terme en climat froid, humide et continental québécois.

Le Tableau 2.1 résume les performances hydrologiques des cellules de biorétention des études précitées.

**Tableau 2.1 Résumé de la performance hydrologique des cellules de biorétention**

Réduction du volume de ruissellement (%)	Réduction du débit de pointe (%)	Décalage du débit de pointe (min)	Références
-	85	615	Ballestro <i>et al.</i> (2005)
54,6 à 86,4	-	-	Davis <i>et al.</i> (2012)
97	99	-	DeBusk & Wynn (2011)
-	42	117	Muthanna <i>et al.</i> (2008)
76,6	-	-	Gehehiau (2014)
-	96,5	-	Hunt <i>et al.</i> (2008)
51,3	-	-	Jaber (2015)
91,5	95,3	42	Khan <i>et al.</i> (2012a)
-	86 à 99	-	Li <i>et al.</i> (2009)
45 à 85	-	-	Société Québécoise de Phytotechnologie (2018)
40,6	86,4	49	Pineau (2019)
70	94	-	Brodeur-Doucet (2018)

### 2.1.2 Performance épuratoire des cellules de biorétention

La présence de végétaux et la filtration par un média poreux permettent l'enlèvement de certains polluants. En zone urbaine, l'eau de ruissellement peut être chargée en polluants tels que des matières en suspension, des nutriments, de la matière organique, des huiles et graisses et des métaux lourds. Les polluants peuvent provenir de plusieurs sources telles que les automobiles, les travaux de construction, les dépôts atmosphériques, l'épandage de fertilisants ou de sels de déglacage (Müller *et al.*, 2020). L'enlèvement des polluants par une cellule de biorétention se fait par sédimentation, adsorption, minéralisation, filtration et procédés biologiques (Davis *et al.*, 2012).

Tout comme pour la performance hydrologique, la performance épuratoire dépend des caractéristiques des éléments de conception et du site. Afin d'augmenter le temps de rétention, certaines conceptions ont une zone interne de stockage. Brown & Hunt (2011) ont étudié l'impact d'une zone interne de stockage d'eau à l'intérieur de cellules de biorétention situées en Caroline du Nord en climat subtropical humide. La performance épuratoire était de 58 % (23 évènements) pour l'enlèvement des matières en suspension (MES), de -10 % (29 évènements) pour l'enlèvement du phosphore total (P) et de 58 % pour l'enlèvement de l'azote total (29 évènements). Une performance négative signifie que l'ouvrage entraîne un relargage de polluants. Une autre cellule de biorétention avec une zone interne de stockage a été étudiée.

L'enlèvement moyen en MES était de 90 %, tandis que l'enlèvement en P était de 10 à 50 %. L'enlèvement moyen en N était de 15 % et l'enlèvement moyen en demande chimique en oxygène (DCO) était de 79,5 % (Qiu *et al.*, 2019). Une étude a observé un enlèvement de 79 à 89 % de MES pour 22 évènements de pluie, un enlèvement de 12 à 19 % de P et un enlèvement de 32 à 35 % de N pour deux cellules de biorétention avec deux différentes profondeurs de média filtrant en Caroline du Nord (climat subtropical humide) (Brown & Hunt, 2012).

Une base de données internationale récoltant les données de plusieurs sites note que l'enlèvement moyen en MES est de 77,3 %, l'enlèvement moyen en P est de -26,3 % (relargage) et l'enlèvement moyen en N est de 23,8 % (Clary *et al.*, 2020). Une étude effectuée au Texas (climat subtropical humide) en sol argileux montre un enlèvement en MES de 83 % et un enlèvement en phosphore total de 41 % (Jaber, 2015). L'enlèvement en P et en N était de 65 à 87 % et de 49 à 59 %, respectivement, pour un site de cellules de biorétention au Maryland en climat humide continental (Davis *et al.*, 2006). Une autre étude a noté un enlèvement en MES de 91 % et un enlèvement en P de 63 % pour 12 tests (Hsieh & Davis, 2005). Une étude effectuée à Calgary en conditions froides a déterminé qu'une cellule de biorétention réduisait en moyenne la concentration en MES des eaux de ruissellement de 96 % et de 0,6 % pour le phosphore total pour 6 évènements pluvieux (Khan *et al.*, 2012b). Geheniau (2014) a étudié la performance épuratoire des cellules de biorétention en climat québécois et en conditions hivernales. L'enlèvement en MES était de 75 % pour 17 évènements, l'enlèvement en phosphore était de -66,3 % pour 17 évènements (relargage), l'enlèvement en DCO était de -50,6 % pour 12 évènements (relargage), l'enlèvement en chlorures était de -288,9 % pour 18 évènements (relargage) et la diminution de conductivité était de -116 % (relargage) pour 18 évènements. Li & Davis (2014) ont étudié une cellule de biorétention située au Maryland, en climat humide continental, de janvier à novembre 2013, pour un total de 16 évènements pluvieux. Les résultats montrent un enlèvement en MES de 96 % et un enlèvement en N de 41 %. En Virginie, en climat humide subtropical, une cellule de biorétention a été étudiée pendant 28 évènements de pluie. En moyenne, les enlèvements en MES, P et N étaient tous de 99 % (DeBusk & Wynn, 2011). Un enlèvement en MES, P et N de 59,5, 31,4 et 32,2 %, respectivement, a été observé sur 16 évènements pluvieux en Caroline du Nord (Hunt *et al.*, 2008). Un projet de stationnement écologique situé dans la MRC Brome-Missisquoi, en climat continental humide, a révélé un enlèvement moyen en MES de 87 % et un enlèvement moyen en P de 69,5 % pour 11 évènements de pluie (Brome-Missisquoi, 2015). Une cellule de biorétention construite au Connecticut a été étudiée. Son enlèvement en P était de -110,6 % (relargage) et son enlèvement en N était en moyenne de 32 % (Dietz & Clausen, 2005). Trois cellules de biorétention ont été

observées par Roseen & Stone (2013). Leur performance épuratoire variait de 73 à 97 % pour l'enlèvement de MES, de 6 à 71 % pour l'enlèvement de P, de -8 à 56 % pour l'enlèvement moyen de P (Roseen & Stone, 2013). Ballestro *et al.* (2005) ont observé un enlèvement moyen en MES de 97 % pour une cellule de biorétention au New Hampshire en climat continental humide. Brodeur-Doucet (2018) a étudié une cellule de biorétention au marché public de Longueuil de 2016 à 2018. Les performances résultantes sont de 84 % pour l'enlèvement de MES (11 évènements), de -61 % pour le P (relargage) (5 évènements), de -27 % pour l'enlèvement de N (relargage) (7 évènements) et de 22 % pour la DCO (11 évènements). En Virginie, une cellule de biorétention a démontré une performance de 86 % pour un enlèvement de MES, une performance de 90 % pour un enlèvement moyen du P et une performance de 97 % pour un enlèvement moyen de la DCO (Yu *et al.*, 1999). Tous les pourcentages d'enlèvement mentionnés sont exprimés en termes de concentration.

Tout comme pour la performance hydrologique des cellules de biorétention, les performances épuratoires varient d'une étude à une autre. De là l'importance d'évaluer la performance épuratoire en climat québécois. Le Tableau 2.2 résume les performances épuratoires des cellules de biorétention des études précitées.

**Tableau 2.2 Résumé de la performance épuratoire des cellules de biorétention (les performances négatives sont notées en rouge)**

Enlèvement de MES (%)	Enlèvement du P total (%)	Enlèvement du N total (%)	Enlèvement de DCO (%)	Enlèvement des chlorures (%)	Enlèvement de conductivité (%)	Références
77,3	-26,3	23,8	-	-	-	Clary <i>et al.</i> (2020)
-	65 à 87	49 à 59	-	-	-	Davis <i>et al.</i> (2006)
97	-	-	-	-	-	Ballestro <i>et al.</i> (2005)
96	-	41	-	-	-	Li & Davis (2014)
99	99	99	-	-	-	DeBusk & Wynn (2011)
87	69,5	-	-	-	-	Brome-Missisquoi (2015)
86	90	-	97	-	-	Yu <i>et al.</i> (1999)
75	-65,3	-	-50,6	-288,9	-116,0	Geheniau (2014)
58	-10	58	-	-	-	Brown & Hunt (2011)
79 à 89	12 à 19	32 à 35	-	-	-	Brown & Hunt (2012)
91	63	-	-	-	-	Hsieh & Davis (2005)
59,5	31,4	32,2	-	-	-	Hunt <i>et al.</i> (2008)
83	41	-	-	-	-	Jaber (2015)
96	0,6	-	-	-	-	Khan <i>et al.</i> (2012b)
90	10 à 50	15	79,5	-	-	Qiu <i>et al.</i> (2019)
73 à 97	6 à 71	-8 à 56	-	-	-	Roseen & Stone (2013)
-	-110,6	32	-	-	-	Dietz & Clausen (2005)
84	-61	-27	22	-	-	Brodeur-Doucet (2018)

### **2.1.3 Conception des cellules de biorétention**

La conception des ouvrages de biorétention n'est pas normée. En effet, les paramètres de conception, tels que la superficie de la cellule de biorétention par rapport à l'aire drainée, la profondeur de la cellule, la présence d'un drain et le type de média filtrant, varient d'une cellule de biorétention à une autre. Ces variations peuvent avoir des impacts sur la performance de l'ouvrage. Le Tableau 2.3 présente les différences de conception entre les cellules de biorétention précédemment citées.

Selon les articles consultés, la superficie de l'ouvrage par rapport à l'aire de sous-bassin drainée varie entre 0,8 et 10,5 %. Selon le Guide de gestion des eaux pluviales, la surface de l'aire de biorétention devrait être entre 5 et 10 % de la surface tributaire (MDDEP & MAMROT, 2014). Le site de Boucherville est peu commun par rapport à cet aspect, car l'aire d'une cellule de biorétention représente entre 30 et 100 % de la surface tributaire.

Au Tableau 2.3, la profondeur des cellules de biorétention varie entre 0,5 et 1,8 m. La profondeur des cellules de biorétention au site de Boucherville est au minimum de 0,4 m. En ce qui concerne le type de média filtrant, celui-ci varie selon le concepteur, mais, en général, on retrouve un média composé en partie de sable.

La présence d'un drain et le décalage de ce drain par rapport au fond de l'infrastructure est propre à chaque site. Lorsque le sol natif a un taux d'infiltration faible, un drain est souvent placé pour collecter les eaux filtrées. Or, un drain peut également être installé lorsque le sol sous-jacent est perméable. Dans le cas du site de Boucherville, un drain a été placé dans le fond des ouvrages de biorétention.

**Tableau 2.3 Paramètres de conception des cellules de biorétention**

	Boucherville	Davis <i>et al.</i> , (2012)	DeBusk & Wynn (2011)	Muthanna <i>et al.</i> , (2008)	Geheniau (2014)	Hunt <i>et al.</i> , (2008)	Khan <i>et al.</i> , (2012a) et Khan <i>et al.</i> , (2012b)	Li <i>et al.</i> , (2009)	Brodeur-Doucet (2018) et Pineau (2019)	Brown & Hunt (2012)
Détails	-	Comparaison de trois (3) conceptions différentes	-	-	-	-	-	Comparaison de six (6) conceptions différentes	-	Comparaison de deux (2) conceptions
Superficie de la cellule de biorétention sur l'aire drainée (%)	30,0 à 100,0	2,8; 5,6; 6,6	2,1	5,0	6,4	6,2	-	6,0; 2,0; 5,0; 5,0; 4,5; 4,5	-	6,3; 5,3
Profondeur de la cellule de biorétention (m)	0,4	1,2; 0,9; 1,1	1,8	0,8	1,3	1,2	1,2	0,5–0,8; 0,9; 1,2; 1,2; 0,5-0,6; 0,5–0,6	1,1	0,6; 0,9
Type de média filtrant	Compost, sable, terre arable, terre noire	Sable limoneux; Sable limoneux ; Sable	88% de sable, 8% d'argile et silt et 4% de compost	Terre végétale et sable	Sable	Limon sablonneux	Sable limoneux	-	Compost, sable, terre arable et de terre noire	86-89% sable, 8-10% silt et 3-4% argile
Présence d'un drain	Oui	Non; Oui; Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Décalage du drain par rapport au fond de la cellule (m)	0,0	0,0; 0,0; 0,6	0,3	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0; 0,0; 0,3; 0,0; 0,0; 0,0	0,1	-
Possibilité d'infiltration dans le sol sous-jacent	Oui	Oui; Non; Oui	Non	Non	Non	-	-	Oui; Oui; Oui; Oui; Oui; Non	Oui	-

**Tableau 2.3 (suite) Paramètres de conception des cellules de biorétention**

	Brown & Hunt (2011)	Li & Davis (2014)	Brome-Missisquoi (2015)	Ballestro <i>et al.</i> , (2005)	Roseen & Stone (2013)	Dietz & Clausen (2005)
Détails	Comparaison de deux (2) conceptions	-	-	-	Comparaison de deux (2) conceptions	-
Superficie de la cellule de biorétention sur l'aire drainée (%)	6,6; 5,8	6,5	2,1 à 10,5	9,4	0,8; 1,0	8,6
Profondeur de la cellule de biorétention (m)	1,1; 1,0	0,5-0,8	0,9	0,8	1,1; 0,8	0,6
Type de sol	96% sable, 2,9% silt, and 1,1% argile	Sable limoneux	91-97% sable, 0-3% silt, and 2-6% argile	Sable, compost et sols natifs	Sable, compost et limon	Sable limoneux
Présence d'un drain	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Oui
Décalage du drain par rapport au fond de la cellule (m)	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Possibilité d'infiltration dans le sol sous-jacent	Oui; Oui	-	Oui	Oui	Non	Non

## 2.2 Performance des pavages perméables

Les pavages perméables sont des structures permettant la circulation d'automobiles tout en laissant les eaux pluviales s'infiltrer. Les pavages perméables peuvent également avoir un impact au niveau hydrologique et au niveau de la qualité de l'eau. Les prochaines sections présenteront une revue de littérature sur les performances épuratoires et hydrologiques des pavages perméables. Les paramètres de conception sont également abordés dans la revue de littérature.

### 2.2.1 Performance hydrologique des pavages perméables

L'eau de pluie qui ruisselle vers les pavages perméables est infiltrée rapidement grâce à leur grande capacité d'infiltration. L'eau est stockée temporairement dans le réservoir poreux mis en place sous l'infrastructure. L'eau peut ensuite soit être infiltrée plus profondément dans le sol ou, en cas de saturation du sol, être dirigée vers les drains, s'il y en a. Pareillement aux cellules de biorétention, les critères de suivi de la performance des pavages perméables sont la réduction du volume de ruissellement rejeté au réseau pluvial, la diminution du débit de pointe dans le réseau et le décalage du débit de pointe par rapport à la pointe d'intensité de la pluie. Or, la performance des pavages perméables varie grandement selon le site et la conception des infrastructures (Credit Valley Conservation et Toronto and Region Conservation Authority, 2010).

Quatre pavages perméables ont été étudiés en Ohio en climat humide continental. Les résultats démontrent une réduction du débit de pointe de 69,7 à 100 % pour 74 événements (Winston *et al.*, 2018). Fassman & Blackbourn (2010b) ont observé une réduction de volume de 92,2 % et un décalage du débit de pointe de 60 min pour un pavage perméable pour 54 événements en Nouvelle-Zélande situé sur un sol imperméable en climat océanique. Une autre étude effectuée en sol imperméable a démontré une performance en réduction du volume de ruissellement de 64,9 à 65,9 % en climat subtropical humide pour 12 événements (Jaber, 2015). Une troisième étude en sol imperméable note une réduction du débit de pointe de 82 % et un décalage du débit de pointe de 23 min pour 74 événements en Caroline du Nord (Braswell *et al.*, 2018). Quant à eux, Braswell *et al.* (2017) ont obtenu une réduction du débit de pointe de 96 % et un décalage du débit de pointe de 51 min pour un pavage perméable en Caroline du Nord, soit en climat subtropical humide. Une étude réalisée sur cinq ans à Toronto montre une réduction du volume de ruissellement de 72 % et une réduction du débit de pointe de 91 % pour 185 événements (Toronto and Region Conservation and University of Toronto, 2015).

Le Tableau 2.4 résume les performances hydrologiques des pavages perméables des études précitées.

**Tableau 2.4 Résumé de la performance hydrologique des pavages perméables**

Réduction du volume de ruissellement (%)	Réduction du débit de pointe (%)	Décalage du débit de pointe (min)	Références
-	69,7 à 100	-	Winston <i>et al.</i> (2018)
-	92,2	60	Fassman & Blackbourn (2010a)
-	96	51	Braswell <i>et al.</i> (2017)
64,94 à 65,87	-	-	Jaber (2015)
-	82	23	Braswell <i>et al.</i> (2018)
72	91	-	Toronto and Region Conservation and University of Toronto (2015)

## 2.2.2 Performance épuratoire des pavages perméables

Les pavages perméables ont le potentiel d'améliorer la qualité des eaux de ruissellement par filtration et sédimentation (Davis *et al.*, 2012). Ces mécanismes d'action sont efficaces pour enlever les sédiments et MES, ce qui a un impact sur l'enlèvement des métaux particuliers, hydrocarbures et phosphore total, mais est peu efficace pour l'enlèvement des polluants dissous (Selbig *et al.*, 2019; Winston *et al.*, 2020). Les performances d'enlèvement des polluants varient selon le site et le type de pavage perméable utilisé.

Une base de données internationale récoltant les données de plusieurs sites note que l'enlèvement moyen en MES des pavages perméables est de 71,4 % et que l'enlèvement moyen en phosphore est de 41,2 % (Clary *et al.*, 2020). Une étude a suivi un site de pavage perméable sur trois ans en Nouvelle-Zélande et a démontré un enlèvement de MES de 56 % pour 17 évènements (Fassman & Blackbourn, 2010a). Une étude réalisée sur cinq ans à Toronto montre un enlèvement de MES de 88 %, un enlèvement de phosphore de 85 %, un enlèvement de chlorures de 7 à 44 % et une réduction de conductivité de -87 à -61 % (relargage) pour 58 évènements (Toronto and Region Conservation and University of Toronto, 2015). Drake *et al.* (2012) ont également étudié un site de pavage perméable à Toronto et ont obtenu un enlèvement de MES 87 à 89 %, un enlèvement de P de 87 à 88 %, un enlèvement de chlorures de 92 à 93% et une réduction de conductivité de 84 à 86 %. Trois pavages perméables ont été étudiés au Wisconsin par (Selbig *et al.*, 2019). L'enlèvement moyen en MES des pavages était de 60 % et l'enlèvement moyen en P était de 21 % (Selbig *et al.*, 2019). Une étude effectuée en sol peu perméable a démontré un enlèvement de MES de 11 à 84 % et un enlèvement de P de -101 à -59 % (relargage) (Jaber, 2015). Une autre étude en sol imperméable note un enlèvement de MES

de 98 %, un enlèvement de phosphore de 95 % et un enlèvement d'azote de 73 % (Braswell *et al.*, 2018). Quant à eux, Braswell *et al.* (2017) ont obtenu un enlèvement de MES de 99,6 %, un enlèvement de P de 99,1 % et un enlèvement d'azote total de 92,7 % pour un pavage perméable en Caroline du Nord, en climat subtropical. Winston *et al.* (2020) ont noté un enlèvement de MES de 99,5 %, un enlèvement de phosphore de 78 %, un enlèvement d'azote de 59 % et un enlèvement de chlorures de -3977 % (relargage) en climat continental humide de l'Ohio. Tous les pourcentages d'enlèvement mentionnés sont exprimés en termes de concentration.

Le Tableau 2.5 résume les performances épuratoires des pavages perméables des études précitées.

**Tableau 2.5 Résumé de la performance épuratoire des pavages perméables (les performances négatives sont notées en rouge)**

Enlèvement de MES (%)	Enlèvement du P total (%)	Enlèvement du N total (%)	Enlèvement de DCO (%)	Enlèvement de chlorures (%)	Enlèvement de conductivité (%)	Références
99,5	78	59	-	-3977	-	Winston <i>et al.</i> (2020)
71,4	41,2	-	-	-	-	Clary <i>et al.</i> (2020)
56	-	-	-	-	-	Fassman & Blackbourn (2010b)
99,6	99,1	92,7	-	-	-	Braswell <i>et al.</i> (2017)
11 à 84	-101 à -59	-	-	-	-	Jaber (2015)
98	95	73	-	-	-	Braswell <i>et al.</i> (2018)
60	21	-	-	33	-	Selbig <i>et al.</i> (2019)
88	85	-	-	7 à 44	-87 à -61	Toronto and Region Conservation and University of Toronto (2015)
87 à 89	87 à 88	-	-	92 à 93	84 à 86	Drake <i>et al.</i> (2012)

### 2.2.3 Conception des pavages perméables

Tout comme pour les ouvrages de biorétention, la conception des pavages perméables n'est pas normée. Il existe certaines recommandations, mais les paramètres de conception sont à la discrétion de l'ingénieur-concepteur. Le Tableau 2.6 montre les différents paramètres de conception et les valeurs trouvées dans les articles consultés.

Selon les articles consultés, la superficie de l'ouvrage par rapport à l'aire de sous-bassin drainée varie entre 14,1 et 100 % et sa profondeur varie entre 0,3 et 0,9 m. Le site de Boucherville a une superficie de pavage perméable de 75 % par rapport à la superficie tributaire drainée, alors que sa profondeur (0,8 m) se situe dans la gamme des valeurs retrouvées dans la littérature.

La présence d'un drain et le décalage par rapport au fond de l'infrastructure est propre à chaque site. Lorsque le sol natif a un taux d'infiltration faible, un drain est souvent placé pour collecter les eaux filtrées. Or, un drain peut également être installé lorsque le sol sous-jacent est perméable. Dans le cas du site de Boucherville, un drain a été placé dans le fond des ouvrages.

**Tableau 2.6 Paramètres de conception pour les pavages perméables à inter bloc**

	Boucherville	Winston <i>et al</i> , (2020)	Winston <i>et al</i> , (2018)	Fassman & Blackbourn (2010a) et Fassman & Blackbourn (2010b)	Braswell <i>et al</i> , (2017)	Braswell <i>et al</i> , (2018)	Drake <i>et al</i> , (2012) et Toronto and Region Conservation and University of Toronto (2015)	Selbig <i>et al</i> , (2019)
Détails	-	-	Comparaison de deux (2) conceptions	-	-	-	-	-
Superficie du pavage perméable sur l'aire drainée (%)	75,0	58,1	14,1; 18,7	50,0	28,2	80,0	100,0	-
Profondeur de l'ouvrage (m)	0,8	0,8	0,5	0,5	0,3	0,5	0,9	0,5
Présence d'un drain	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Décalage du drain par rapport au fond de la cellule (m)	0,0	0,1	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0
Possibilité d'infiltration dans le sol sous-jacent	Oui	Non	Non	-	Oui	Non	-	Non

## 2.3 Pluies

Dans cette section, il sera question de présenter les différents types de pluies rencontrées et leurs caractéristiques. À noter que les pluies peuvent être définies par leurs caractéristiques internes ou externes. Les caractéristiques internes d'une pluie sont, entre autres, le nombre de pointes, le temps pour atteindre une pointe, etc. Les caractéristiques externes sont la hauteur totale, la durée totale, l'intensité moyenne, l'intensité maximale et la durée de la période de temps sec depuis la dernière pluie (Adams *et al.*, 1986). Il sera également question de définir un évènement pluvieux et de présenter les différents critères de séparation d'une série d'observations pluviométriques en évènements pluvieux. En dernier, le concept de pluie de conception sera abordé.

### 2.3.1 Types

Les phénomènes atmosphériques occasionnent différents types de pluies. Les pluies du premier type, soit les pluies par convection, sont le résultat d'un réchauffement de l'air au sol à la suite d'une journée chaude et humide. L'air, en montant, se refroidit, créant soit une averse de faible intensité et hauteur totale ou un orage de courte durée, mais de forte intensité. Le deuxième type, les pluies orographiques, est le résultat d'une montée de l'air humide contre le flanc d'une montagne. Le troisième type, les pluies cycloniques, est causé par le mouvement d'un front chaud ou d'un front froid. Les pluies résultantes sont souvent de faible intensité, de longue durée et se produisent majoritairement en automne (MDDEP & MAMROT, 2014). Les caractéristiques externes des pluies varient selon le type de pluie.

### 2.3.2 Évènements

Plusieurs applications hydrologiques nécessitent qu'une série temporelle soit séparée en évènements pluvieux. Un évènement indépendant est défini par des critères différents selon l'application et la région à l'étude. De plus, la définition du début et de la fin d'un évènement est difficile à définir compte tenu de l'intermittence des instruments mesurant la pluie (Molina-Sanchis *et al.*, 2016). En conséquence, pour une même série de données, différents évènements résultants sont obtenus selon les critères de séparation choisis et selon les critères de début et fin d'un évènement (Shamsudin *et al.*, 2010).

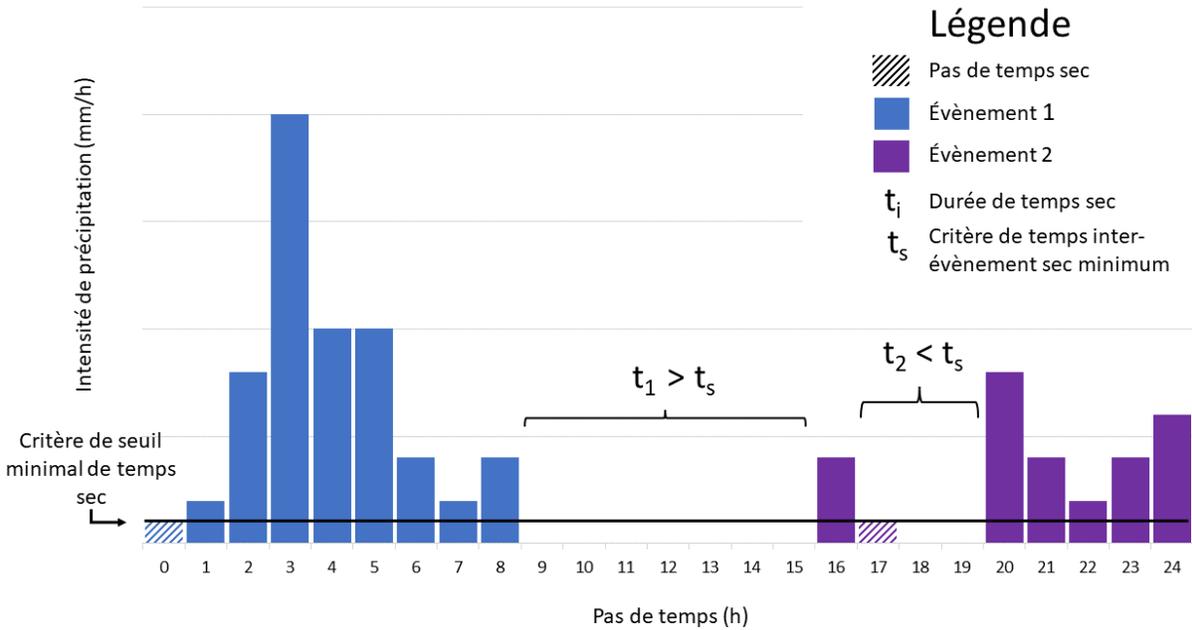
Le critère de seuil minimal de temps sec est utilisé pour différencier un pas de temps humide d'un pas de temps sec. Plus précisément, cette valeur représente l'intensité de pluie sous laquelle les

valeurs de précipitations sont considérées comme étant non significatives. Des exemples peuvent être trouvés dans la littérature. Un seuil de 0,25 mm, soit une bascule de l'auget d'un pluviomètre d'un centième de pouce, peut être suffisant (Adams *et al.*, 1986). Un seuil d'une bascule par 10 minutes peut être utilisé pour enlever les pas de temps qui rallongent l'événement sans apport significatif de précipitation (Gaál *et al.*, 2014). Un seuil de 0,51 mm/h peut également être choisi (Powell *et al.*, 2007). Un seuil de 0,3 mm par 6 h permet d'ignorer une bascule de 0,2 mm, sur une période inter-événement sèche minimale de 6 h (MELCC, 2020).

Le critère de temps inter-événement sec minimal est utilisé pour séparer des événements rapprochés. Si deux événements sont séparés par une durée sèche inférieure au temps inter-événement sec minimal, ils sont considérés comme faisant partie d'un même phénomène météorologique. Dans la littérature, la longueur du temps inter-événement sec minimal peut varier de 15 minutes jusqu'à 72 h. En règle générale, un critère de temps inter-événement long cible des événements de pluie indépendants, mais va nécessairement inclure de plus longues périodes sèches à travers des périodes humides. Tout dépendant de l'application, il peut y avoir un compromis à faire entre l'indépendance des événements et la longueur des périodes sèches acceptable à travers un même événement (Dunkerley, 2008). Un temps inter-événement sec minimal de 12 h est utilisé dans une étude en milieu semi-aride pour permettre à la surface du sol de sécher avant un autre événement (Bracken *et al.*, 2008). Dans le cas d'un sous-bassin urbain où il faut identifier des événements de moins d'une heure, 15 minutes de temps inter-événement est suffisant (Carbone *et al.*, 2015). Pour repérer les événements de courtes durées, un temps inter-événement équivalent à 30 % de la durée de l'événement peut être utilisé (Powell *et al.*, 2007). Une valeur de temps inter-événement de 6 h est souvent utilisée dans le cadre d'études sans qu'il y ait d'explication (Amponsah *et al.*, 2019; Driscoll *et al.*, 1989; Guo & Adams, 1998; Gyasi-Agyei & Melching, 2012; Huff, 1967). Similairement, à faute d'information, le Guide de gestion des eaux pluviales du MELCC suggère qu'une durée entre 3 et 6 h est suffisante dans la plupart des cas (MDDEP & MAMROT, 2014).

Le critère de seuil minimal de pluie est utile pour filtrer des événements qui ne sont pas d'intérêt au niveau hydrologique. Ce critère peut notamment servir à cibler des événements générant du ruissellement. Cette valeur peut varier entre 0,5 mm à 8 mm, tout dépendant de la localisation du site et de l'application. Pour une étude effectuée à Vancouver, le seuil est établi à 0,5 mm pour ignorer les petites pluies (Adams *et al.*, 1986).

La Figure 2.1 illustre les critères de séparation des événements pluvieux.



**Figure 2.1 Représentation graphique des critères de séparation d'événements pluvieux**

### 2.3.3 Conception

Les pluies de conception sont utilisées dans la pratique de l'ingénierie pour définir un débit ou un volume de conception pour un des éléments d'un réseau d'égout pluvial. Une pluie de conception spécifie une durée, une quantité de pluie, souvent exprimée en hauteur de pluie, et un patron temporel qui répartit les intensités de pluie dans le temps. Une pluie de conception est également intimement liée au concept statistique de période de retour ( $T$ ), qui est la période moyenne entre des événements qui dépassent une ampleur donnée et ce, sur une très longue période. L'Équation 1 présente l'équation de la période de retour, qui est fonction de l'inverse de la probabilité de non-dépassement ( $p = P(X \leq x_T)$ ).

**Équation 1**

$$T = \frac{1}{1-p} = \frac{1}{1-P(X \leq x_T)}$$

Une période de retour sert donc à établir la limite de conception maximale ou le niveau de service de ce qui est conçu (Marsalek & Watt, 1984).

La hauteur de pluie de conception est obtenue grâce aux courbes intensité-durée-fréquence (IDF). Ces courbes sont le résultat d'une analyse statistique des pluies historiques. Selon ces courbes, en choisissant la durée et la fréquence d'une pluie de conception, l'intensité ou la hauteur de pluie totale est donnée.

Le pas de temps de l'intensité maximale du patron temporel de la pluie correspond, en milieu imperméable, au pas de temps du débit maximal. Une analyse de réseaux de pluviomètres peut permettre d'établir un patron temporel représentant la réalité des systèmes météorologiques locaux (Marsalek & Watt, 1984). Il existe également des patrons temporels souvent utilisés dans la pratique d'ingénierie, dits patrons synthétiques.

La pluie uniforme (ou « rectangulaire »), comme le nom le suggère, a une intensité uniforme sur toute sa durée et sur l'ensemble du territoire. Ce type de pluie synthétique est valable seulement pour les petits bassins versants. Cette pluie est adaptée pour n'importe quelle durée de pluie totale.

Le hyétogramme synthétique de la pluie Chicago est bâti avec plusieurs points d'une courbe IDF de même récurrence (MDDEP & MAMROT, 2014). La pluie Chicago est recommandée pour la conception d'éléments de stockage, comme pour des bassins de rétention. Le patron temporel de la pluie est adapté pour n'importe quelle durée de pluie totale.

La pluie SEA est dérivée de pluies réelles canadiennes (MDDEP & MAMROT, 2014). Le patron temporel de la pluie a été développé pour des durées de 1 h et 12 h uniquement. La pluie de 1 h, qui est la plus couramment utilisée, a une pointe d'intensité au début de la pluie représentant 29 % de la pluie totale.

La pluie NRCS provient de l'analyse des patrons temporels de pluies réelles des États-Unis (MDDEP & MAMROT, 2014). Le patron est applicable à des durées de 6 h ou 24 h. Il en existe quatre types, tout dépendant de la région à l'étude. En pratique, la pluie de 24 h est utilisée en milieu rural, par exemple, pour évaluer les débits pré-développement d'un projet.

Le Tableau 2.7 présente des exemples de pluies de conception utilisées au Canada. À noter que les réseaux d'égout et les bassins de rétention sont généralement conçus pour gérer les pluies moins fréquentes, soit avec des périodes de retour supérieures ou égales à 2 ans. Or, les ouvrages de contrôle à la source ont plutôt pour but de gérer les pluies de récurrence annuelle ou plus fréquentes. Donc, une distinction est faite entre les éléments de contrôle à la source et les éléments en réseau (conduites et bassins de rétention).

**Tableau 2.7 Exemples de pluies de conception utilisées au Canada**

Ville	Objectif	Objectifs de conception	Source
Québec	Contrôle qualitatif	Traiter une pluie de 26 mm correspondant à 90 % des pluies. Lors de simulations, une pluie Chicago 6 h de 26 mm en climat futur est utilisée.	Ville de Québec (s.d.)
	Contrôle quantitatif des éléments en réseau	Définir les pluies pré-développement pour les périodes de retour de 1 an, 10 ans et 100 ans avec une pluie NRCS type II. Pour les projets de plus de 2 ha, concevoir les éléments en fin de réseau avec une pluie Chicago d'une durée de 3 h en climat futur. Pour les projets de moins de 2 ha, une pluie uniforme est utilisée.	
Toronto	Contrôle quantitatif des éléments en réseau	Pluie Chicago de 6 h de récurrence 2 ans pour le réseau mineur et 100 ans pour le réseau majeur	Ville de Toronto (2021)
	Contrôle quantitatif pour éléments de contrôle à la source	Retenir une pluie de 5 mm sur 24 h	City of Toronto (2006)
Vancouver	Contrôle quantitatif des éléments en réseau (pour bassin versant de plus de 10 ha)	Utiliser la pluie de conception la plus conservatrice entre une SEA 1 h, 2 h, 6 h ou une SCS Type 1A 24 h de récurrence 2, 10 ou 25 ans pour le réseau mineur et 100 ans pour le réseau majeur	City of Vancouver (2018)
	Contrôle quantitatif pour éléments de contrôle à la source	Retenir les premiers 24 mm d'une pluie uniforme, représentant 70 % de la hauteur totale d'une pluie de récurrence 1 an	
	Contrôle qualitatif pour éléments à la source	Traiter les premiers 48 mm d'une pluie uniforme, représentant 90 % de la hauteur totale d'une pluie de récurrence 1 an	
Calgary	Contrôle quantitatif	Pluie de type Chicago d'une durée au minimum deux fois le temps de concentration du bassin versant ou de 24 h pour la conception de bassins de rétention	City of Calgary (2011)
	Contrôle qualitatif	Pluie de 15 mm de patron temporel semblable à une pluie 1 h SEA	

### 3 MÉTHODOLOGIE

#### 3.1 Suivis des ouvrages de contrôle à la source des eaux pluviales

Dans cette section, il sera tout d'abord question de présenter le site à l'étude et la méthodologie utilisée pour effectuer son suivi hydrologique et épuratoire des ouvrages de contrôle à la source.

##### 3.1.1 Présentation générale du site à l'étude

Le site à l'étude dans le cadre du projet est le stationnement incitatif écologique de Boucherville. Le stationnement est situé à l'intersection de la bretelle de sortie 18 de l'autoroute 132 et du boulevard de Montarville. Les eaux pluviales du site sont gérées par des infrastructures de contrôle à la source des eaux pluviales, un séparateur hydrodynamique et un bassin de rétention régulé. L'exutoire du bassin se rejette dans une conduite d'égout pluviale en bordure de l'autoroute 132. Le site a une superficie totale de 1,20 ha, qui inclut le stationnement incitatif (1,12 ha) et le bassin de rétention (0,08 ha). La Figure 3.1 illustre la localisation du site, du bassin et de l'exutoire par rapport aux environs.

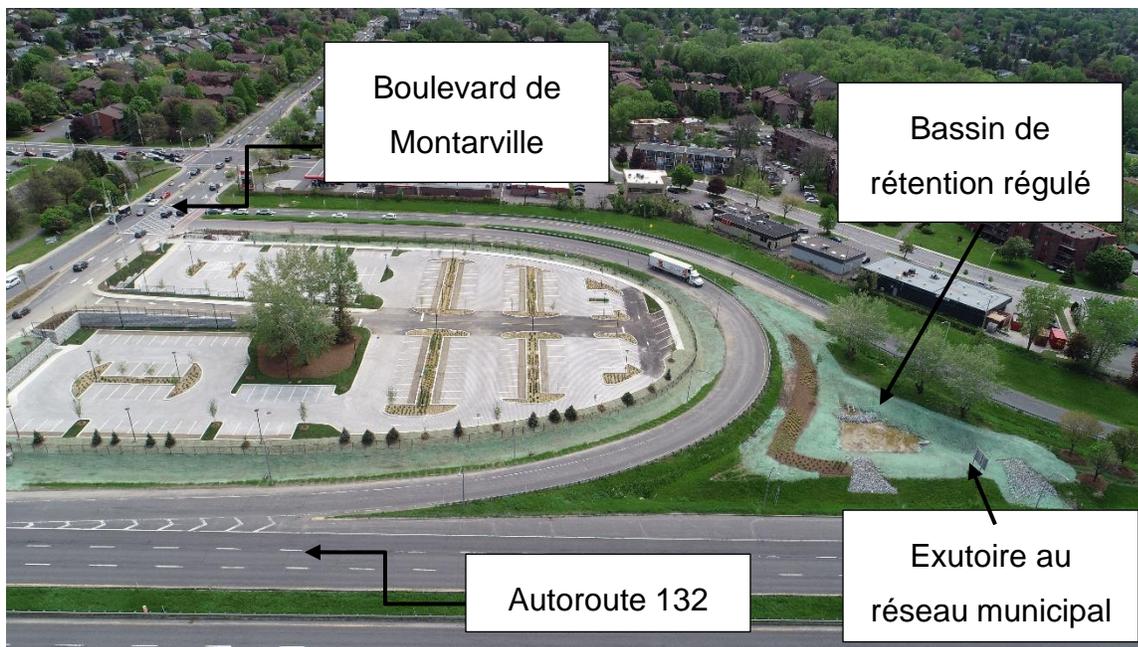


Figure 3.1 Vue aérienne du stationnement incitatif de Boucherville

### 3.1.2 Infrastructures de contrôle à la source

Les infrastructures de contrôle à la source représentent 60 % de la superficie du stationnement ; les eaux de ruissellement d'environ 58 % de la superficie imperméable du stationnement sont drainées vers les infrastructures de contrôle à la source. Les eaux de ruissellement qui ne passent pas par ces infrastructures sont soit dirigées vers le fossé qui entoure le stationnement ou acheminées directement au réseau pluvial par des puisards.

Sur le site, on retrouve des cellules de biorétention, du pavage perméable à interbloc et du pavage perméable alvéolé. La Figure 3.2 montre les infrastructures de contrôle à la source présentes sur le site.

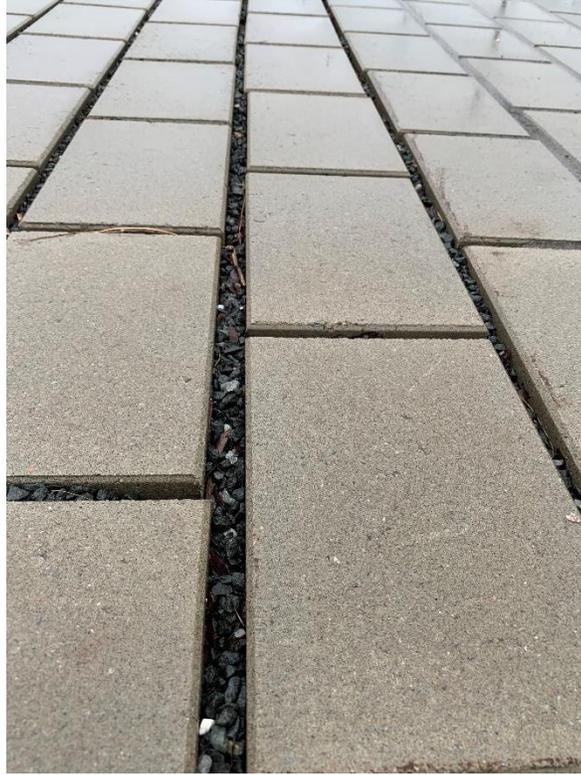


**Figure 3.2** Vue d'une cellule de biorétention, du pavage alvéolé et du pavage perméable

L'annexe I contient les coupes-types de tous les types d'infrastructures de contrôle à la source.

#### 3.1.2.1 Pavage perméable à interbloc

La majorité du site est recouvert de pavage perméable à interbloc de type Inflo, fabriqué par Techo-Bloc. La Figure 3.3 présente une vue du pavage à interbloc sur le site.



**Figure 3.3 Pavage perméable à interbloc de type Inflo**

La superficie totale du pavage perméable à interbloc est de 0,52 ha. La Figure 3.4 localise le pavage en question.



**Figure 3.4 Localisation du pavage perméable à interbloc montrée en bleu (adapté de Google Maps, 2021)**

La zone de pavage perméable reçoit majoritairement les eaux de ruissellement en provenance de la bande centrale de pavage imperméable ainsi que la pluie qui tombe directement sur le pavage perméable. La superficie imperméable totale dont les eaux de ruissellement sont dirigées vers du pavage perméable est de 0,038 ha. Le ratio de superficie imperméable drainée par unité d'aire de pavage est donc de 0,07:1.

Dû au taux d'infiltration élevé du pavage perméable de Techo-Bloc, aucun ruissellement n'a été observé sur celui-ci pendant les visites sur le site. Les eaux pluviales infiltrées dans les joints remplis de granulats grossiers sont filtrées par des couches de matériel granulaire de 750 mm sous-jacentes. La couche de granulats sous la chaussée est disponible pour le stockage de l'eau de ruissellement et de pluie. Une série de drains disposés sous la chaussée collecte ensuite l'excédent d'eau n'étant pas infiltré par le sol sous-jacent. Les drains ont un diamètre de 100 mm, sont entourés d'une membrane de géotextile et sont situés au fond de l'infrastructure.

Certaines sections de pavage perméable ont été imperméabilisées en ajoutant un polymère dans les interstices entre les blocs. Ce changement a pour but d'augmenter les apports d'eau aux cellules de biorétention. La Figure 3.5 montre les espaces imperméabilisés entre les blocs.



**Figure 3.5 Imperméabilisation des interstices entre les blocs de pavage**

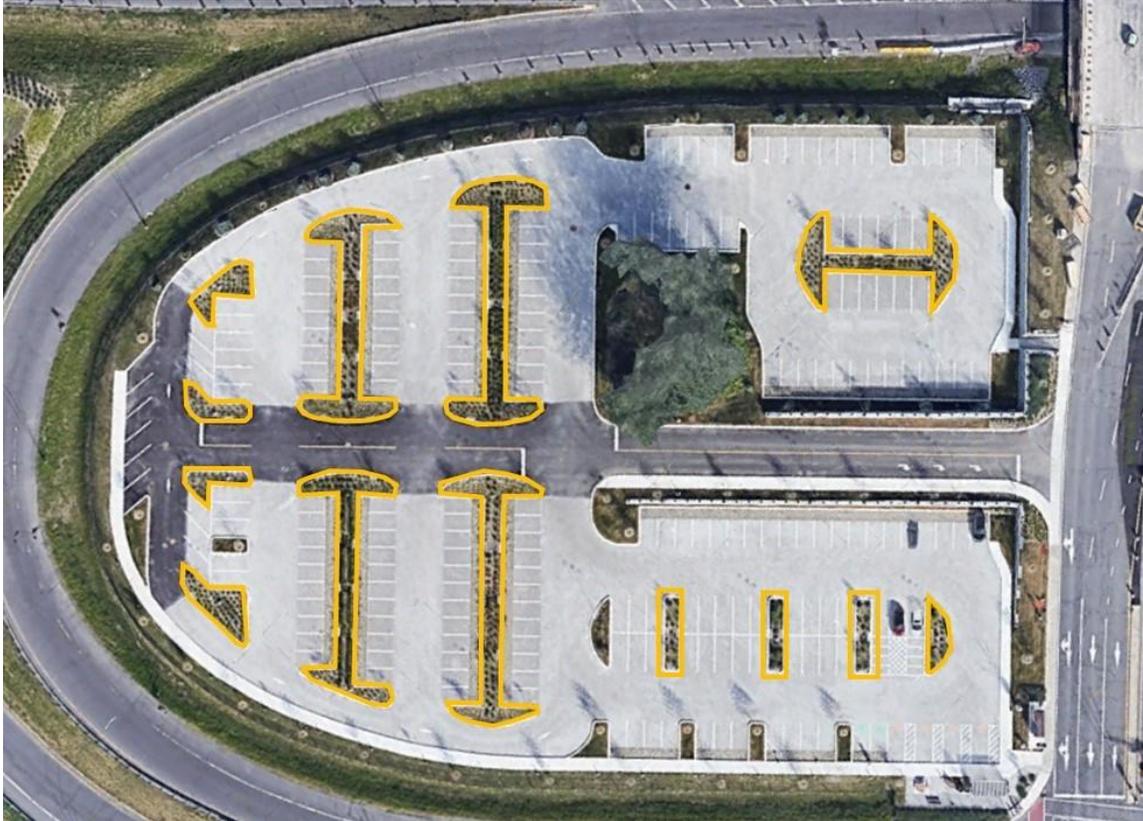
La Figure 3.6 localise les endroits imperméabilisés.



**Figure 3.6 Localisation du pavage perméable imperméabilisé avec un polymère dans les encadrés en vert (adapté de Google Maps, 2021)**

### 3.1.2.2 Cellules de biorétention

Il y a en tout 13 cellules de biorétention sur le site. Celles-ci sont situées dans les terre-pleins du stationnement. La Figure 3.7 présente la localisation des cellules de biorétention.



**Figure 3.7 Localisation des cellules de biorétention dans les encadrés en jaune (adapté de Google Maps, 2021)**

Les cellules de biorétention reçoivent les eaux de ruissellement en provenance de la bande centrale de pavage imperméable et des aires de pavage perméable imperméabilisées avec un polymère. Le ratio de superficie imperméable drainée par unité d'aire de cellule de biorétention varie entre 0:1 et 2:1 pour chaque cellule de biorétention.

Les eaux de ruissellement entrent dans les cellules de biorétention par des abaissements dans la bordure entourant celles-ci. Le nombre de bordures arasées par cellule de biorétention varie de 1 à 10 selon leur superficie et leur configuration. Théoriquement, les eaux sont ensuite dirigées vers des bassins de stockage de sédiments, où une décantation peut être effectuée. La Figure 3.8 illustre une bordure arasée et un bassin de stockage de sédiments. Dans le cas présenté, puisqu'il existe un espace entre la bordure arrasée et le bassin de stockage de sédiments, l'eau s'infiltre directement dans la cellule de biorétention.



**Figure 3.8 Abaissement de la bordure et bassin de stockage des sédiments à l'entrée des cellules de biorétention**

Les eaux de ruissellement sont par la suite filtrées par des couches de terreau et de sable drainant. Selon la capacité d'infiltration du sol sous-jacent, l'eau est ensuite infiltrée dans celui-ci et l'excédent est véhiculé dans un système de drains perforés souterrains de 100 mm de diamètre, situé au fond de l'infrastructure. La Figure 3.9 présente la sortie des drains perforés souterrains des cellules de biorétention.



**Figure 3.9 Sortie des drains perforés sous le média filtrant de la biorétention dans le puisard de trop-plein**

Si la capacité d'évacuation des drains est atteinte, les cellules de biorétention peuvent accumuler au maximum, au point le plus bas, 250 mm d'eau avant que l'eau déborde dans des puisards de trop-plein. La Figure 3.10 présente le trop-plein d'une cellule de biorétention.



**Figure 3.10 Puisard de trop-plein dans une biorétention**

Une couche de terreau de 400 mm, en son épaisseur la plus faible, est mise en place pour permettre la croissance d'arbres et d'arbustes. Des unités « Rootspace » sont aussi installées aux pourtours des aires de biorétention pour soutenir le pavage et faire place aux racines profondes des végétaux. Les compositions des terreaux utilisés sont présentées au Tableau 3.1.

**Tableau 3.1- Composition des terreaux de plantation**

	Travaux de plantation d'arbustes et de vivaces	Travaux de plantation d'arbres et d'engazonnement
Caractéristiques	Valeur	
pH	6-7	6-7
Matière organique	10-15%	4-7%
Capacité d'échange cationique	≥ 10 méq. / 100 g de sol	10-20 méq. / 100 g de sol
Salinité	< 3,5 mmhos/cm	< 1,25 mmhos/cm
Tassement	-	25%
Phosphore	> 63 ppm	> 27 ppm
Potassium	> 126 ppm	> 126 ppm
Magnésium	> 151 ppm	> 151 ppm
Calcium	> 1000 ppm	> 1001 ppm
Composition	Compost, sable, terre arable, terre noire	Compost, sable, terre arable, terre noire

Les terreaux sont conçus pour requérir un minimum d'arrosage, d'engrais et d'entretien. La mise d'engrais se fait une fois par année, au printemps, où on asperge de l'engrais soluble de démarrage composé d'azote total, d'acide phosphorique assimilable et de potasse soluble. Quant au taillage des arbustes, il est fait à l'automne. Aucun arrosage des plantes n'est prévu par le plan d'entretien.

Les plantes placées dans les aires de biorétention sont présentées avec leurs caractéristiques aux Tableau 3.2, Tableau 3.3 et Tableau 3.4.

**Tableau 3.2 Caractéristiques des arbres plantés dans les cellules de biorétention**

Forme biologique	Famille	Genre, espèce et variété	Tolérance à la sécheresse	Tolérance aux inondations	Tolérance aux sels	Luminosité requise	Enracinement	Références
Arbre	Cannabaceae	<i>Celtis occidentalis</i>	Haute	Faible à moyenne (peu fréquentes et courte durée)	Moyenne	Plein soleil ou mi-soleil	Superficiel à profond selon le type de sol	Gouvernement du Québec (2014); Société Québécoise de Phytotechnologie (2018); Université Cornell (2022)
	Fabaceae	<i>Gleditsia triacantho 'inermis'</i>	Haute	Moyenne	Haute	Plein soleil	Intermédiaire	Paquette (2016); Soverdi (s.d-b); Université Cornell (2022)
		<i>Gymnocladus dioicus</i>	Haute	Faible à moyenne (peu fréquentes et courte durée)	Haute	Plein soleil	Profond	Environnement Canada (2014); Paquette (2016); Soverdi (s.d-c); Université Cornell (2022)
	Ginkgoaceae	<i>Ginkgo biloba</i>	Haute	Faible	Moyenne	Plein soleil	Superficiel	Paquette (2016); Soverdi (s.d-a); Université Cornell (2022)
	Pinaceae	<i>Larix laricina</i>	Moyenne	Moyenne	Haute	Plein soleil	Superficiel	FIHOQ et AQPP (2008); Gouvernement du Québec (2014); Société Québécoise de Phytotechnologie (2018); Université Cornell (2022)
	Ulmaceae	<i>Ulmus x</i>	Moyenne à haute	Moyenne à haute	Moyenne	Plein soleil	Superficiel à profond selon le type de sol	Gouvernement du Québec (2014); Paquette (2016); Sheridan <i>et al.</i> (2010); Université Cornell (2022)

**Tableau 3.3 Caractéristiques des arbustes plantés dans les cellules de biorétention**

Forme biologique	Famille	Genre, espèce et variété	Tolérance à la sécheresse	Tolérance aux inondations	Tolérance aux sels	Luminosité requise	Enracinement	Références
Arbuste	Anacardiaceae	<i>Rhus aromatica</i>	Haute	Faible	Moyenne	Plein soleil ou mi-soleil	Superficiel	FIHOQ et AQPP (2008); Université Cornell (2022)
	Caprifoliaceae	<i>Symphoricarpos albus</i>	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Plein soleil ou mi-soleil	Superficiel	Credit Valley Conservation (2018); FIHOQ et AQPP (2008); Université Cornell (2022)
	Cornaceae	<i>Cornus stolonifera</i> 'Kelsey'	Moyenne	Haute	Haute	Plein soleil ou mi-soleil	Superficiel	FIHOQ et AQPP (2008); Gouvernement du Québec (2014); Université Cornell (2022)
	Diervillaceae	<i>Diervilla lonicera</i>	Moyenne	Faible	Moyenne	Plein soleil ou mi-soleil	Superficiel	Credit Valley Conservation (2018); FIHOQ et AQPP (2008); Université Cornell (2022)
	Hypericaceae	<i>Hypericum kalmianum</i>	Moyenne	Faible	Moyenne	Plein soleil	Superficiel	Sheridan <i>et al.</i> (2010); Université Cornell (2022)
	Rosaceae	<i>Sorbaria sorbifolia</i> 'Sem'	Haute	Haute	Faible	Plein soleil ou mi-soleil	Superficiel	Université Cornell (2022)
		<i>Rosa blanda</i>	Haute	Faible	Moyenne	Plein soleil	Superficiel	Credit Valley Conservation (2018); FIHOQ et AQPP (2008); Université Cornell (2022)
	Salicaceae	<i>Salix repens</i>	Haute	Haute	Faible	Plein soleil	Superficiel	Bleu Laurentides (s.d); Université Cornell (2022)
<i>Salix purpurea</i> 'Gracillis'		Moyenne	Haute	Faible	Plein soleil	Superficiel	Bleu Laurentides (s.d); Université Cornell (2022); University of Illinois (2022)	

**Tableau 3.4 Caractéristiques des herbacés plantés dans les cellules de biorétention**

Forme biologique	Famille	Genre, espèce et variété	Tolérance à la sécheresse	Tolérance aux inondations	Tolérance aux sels	Luminosité requise	Enracinement	Références
Herbacé non-graminoïde	Asteraceae	<i>Rudbeckia fulgida</i> 'Pot of Gold'	Haute	Moyenne (peu fréquentes et courte durée)	Haute	Plein soleil	Superficiel	Credit Valley Conservation (2018)
	Rosaceae	<i>Alchemilla mollis</i>	Faible	Haute	Moyenne	Plein soleil ou mi-soleil	Superficiel	Department of Environmental Resources (2007); Glen (2020); Ville de Lévis (s.d)
	Xanthorrhoeaceae	<i>Hemerocallis</i> 'Commendment'	Moyenne	Moyenne (peu fréquentes et courte durée)	Haute	Plein soleil ou mi-soleil	Superficiel	Credit Valley Conservation (2018)
		<i>Hemerocallis</i> 'Pink Prelude'						
<i>Hemerocallis</i> 'Stella del Oro'								
Herbacé graminoïde	Poaceae	<i>Panicum virgatum</i> 'Shenandoah'	Haute	Haute	Haute	Plein soleil ou mi-soleil	Superficiel	Department of Environmental Resources (2007); NYC Parks and Recreation (s.d); Ville de Lévis (s.d)
		<i>Sesleria autumnalis</i>	Haute	Faible	Haute	Plein soleil ou mi-soleil	Superficiel	HRGreen (s.d)

### 3.1.2.3 Pavage perméable alvéolé

Le dernier type d'infrastructure de contrôle à la source des eaux pluviales présent sur le site est le pavage perméable alvéolé de type Cassara Verde. La Figure 3.11 présente une vue du pavage alvéolé sur le site.



**Figure 3.11 Pavage alvéolé**

Le pavage alvéolé reçoit les eaux de ruissellement en provenance des aires de pavage perméable imperméabilisé avec du polymère. Le ratio de superficie imperméable drainée par unité d'aire de pavage alvéolé est environ de 2:1. La Figure 3.12 localise le pavage perméable alvéolé.



**Figure 3.12 Localisation du pavage alvéolé dans les encadrés en orange (adapté de Google Maps, 2021)**

Tout comme pour le pavage à interbloc, les eaux pluviales s'infiltrant dans le pavage perméable alvéolé sont filtrées par des couches sous-jacentes de matériel granulaire de 750 mm. Des drains disposés sous la chaussée collectent ensuite l'excédent d'eau ne s'étant pas infiltré dans le sol sous-jacent. Les drains ont un diamètre de 100 mm, sont entourés d'une membrane de géotextile et sont situés dans le fond de l'infrastructure.

### **3.1.3 Schéma d'écoulement**

Le drainage sur le stationnement doit être bien caractérisé pour évaluer l'efficacité et la performance des ouvrages. La Figure 3.13 présente le schéma de drainage des eaux de surface sur le site d'étude.



**Figure 3.13 Puisards et direction du drainage sur le site**

À noter que l'eau tombant sur le pavage perméable à inter-bloc ne ruisselle pas dû au taux d'infiltration élevé de l'infrastructure.

La Figure 3.14 présente le schéma d'écoulement dans les drains, conduites et regards sur le site.



**Figure 3.14 Écoulement souterrain sur le site**

### 3.1.4 Particularités du site

Seulement une partie du site a été étudié dans le cadre de ce projet. La zone choisie se draine en un même point où des mesures de débit peuvent être collectées. La Figure 3.15 montre la partie du site qui a été étudiée.



**Figure 3.15 Localisation de la partie du site à l'étude (délimitée par la ligne rouge pointillée)**

Bien qu'il y ait plusieurs types d'ouvrages sur le site, les drains perforés souterrains les relient toutes ensemble. Il est donc difficile de préciser la provenance des eaux récoltées à la sortie des drains. Seuls les drains entourant le puisard P2 (voir Figure 3.14) sont séparés des drains des cellules de biorétention.

Le sol sous-jacent au site, selon les forages effectués pour le rapport géotechnique, est composé d'une couche de remblai de silt argileux avec un peu de sable et des traces de gravier brun. La couche de remblai est humide et de compacité lâche. Sous cette couche, on retrouve le sol naturel, soit du silt argileux de compacité moyenne, suivi d'une couche de silt sableux et d'une couche de roc fracturé (Groupe-Conseil Génipur, 2018).

Le site est entouré d'un fossé qui draine les eaux de la bretelle de l'autoroute 132. Le site est surélevé par rapport au fossé et à l'autoroute. La Figure 3.16 illustre le fossé et l'autoroute vus du site.



**Figure 3.16** Vue du fossé et de l'autoroute 132 à partir du site

### **3.1.5 Suivi hydrologique**

Un suivi hydrologique des ouvrages a été réalisé. Cette section décrit les instruments installés, la méthode de séparation des événements pluvieux et la manière dont l'efficacité hydrologique des infrastructures a été mesurée.

#### *3.1.5.1 Pluviomètre*

Un pluviomètre chauffant à auget basculant de type HOBO S-RGB-M002 a été installé sur le toit du complexe aquatique Laurie-Ève-Cormier, à 400 m du site. Chaque bascule du pluviomètre mesure 0,2 mm d'eau et chaque lecture du pluviomètre a une précision de  $\pm 1,0\%$ . L'ajout du module chauffant a permis au pluviomètre de rester en fonction du 5 août 2020 au 16 novembre 2021, sans interruption durant la période hivernale. Lors de l'installation, une attention particulière a été apportée pour s'assurer qu'aucun obstacle pouvant affecter les enregistrements n'était à proximité du pluviomètre (MDDEFP, 2013). De plus, une calibration de terrain du pluviomètre a été effectuée avant son installation.

Les mesures ont été prises à un intervalle de 5 minutes et étaient transmises par connexion cellulaire chaque jour. La Figure 3.17 présente le montage du pluviomètre.



**Figure 3.17 Pluviomètre à auget basculant**

La Figure 3.18 illustre la localisation du site à l'étude et du pluviomètre sur le toit du complexe aquatique.

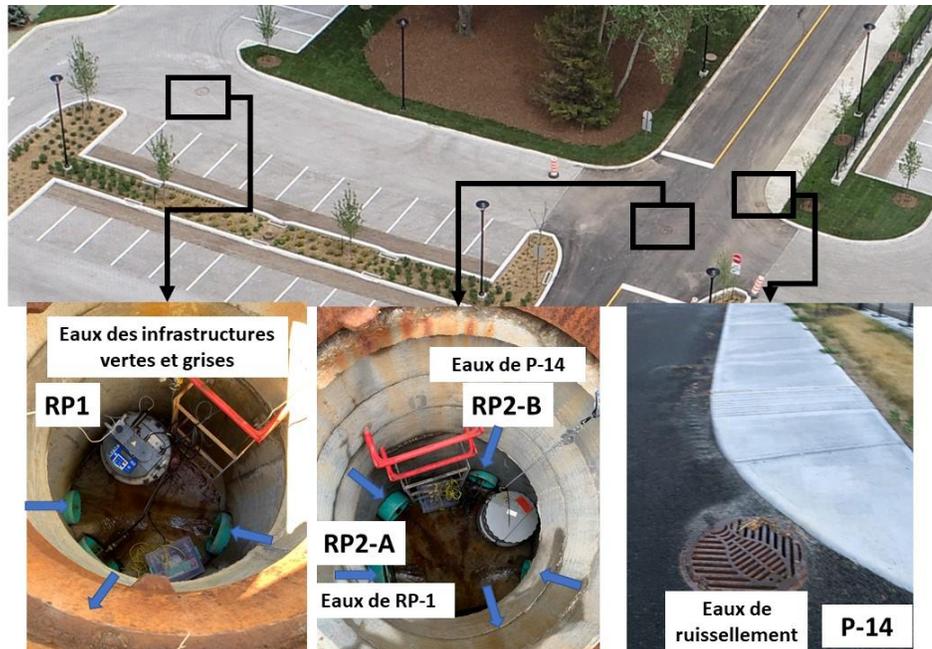


**Figure 3.18 Localisation du pluviomètre par rapport au site (adapté de Google Maps, 2021)**

### 3.1.5.2 Mesure de débit

Trois types de sondes et un déversoir à jaugeage volumétrique ont été installés sur le site pour mesurer le débit sortant des ouvrages. En théorie, il aurait été préférable de mesurer le débit de chaque infrastructure séparément, mais tel que mentionné précédemment, les drains relient toutes les infrastructures ensemble, à l'exception du puisard P2. Or, les débits et hauteurs d'eau

sont trop faibles dans les drains de ce puisard pour l'instrumenter. C'est donc le débit des eaux sortant de toutes les infrastructures de la zone d'étude (voir Figure 3.15) qui est mesuré. La Figure 3.19 montre la localisation des équipements.

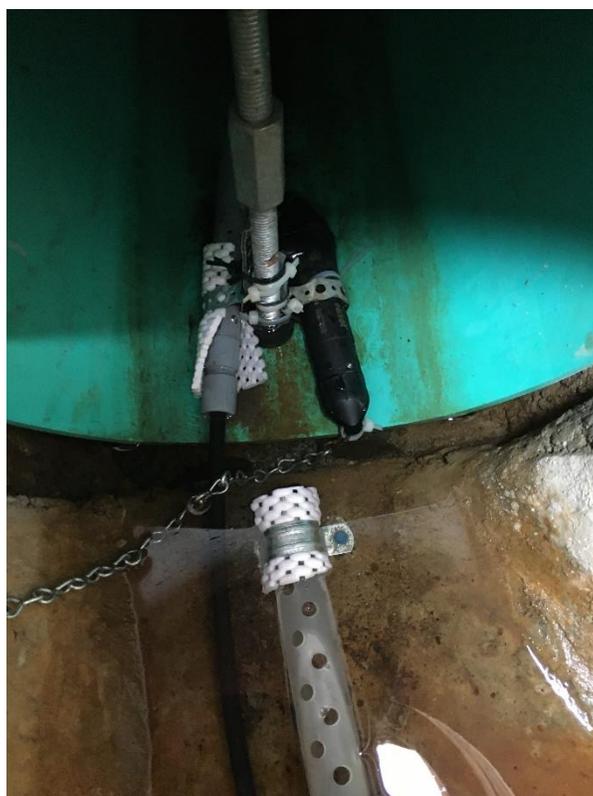


**Figure 3.19 Localisation des équipements de mesure de débit**

Une sonde de pression de type HOB0 U20L-04 a été en fonction du 5 août au 9 décembre 2020 à la localisation RP1 et du 9 avril au 16 novembre 2021 à la localisation RP2-A. À la localisation RP1, la sonde permettait d'estimer les débits effluents (en fonction de la hauteur d'eau) et de valider les données lors de l'installation d'une autre sonde à partir du 22 octobre 2021. À la localisation RP2-A, la sonde permettait de mesurer la hauteur d'eau au déversoir et ainsi de mesurer le débit effluent des infrastructures. Les deux sondes HOB0 ont permis de déterminer la hauteur d'eau sortant des infrastructures en mesurant la pression barométrique et la pression totale à un intervalle régulier de 5 minutes. En effet, la sonde HOB0 dans la conduite mesure la pression totale, composée de la pression de l'eau par-dessus la sonde et de la pression atmosphérique. La deuxième sonde mesure la pression atmosphérique uniquement. Le logiciel HOB0ware Pro permet de compenser les données de pression totale pour les convertir en hauteur d'eau par-dessus la sonde. La sonde HOB0 a une résolution de 1,4 mm et une précision de  $\pm 0,4$  mm.

Une sonde de pression ISCO 720 pour échantillonneur automatique de type 6712 a été mise en fonction du 19 novembre au 9 décembre 2020 et du 9 avril au 16 novembre 2021 à la localisation

RP1. La sonde servait principalement à démarrer et arrêter l'échantillonneur automatique qui récoltait les eaux à la sortie des infrastructures. Or, les données ont également été utilisées pour vérifier les données des autres sondes. L'appareil est à compensation barométrique automatique et a été calibré directement sur le terrain. La précision de l'appareil est de 0,008 m/m, tandis que sa résolution est de 0,6 mm. Les données y ont été enregistrées aux 5 minutes. Les sondes HOBO et ISCO peuvent être visualisées à la Figure 3.20.



**Figure 3.20 Sondes HOBO (à droite) et ISCO (à gauche)**

Une sonde de pression Global Waters WL16U a été installée du 22 octobre au 19 novembre 2020 pour mesurer la hauteur d'eau au déversoir, soit à la localisation RP2-A. La sonde Global Waters a une précision de  $\pm 1$  mm et est à compensation barométrique automatique. Elle a dû être calibrée avant son déploiement sur le terrain grâce au logiciel fourni par Global Waters. Ses données ont été enregistrées à un intervalle de 5 minutes. La Figure 3.21 présente le montage de la sonde Global Waters.



**Figure 3.21 Sonde Global Waters**

Toutes les sondes ont été maintenues en place grâce à un montage de tiges filetées et écrous, visible aux Figure 3.20 et Figure 3.21. Le montage et les sondes ont été enlevés durant l'hiver, car les sondes ne résistent pas à des températures sous zéro degré. À noter que le diamètre de la tige filetée peut créer des perturbations et ainsi affecter la hauteur d'eau mesuré. Pour un autre projet, il serait préférable de réduire le diamètre de la tige ou de trouver un autre moyen de fixer la sonde.

Pour convertir les hauteurs d'eau en débit, un déversoir à jaugeage volumétrique a été installé à la localisation RP1-A. Le déversoir a été mis en place le 22 octobre 2020 et retiré le 16 novembre 2021. Le déversoir, de 15 pouces de diamètre, provient de la compagnie Thel-Mar et est de type combiné, c'est-à-dire qu'il est rectangulaire, mais dispose d'une portion triangulaire dans le bas pour mesurer les plus petits débits. La Figure 3.22 montre le déversoir à jaugeage volumétrique.



**Figure 3.22 Déversoir à jaugeage volumétrique**

### *3.1.5.3 Séparation et caractérisation d'évènements pluvieux*

Pour évaluer la performance des ouvrages, il a d'abord fallu séparer les données pluviométriques en évènements pluvieux. Comme il a été vu dans la revue de littérature, plusieurs critères et méthodes peuvent être utilisés pour séparer des évènements pluvieux et le choix doit être fait en fonction de l'application et des spécificités du site à l'étude.

Pour le stationnement incitatif de Boucherville, les critères de séparation retenus sont un seuil d'intensité minimale de 0,6 mm/h, une hauteur totale minimale de 2 mm et un temps inter-évènement sec de 7 h. Le raisonnement derrière le choix d'un seuil d'intensité repose sur les observations faites sur le terrain ; en effet, selon les données de débit récoltées à la sortie d'un puisard, il n'y a pas de ruissellement sur le site sous une intensité de 0,6 mm/h. Donc, à partir de 0,6 mm/h, les évènements sont pertinents à analyser. La hauteur minimale de 2 mm permet de retirer les événements qui ont peu d'impacts hydrologiques sur le site. Le temps sec de 7 h a été choisi car, selon les observations sur le site, les conditions initiales d'humidité dans les cellules de biorétention et dans les couches de stockage sont la plupart du temps récupérées pour des durées de temps sec supérieures ou égales à 7 h. À noter que ces critères sont spécifiques au site de Boucherville et pour la période étudiée.

Les évènements identifiés ont ensuite été caractérisés selon leurs durée, hauteur totale, temps antécédent sec, intensité moyenne, intensité maximale sur 5 minutes et période de retour.

Pour déterminer la période de retour, l'analyse a été effectuée sur les intensités maximales reliées à plusieurs durées. Par exemple, pour une pluie d'une durée de 6,5 h, les intensités maximales sur 5, 10, 15 et 30 min ainsi que sur 1, 2, 6 et 6,5 h ont été calculées et comparées aux courbes IDF de l'aéroport de St-Hubert d'Environnement Canada (Environnement et Changement climatique Canada, 2019). La période de retour caractérisant l'évènement fait référence à la période de retour maximale de toutes les durées.

#### 3.1.5.4 Réduction du débit de pointe

Une façon de déterminer la performance et l'efficacité des ouvrages est de calculer la réduction du débit de pointe. Pour ce faire, un modèle hydrologique et hydraulique du site a été créé pour estimer les débits de ruissellement qui auraient eu lieu sur un stationnement entièrement imperméable ayant la même superficie que la zone d'étude. Le logiciel PCSWMM a été choisi (Computational Hydraulics International, 2022). Ce logiciel, basé sur EPA-SWMM, est fréquemment utilisé dans le domaine des eaux pluviales pour modéliser le ruissellement et l'écoulement dans les réseaux à partir des caractéristiques des sous-bassins versants et des processus hydrologiques. Le modèle PCSWMM du site imperméabilisé créé a été utilisé pour calculer, pour chaque évènement, le débit de pointe du ruissellement sur une surface entièrement imperméable,  $Q_e$ . Les caractéristiques du modèle PCSWMM sont présentées en annexe. Quant au débit de pointe pour l'effluent à la sortie de la zone d'étude,  $Q_s$ , il a été tiré des observations sur le terrain. L'Équation 2 a ensuite permis de calculer le pourcentage de réduction du débit de pointe pour chaque évènement.

**Équation 2** 
$$\%RQ = \frac{Q_e - Q_s}{Q_e} * 100\%$$

#### 3.1.5.5 Décalage du débit de pointe

Un décalage peut être mesuré entre l'heure du débit de pointe selon le modèle PCSWMM pour un stationnement imperméabilisé à 100%,  $t_e$ , et l'heure du débit de pointe à l'effluent des infrastructures de la zone d'étude selon les observations des sondes de pression,  $t_s$ . L'Équation 3 montre le calcul pour trouver le décalage du débit de pointe.

**Équation 3** 
$$DQ = t_e - t_s$$

### 3.1.5.6 Évaluation de la réduction du volume de ruissellement

Une autre manière de mesurer la performance des infrastructures est de mesurer la réduction du volume de ruissellement. Comme les infrastructures de contrôle à la source peuvent permettre l'infiltration et l'évapotranspiration des eaux qui ruisselleraient normalement vers le réseau d'égout pluvial, les volumes de ruissellement peuvent être réduits. Pour calculer cette réduction, le modèle PCSWMM du site a été utilisé afin d'estimer les volumes de ruissellement qui seraient générés sur une superficie imperméable équivalente à celle du site à l'étude,  $V_e$ . Ce volume a été comparé au volume véhiculé à la sortie de la zone d'étude, tel que mesuré à l'aide des sondes de pression et du déversoir à jaugeage volumétrique,  $V_s$ . La réduction du volume de ruissellement a été calculée selon l'Équation 4.

**Équation 4** 
$$\%RVol = \frac{V_e - V_s}{V_e} * 100\%$$

### 3.1.6 Suivi physico-chimique

Des équipements ont été installés sur le stationnement incitatif de Boucherville pour effectuer un suivi physico-chimique et pour évaluer l'efficacité épuratoire des infrastructures de contrôle à la source. Cette section décrit les instruments installés, les paramètres analysés, les protocoles utilisés et la méthode pour déterminer l'efficacité épuratoire des infrastructures.

#### 3.1.6.1 Techniques d'échantillonnage

Deux techniques ont été utilisées pour l'échantillonnage : l'échantillonnage manuel et l'échantillonnage automatique. Des échantillonneurs automatiques ont été utilisés pour récupérer les eaux dans le réseau d'égout pluvial aux localisations RP1 et RP2-B, tandis que l'échantillonnage manuel a surtout servi à collecter les eaux de ruissellement de la partie imperméable du stationnement au point P14, comme indiqué à la Figure 3.19. L'échantillonnage manuel a aussi été utilisé pour la collecte des eaux en réseau à l'aide d'une perche à la sortie des ouvrages, pour la période qui a précédé l'installation et la calibration des échantillonneurs automatiques, soit du 11 juillet 2020 au 4 novembre 2020. La Figure 3.25 illustre le fonctionnement de la perche d'échantillonnage.

La méthode d'échantillonnage manuel a été inspirée de Pineau (2019) et de Brodeur-Doucet (2018). Il s'agit d'un échantillonnage composite pour lequel des échantillons de 1 L d'eau de ruissellement ont été pris à des intervalles de temps allant de 1 à 30 min, qui dépendaient de l'intensité de la pluie. Une gouttière en thermoplastique a été utilisée pour faciliter la récupération des eaux de ruissellement. Les échantillons de 1 L ont été mélangés dans un seau et des

échantillons composites ont été collectés de ce mélange pour être analysés au laboratoire. Pour un évènement, le nombre de bouteilles récoltées avec l'échantillonnage manuel variait entre 10 et 18 bouteilles. La Figure 3.23 montre la technique d'échantillonnage manuel.



**Figure 3.23 Méthode d'échantillonnage manuel**



**Figure 3.24 Perche d'échantillonnage**

Des échantillonneurs automatiques ISCO, modèle 6712, ont aussi été installés sur le site. Deux échantillonneurs automatiques ont été installés, soit un pour récupérer les eaux à la sortie des infrastructures de la zone d'étude et un autre pour récupérer les eaux allant directement au réseau d'égout pluvial sans transiter par les ouvrages. Le premier échantillonneur était situé à la localisation RP1, tandis que le deuxième était situé à RP2-B, conformément à la notation présentée préalablement à la Figure 3.19. La vue à l'intérieur du regard de la localisation RP2-B est présentée à la Figure 3.25.



**Figure 3.25 Vue de la crépine (à droite) et de la sonde de pression de l'échantillonneur automatique (à gauche) à l'intérieur du regard RP2-B**

L'échantillonneur au point RP1, qui récoltait l'effluent des ouvrages, a été programmé pour recueillir 50 ml pour chaque intervalle de volume de 60 L. Quant à l'échantillonneur RP2-B, qui récoltait les eaux qui n'avaient pas transité par les infrastructures de contrôle à la source, il prenait un échantillon de 50 ml chaque minute lorsque la hauteur mesurée par la sonde était supérieure à 3 mm. Les détails des sondes branchées aux échantillonneurs sont présentés à la section 3.1.5.2. Les échantillons récupérés sont de type composite et représentent donc la qualité de l'eau sur la totalité de l'évènement pluvieux.

Les échantillonneurs étaient alimentés par une batterie externe marine rechargeable de 100 ampères-heures. Les batteries ont eu une durée de vie maximale de 5 mois, mais, en général elles devaient être rechargées aux 2 mois, tout dépendant des accessoires branchés et de la fréquence de l'échantillonnage.

### 3.1.6.2 Paramètres et protocoles

Les échantillons composites récupérés ont été analysés en laboratoire pour connaître leur concentration en polluants. Le Tableau 3.5 présente les polluants analysés ainsi que les méthodes d'analyse utilisées.

**Tableau 3.5 - Paramètres et méthodes d'analyses**

Paramètre mesuré	Méthode d'analyse
Matières en suspension (MES)	MA.115-S.S. 1.2
Demande chimique en oxygène (DCO)	HACH Method 8000
Azote total (N)	HACH Method 10208
Phosphore total (P)	HACH Method 10209/10210
Conductivité	MA. 115 – Cond. 1.1

Pour conserver les échantillons, tel qu'il est recommandé par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), une glacière remplie de glace a été utilisée. De ce fait, les échantillons étaient conservés aux alentours de 4°C (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2012).

### 3.1.6.3 Calcul de performance épuratoire et taux d'enlèvement

Le calcul du taux d'enlèvement des polluants a été calculé selon l'Équation 5.

**Équation 5** 
$$\text{Enlèvement} = \frac{C_{\text{Entrante}} - C_{\text{Sortante}}}{C_{\text{Entrante}}} * 100\%$$

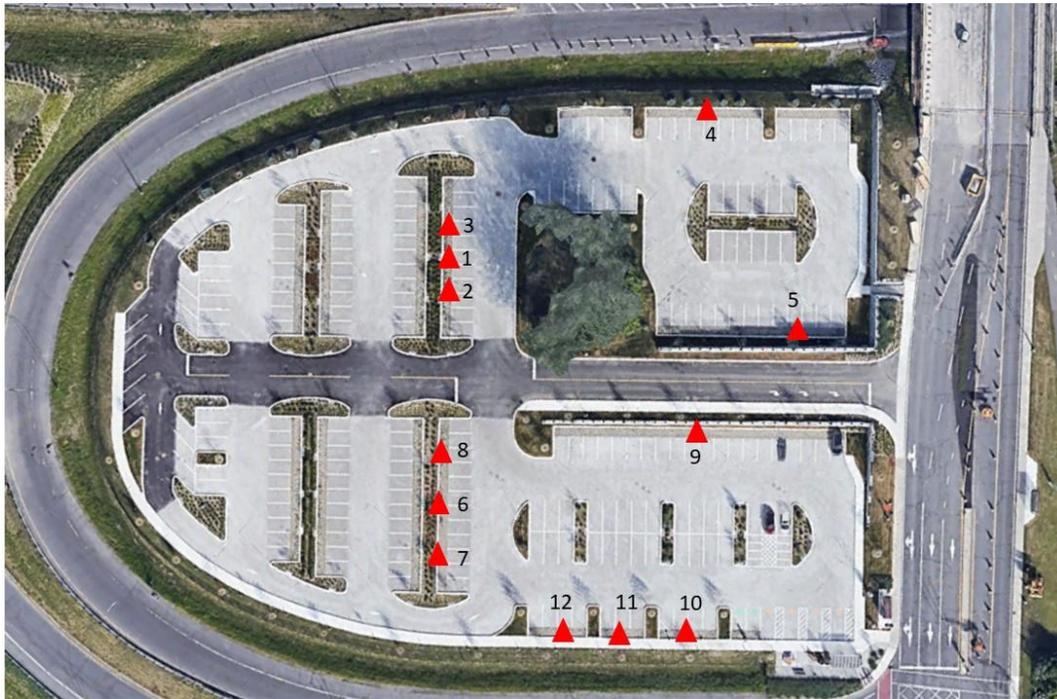
où  $C_{\text{Entrante}}$  est la concentration d'un polluant dans les eaux de ruissellement ou dans les eaux n'ayant pas transité par des infrastructures de contrôle à la source et  $C_{\text{Sortante}}$  est la concentration d'un polluant dans les eaux à la sortie des infrastructures de contrôle à la source.

### 3.1.7 Suivi des végétaux

Un suivi des végétaux a également été réalisé sur le stationnement incitatif de Boucherville. Le suivi a pris deux formes : un suivi de l'évolution de la végétation poussant au travers du pavage alvéolé ainsi qu'un décompte des plantes dans les cellules de biorétention afin de déterminer le taux de survie de celles-ci.

### 3.1.7.1 Suivi du pavage alvéolé

Le suivi du pavage alvéolé a été effectué du 1<sup>er</sup> juin 2021 au 15 septembre 2021 en prenant des photos à 12 endroits. Durant cette période, sept suivis ont été effectués. Les sites variaient en ensoleillement, en quantité de ruissellement reçu et en circulation automobile à proximité. Pour s'assurer de prendre la même photo à la même place durant toute la période de suivi, un cadre de référence de 1 m x 1 m a été utilisé. Les photos ont été analysées par le logiciel Canopeo, qui repère les pixels verts et donne un pourcentage de recouvrement végétal (Oklahoma State University Department of Plant and Soil Sciences, 2022). La Figure 3.26 montre les endroits où le suivi des végétaux sur le pavage alvéolé a été fait.



**Figure 3.26 Localisation des sites de suivi végétal du pavage alvéolé noté par des triangles rouges (adapté de Google Maps, 2021)**

### 3.1.7.2 Survie des végétaux des cellules de biorétention

Pour suivre le taux de survie des végétaux dans les cellules de biorétention, trois décomptes ont été effectués. Ils ont eu lieu le 1<sup>er</sup> juin 2021, le 21 juillet 2021 et le 24 septembre 2021. Les décomptes ont été comparés entre eux et avec le décompte théorique inscrit sur les plans d'implantation pour estimer la survie des plantes depuis la construction du site.

## 3.2 Analyse des pluies historiques

La section 3.2 présente la méthodologie utilisée pour analyser et séparer les pluies historiques en évènements pour pouvoir identifier les patrons temporels. Il sera donc question dans cette section de décrire le réseau pluviométrique de la Ville de Québec et le traitement et la validation des données, ainsi que d'expliquer les critères de séparation d'évènements choisis et la méthode de séparation selon un regroupement des k-moyennes.

### 3.2.1 Description des données du réseau de pluviomètres

Pour étudier les pluies historiques, les données pluviométriques de la Ville de Québec ont été utilisées. La Ville de Québec a en tout 34 pluviomètres sur son territoire avec des données allant de 1999 à 2019. Parmi ceux-ci, 13 pluviomètres sont actifs pendant la période de mai à octobre depuis 1999. Les autres pluviomètres ont un nombre d'années d'activité variant entre 7 et 20 années. Seule la période de mai à octobre est pertinente à étudier, car l'étude s'intéresse aux précipitations liquides. Les données sont disponibles sous forme de hauteur de précipitations à intervalle de 5 minutes. La Figure 3.27 montre le réseau de pluviomètres de la Ville de Québec.

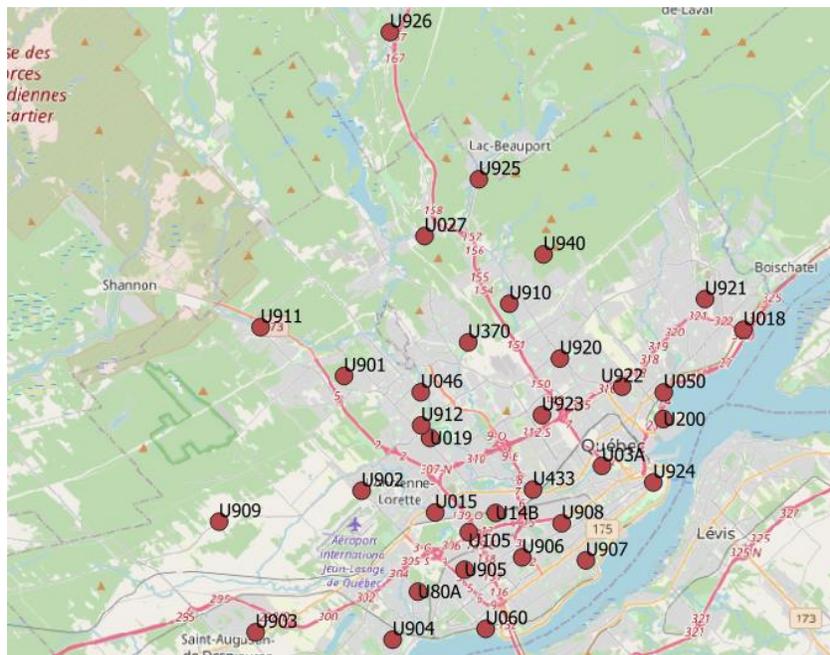


Figure 3.27 Réseau de pluviomètres de la Ville de Québec

La résolution de la plupart des pluviomètres est de 0,1 mm. Or, trois pluviomètres ont une résolution de 0,2 mm, soit les pluviomètres U046, U050 et U105.

### 3.2.2 Traitement et validation

Les données brutes de précipitations de la Ville de Québec ont dû être traitées et validées avant d'identifier les événements pluvieux et les patrons temporels. Ceci a été fait en trois étapes, comme décrit ci-après. La première étape a été de compter le nombre de pas de temps annuels pour chaque pluviomètre et d'apporter certaines corrections aux données en fonction des résultats obtenus. Cette étape a permis de repérer plusieurs erreurs dans les données, soit des doublons, des données manquantes, des dates inversées et des erreurs de dates d'enregistrement.

Les doublons ont été identifiés lorsqu'il y avait deux valeurs de précipitations pour un même pas de temps de 5 minutes. Les doublons repérés ont été corrigés en enlevant une des valeurs, advenant que les deux valeurs de précipitations étaient égales. Les données manquantes ont été identifiées lorsque l'enregistrement n'était pas effectué pour un ou plusieurs pas de temps. Les données manquantes ont été notées et comptabilisées, mais aucune correction n'a été apportée pour celles-ci. Quant aux dates inversées, elles ont été modifiées pour que leur format corresponde à celui d'une date valable. Une erreur de date d'enregistrement signifie que des données sont enregistrées à un pas de temps autre que 5 minutes. Les erreurs d'enregistrement ont été corrigées en cumulant les données de précipitations sur une période de 5 minutes.

La deuxième étape pour valider les données brutes a été de comparer les données cumulées sur plusieurs durées aux valeurs établies par les courbes intensité-durée-fréquence de la station Jean-Lesage d'Environnement Canada (Environnement et Changement climatique Canada, 2019).

Le Tableau 3.6 présente les valeurs de hauteur de pluie de la courbe IDF de récurrence 100 ans avec leur intervalle de confiance à 95 % ainsi que les valeurs majorées de 20 %, servant de critères de validation des données.

**Tableau 3.6- Hauteur de pluie de récurrence 100 ans pour différentes durées à la station Jean-Lesage (tiré d'Environnement et Changement climatique Canada, 2019)**

Durée	Hauteur de pluie de récurrence 100 ans (mm)			Hauteur de pluie de récurrence 100 ans majorée de 20% (mm)		
	Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95 %	Valeur moyenne	Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %	Borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95 %	Valeur moyenne	Borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95 %
5 min	12,7	15,3	17,9	15,2	18,3	21,5
10 min	18,1	21,7	25,3	21,7	26,0	30,4
15 min	22,6	27,4	32,1	27,2	32,9	38,6
30 min	31,7	39,1	46,6	38,0	46,9	55,9
1h	41,8	52,5	63,2	50,2	63,0	75,8
2h	50,4	63,0	75,6	60,5	75,6	90,7
6h	61,8	75,0	88,2	74,2	90,0	105,8
12h	72,0	86,4	100,8	86,4	103,7	121,0
24h	86,4	100,8	115,2	103,7	121,0	138,2

Pour valider les données, les règles suivantes ont été établies :

- 1) Toutes les données dépassant la valeur maximale de l'intervalle de confiance à 95 %, majorée de 20 %, pour une récurrence de 100 ans ont été retirées à moins qu'un événement historique exceptionnel ait réellement eu lieu à la date en question, ce qui a été vérifié en consultant les sites de nouvelles.
- 2) Toutes les données dépassant la valeur moyenne de l'intervalle de confiance à 95 %, pour une récurrence de 100 ans, ont été retirées si les données historiques de précipitations du radar Villeroy/Sainte-Françoise d'Environnement Canada, près de Trois-Rivières, montraient qu'il n'y avait pas eu d'événement pluvial près de Québec à la date en question.

La dernière étape de validation a été de comparer les données des pluviomètres avec celles provenant d'une autre source de données. Comme les pluviomètres font partie d'un réseau, les autres pluviomètres du réseau peuvent être utilisés à titre comparatif. À noter qu'il n'est pas question de comparer précisément les données aux 5 minutes de chaque pluviomètre, car les systèmes météorologiques sont extrêmement variables spatialement. Il est plutôt question de

comparer les ordres de grandeur et les tendances des données des pluviomètres. Or le fait qu'il y ait des données manquantes dans les séries chronologiques vient rendre la comparaison plus compliquée.

En effet, le pourcentage de données manquantes influence le cumul des précipitations annuelles. Plus le pourcentage de données manquantes est élevé, plus la hauteur annuelle des précipitations diminue. Pour savoir si les données de certains pluviomètres ou de certaines années ont un biais, il est possible de tracer une droite de régression linéaire des précipitations liquides annuelles en fonction du pourcentage de données annuelles manquantes. Les résidus de Student par rapport à ces droites ont ensuite été calculés. Une donnée a été considérée comme aberrante si son résidu « studentisé » absolu était supérieur à 1,96. En statistique, cette limite peut être définie selon l'Équation 6 (Cornillon & Matzner-Løber, 2007).

**Équation 6** 
$$|t_i^*| > t_{n-p-1}(1 - \alpha/2)$$

où  $|t_i^*|$  est le résidu studentisé d'un individu,  $n$  est le nombre d'observations,  $p$  est le nombre de variables explicatives (1, soit le pourcentage de données manquantes) et  $\alpha$  est le niveau de confiance (0,05 pour un niveau de confiance à 95 %).

Si la valeur du résidu « studentisé » était supérieure au seuil établi par l'Équation 6, les données annuelles du pluviomètre étaient analysées plus en profondeur. Les données annuelles, mensuelles et évènementielles ont été comparées aux données des pluviomètres à proximité. Dans les cas où l'analyse a révélé des valeurs non explicables par rapport aux autres pluviomètres, les données ont été supprimées et identifiées comme manquantes.

### **3.2.3 Scénarios d'identification d'évènements pluvieux**

Une fois les données pluviométriques traitées et validées, celles-ci ont été séparées en évènements pluvieux pour pouvoir identifier et regrouper des évènements selon leur patron temporel. Pour ce faire, une fenêtre mobile a été utilisée. Le principe est qu'une fenêtre de durée fixe déterminée par l'utilisateur se déplace sur une série de données. Les durées analysées sont de 15 et 30 min, ainsi que de 1, 2, 6, 12 et 24 h. Pour chaque fenêtre, des critères de séparation d'évènements, décrits ici-bas, ont été testés. Si les critères n'étaient pas respectés, la fenêtre se déplaçait d'un pas de temps (5 min) et l'analyse se poursuivait. Si les critères étaient respectés, l'évènement était considéré comme pertinent et était enregistré.

Parmi tous les critères de séparation d'évènements dans la littérature, trois ont été retenus, soit un seuil minimal de hauteur de pluie définissant le temps sec, un temps inter-évènement sec minimal et un critère de nombre de pas de temps nuls (sans pluie). Dans le cas où des évènements de durée fixe sont recherchés, le critère de nombre de pas de temps nuls sert à donner de la flexibilité à la fenêtre mobile. Par exemple, pour une durée d'évènement de 1 h, un critère de nombre de pas de temps nuls pourrait permettre à l'algorithme de considérer des évènements de 55 minutes comme étant valables. Avec ces critères, des scénarios de séparation d'évènements pluvieux ont été créés pour évaluer l'impact des critères sur le nombre d'évènements identifiés. Or, comme les caractéristiques des pluies de courtes durées diffèrent de celles des pluies de longues durées, les scénarios et critères retenus sont différents selon le type de pluie.

Les pluies de 15 et 30 min ont été considérées comme étant des pluies de très courte durée, les pluies de 1 et 2 h, des pluies de courte durée et les pluies de 6, 12 et 24 h, des pluies de longue durée. Les Tableau 3.7, Tableau 3.8 et Tableau 3.9 présentent les critères et scénarios retenus selon la durée des pluies.

**Tableau 3.7- Scénarios de séparation d'évènements pluvieux pour les pluies de très courtes durées (15 et 30 min)**

Scénarios	Temps sec inter-évènement minimal	Critère de pas de temps nul (# maximal de pas de temps nuls/h)	Critère de seuil de temps sec (mm/h)
A	30 min	0	0
B	60 min	0	0
C	360 min	0	0

**Tableau 3.8- Scénarios de séparation d'évènements pluvieux pour les pluies de courtes durées (1h et 2 h)**

Scénarios	Temps sec inter-évènement minimal	Critère de pas de temps nul (# maximal de pas de temps nuls/h)	Critère de seuil de temps sec (mm/h)
D	33% de la durée	0	0
E	33% de la durée	1	0
F	33% de la durée	1	0,1
G	360 min	1	0,1

**Tableau 3.9- Scénarios de séparation d'événements pluvieux pour les pluies de longues durées (6, 12 et 24 h)**

Scénarios	Temps sec inter-événement minimal	Critère de pas de temps nul (# maximal de pas de temps nuls/h)	Critère de seuil de temps sec (mm/h)
H	33 % de la durée	2	0,2
I	33 % de la durée	3	0,2
J	33 % de la durée	3	0,3
K	360 min	3	0,3

Un temps inter-événement sec minimal de 360 min ou 6 h est souvent utilisé dans la littérature. La valeur de 33 % fait référence à un temps inter-événement équivalent à 33 % de la durée de l'évènement. Cette valeur a été choisie car moins de temps est requis, en général, pour revenir aux conditions initiales après un événement de courte durée (Powell *et al.*, 2007). Pour les scénarios A et B, un critère de 33 % n'était pas applicable pour des pluies de très courtes durées. Des durées arbitraires de 30 et 60 minutes ont donc été choisies.

Le critère de pas de temps nuls à travers un événement varie entre 0 et 3 pas de temps nuls. Cela s'explique par le fait que les événements de longues durées sont souvent composés de plus petits événements de pluie, séparés par des temps secs. Donc, pour prendre en compte cette réalité, le critère de nombre maximal de pas de temps avec des hauteurs de pluie nulles à travers l'évènement augmente avec la durée de l'évènement.

Le critère seuil de temps sec varie de 0 à 0,3 mm. Ces valeurs représentent un nombre entier de bascules de l'auget des pluviomètres du réseau de la Ville de Québec, qui ont une résolution de 0,1 mm. Selon le critère de temps inter-événement sec de 33 %, plus la durée de l'évènement augmente et plus le temps sec exigé pour les pluies de longues durées est grand. Pour permettre de trouver des événements de longues durées selon ces conditions, le seuil de temps sec augmente avec la durée de l'évènement. Cependant, pour les petits événements, une définition d'un pas de temps sec est plus sévère pour limiter le nombre d'évènements de faible hauteur totale trouvé.

### **3.2.4 Regroupement par la méthode des k-moyennes**

Le regroupement par la méthode des k-moyennes requiert deux intrants : un nombre de regroupements (k) et un échantillon d'évènements pluvieux. Plusieurs variations de ces intrants ont été testées pour déterminer la méthode la plus pertinente pour répondre à l'objectif de cette

étude. Une valeur de 4 regroupements ( $k = 4$ ) a été choisie pour représenter les quatre catégories de patrons temporels possibles : une pluie uniforme, une pluie avec une pointe d'intensité au début de l'évènement, une pluie avec une pointe d'intensité au milieu de l'évènement et une pluie avec une pointe d'intensité à la fin de l'évènement. Pour les évènements pluvieux, les données ont été utilisées de deux façons, soit telles quelles ou en les rendant adimensionnelles en divisant la hauteur de pluie à chaque pas de temps par la hauteur totale de l'évènement. Ainsi, deux méthodes ont été appliquées pour regrouper les évènements.

## 4 RÉSULTATS

### 4.1 Résultats des suivis des ouvrages de contrôle à la source des eaux pluviales

#### 4.1.1 Données pluviométriques

Dans cette section, les résultats de la validation des données pluviométriques sont présentés. Les événements pluviométriques résultant de la campagne de collecte de données et leurs caractéristiques sont également présentés.

##### 4.1.1.1 Validation

La vérification des données pluviométriques a été effectuée en comparant les cumuls journaliers et mensuels du pluviomètre du site aux pluviomètres des stations d'Environnement Canada les plus proches. La Figure 4.1 localise les stations avoisinantes.

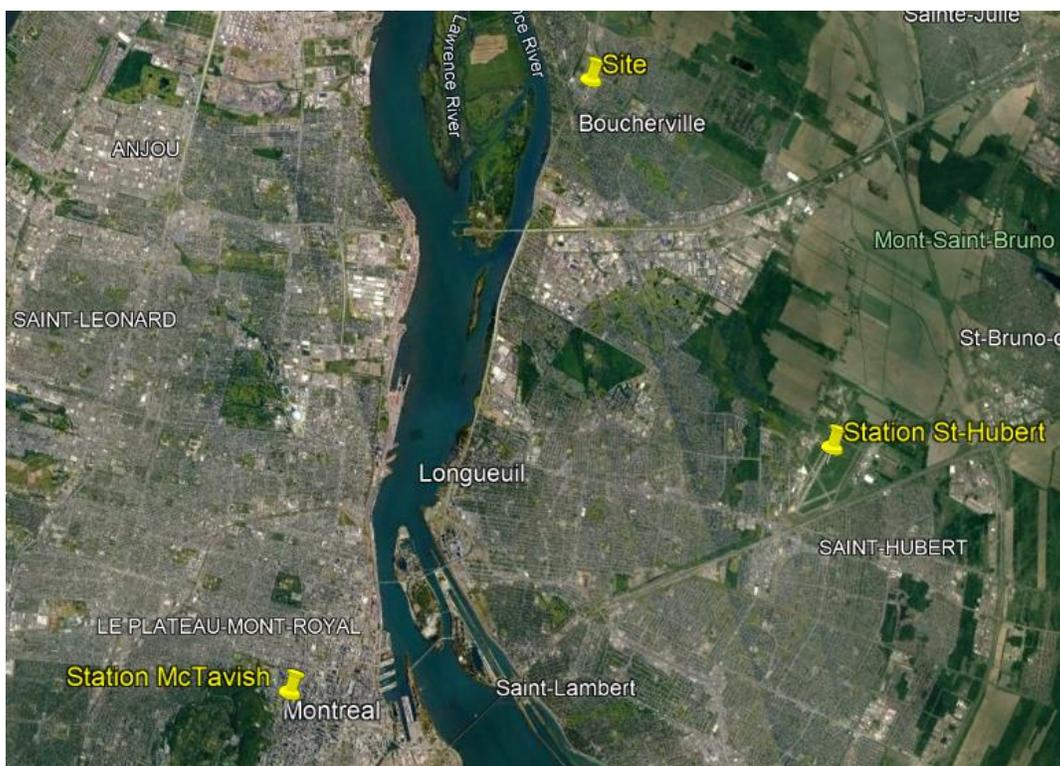
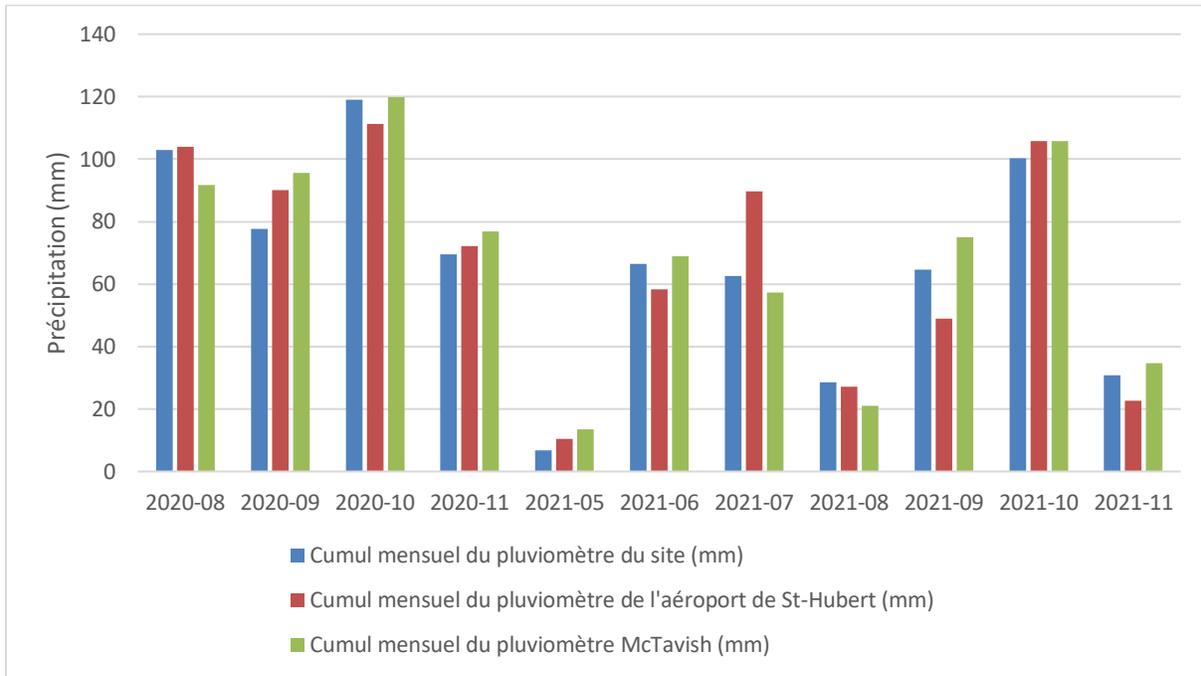


Figure 4.1 Localisation des pluviomètres voisins d'Environnement Canada (adapté de Google Earth, 2022)

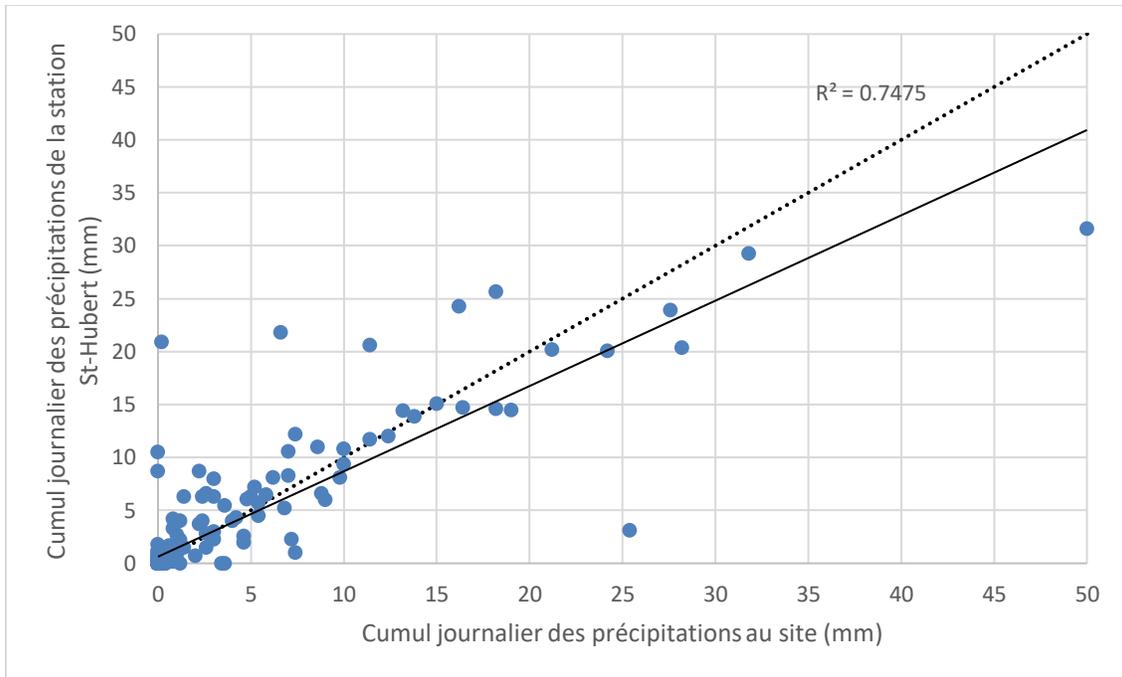
À 10 km du site, l'aéroport St-Hubert est la plus proche station d'Environnement Canada (Service météorologique du Canada, 2022b). La station McTavish est la deuxième plus proche, à 15 km (Service météorologique du Canada, 2022a). La Figure 4.2 illustre la comparaison des cumuls mensuels des trois stations pour la période à l'étude.



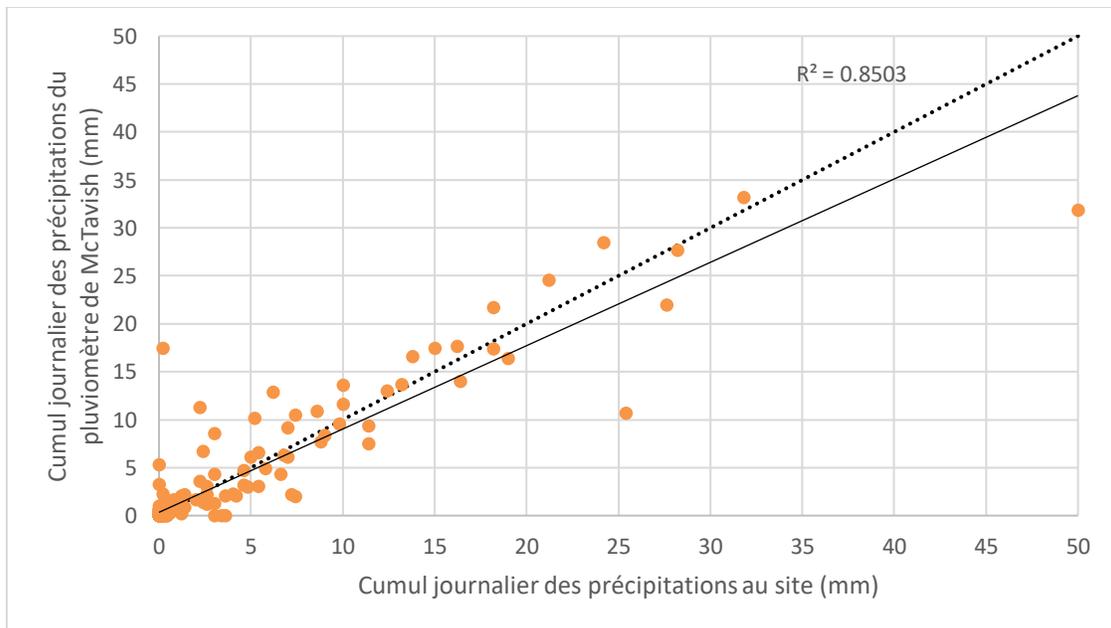
**Figure 4.2 Cumuls mensuels des pluviomètres du site à l'étude et de l'aéroport de St-Hubert**

La comparaison des pluviomètres ne montre pas de biais positif ni négatif pour le pluviomètre du site. En effet, le cumul mensuel du pluviomètre du stationnement incitatif est parfois supérieur et parfois inférieur à celui des pluviomètres de l'aéroport St-Hubert et McTavish. Il n'y a pas de patron observable dans les données qui indiquerait que les données du pluviomètre sont erronées. De plus, sur le terrain, durant la période de collecte de données, aucun problème n'a été rencontré.

Le cumul journalier des pluviomètres peut également être visualisé pour compléter la validation des données. Les Figure 4.3 et Figure 4.4 illustrent la comparaison de la pluviométrie journalière du site avec celle des stations St-Hubert et McTavish.



**Figure 4.3** Comparaison sur une base journalière des précipitations mesurées au site et à la station de l'aéroport St-Hubert (la ligne pointillée illustre le ratio 1:1 et la ligne pleine représente la régression linéaire des données, dont le coefficient de détermination est aussi présenté sur la figure)



**Figure 4.4** Comparaison sur une base journalière des précipitations mesurées au site et à la station McTavish (la ligne pointillée illustre le ratio 1:1 et la ligne pleine représente la régression linéaire des données, dont le coefficient de détermination est aussi présenté sur la figure)

Les données sont réparties des deux côtés de la ligne pointillée, qui représente une équivalence parfaite, sans qu'un patron ne soit observable. Les droites de régression ont également été tracées. Les droites se rapprochent de la ligne d'équivalence. En enlevant les évènements du 17 août 2020 et du 29 août 2020, la droite de régression colle parfaitement à la droite pointillée. Comme il sera vu à la section suivante, ces deux évènements sont des orages intenses qui ont dépassé une période de retour de 2 ans. Il est normal, dans le cas présent, que pour certains évènements, les pluviomètres n'enregistrent pas la même quantité d'eau tombée, car la pluviométrie est grandement variable spatialement. Un orage qui a lieu au site peut ne pas avoir eu lieu 10 km plus loin, ce qui explique les points s'écartant de la droite. L'ensemble des données pluviométriques peut donc être utilisé dans les analyses subséquentes.

#### *4.1.1.2 Évènements pluvieux*

Comme il a été mentionné dans la section 3.1.5.3, les critères de séparation retenus sont un seuil d'intensité minimale de 0,6 mm/h, une hauteur totale minimale de 2 mm et un temps inter-évènement sec de 7 h. Avec ces critères, il y a 62 évènements trouvés entre le 11 août 2020 et le 12 novembre 2021, excluant les mois de décembre à mars. Les évènements sont utilisés pour calculer la performance hydraulique lorsque les données sont disponibles. Pour chaque évènement, les caractéristiques utiles à connaître pour l'analyse hydrologique sont : la durée de la pluie, la hauteur totale de précipitation, le temps sec antécédent, l'intensité moyenne de la pluie, l'intensité maximale sur 5 minutes et la période de retour. Le Tableau 4.1 présente les caractéristiques des évènements.

Les évènements ont également été localisés sur les courbes IDF de la station de l'aéroport de St-Hubert. La Figure 4.5 présente les évènements et les courbes IDF de 2 et 5 ans. Il est important de rappeler que ce sont les intensités maximales sur plusieurs durées qui sont comparées aux courbes IDF et non pas uniquement l'intensité moyenne.

**Tableau 4.1 Caractéristiques des évènements pluviométriques**

Date début	Date fin	Durée (h)	Précipitation (mm)	Temps sec antécédent (j)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité maximale sur 5 min (mm/h)	Période de retour (ans)
2020-08-11 18:10	2020-08-11 19:35	1,4	6,6	14,3	4,7	21,6	[0,2[
2020-08-17 9:55	2020-08-17 12:10	2,3	25,4	5,6	11,3	69,6	[2,5[ (15 min, 30 min et 1h dépassent 2 ans )
2020-08-18 2:30	2020-08-18 3:40	1,2	2,2	0,6	1,9	7,2	[0,2[
2020-08-20 21:35	2020-08-21 1:30	3,9	4	2,7	1,0	7,2	[0,2[
2020-08-21 13:10	2020-08-21 13:20	0,2	2,4	0,5	14,4	12	[0,2[
2020-08-24 6:40	2020-08-24 9:30	2,8	9,4	2,7	3,3	14,4	[0,2[
2020-08-29 6:35	2020-08-29 21:40	15,1	49,8	4,9	3,3	57,6	[2,5[ (12h et intensité moy dépassent 2 ans)
2020-09-07 22:40	2020-09-07 23:40	1,0	6	9,0	6,0	19,2	[0,2[
2020-09-13 13:05	2020-09-13 17:00	3,9	21,2	5,6	5,4	26,4	[0,2[
2020-09-29 10:21	2020-09-30 9:06	22,8	45,4	15,7	2,0	14,4	[0,2[
2020-10-02 10:36	2020-10-02 12:41	2,1	2,2	2,1	1,1	2,4	[0,2[
2020-10-07 9:21	2020-10-07 16:26	7,1	14,8	4,9	2,1	19,2	[0,2[
2020-10-10 15:21	2020-10-10 18:36	3,2	4	3,0	1,2	24	[0,2[
2020-10-13 7:16	2020-10-13 16:46	9,5	23,6	2,5	2,5	9,6	[0,2[
2020-10-15 20:16	2020-10-16 12:01	15,8	13,6	2,1	0,9	4,8	[0,2[
2020-10-19 13:31	2020-10-20 9:26	19,9	27,8	3,1	1,4	9,6	[0,2[
2020-10-21 8:11	2020-10-21 16:51	8,7	16,4	0,9	1,9	14,4	[0,2[
2020-10-24 5:35	2020-10-24 8:15	2,7	5,2	2,5	2,0	4,8	[0,2[
2020-10-26 10:40	2020-10-26 15:50	5,2	8,2	2,1	1,6	4,8	[0,2[
2020-11-15 18:10	2020-11-16 3:50	9,7	13	20,1	1,3	12	[0,2[
2020-11-22 19:20	2020-11-23 7:50	12,5	28,6	6,6	2,3	7,2	[0,2[
2020-11-25 8:30	2020-11-25 13:10	4,7	6,6	2,0	1,4	4,8	[0,2[
2020-11-30 14:35	2020-12-01 19:25	28,8	30,4	5,1	1,1	31,2	[0,2[
2021-03-26 4:20	2021-03-26 19:40	15,3	26,6	1,0	1,7	21,6	[0,2[
2021-03-28 11:45	2021-03-28 21:55	10,2	19,8	1,7	1,9	12	[0,2[
2021-04-15 8:45	2021-04-16 14:15	29,5	33,8	17,5	1,1	9,6	[0,2[
2021-04-21 11:30	2021-04-21 15:20	3,8	3,4	4,9	0,9	2,4	[0,2[
2021-04-25 16:25	2021-04-25 20:15	3,8	7	4,0	1,8	33,6	[0,2[
2021-04-28 15:15	2021-04-28 19:55	4,7	5,6	2,8	1,2	2,4	[0,2[
2021-04-30 1:40	2021-04-30 21:25	19,7	29	1,2	1,5	7,2	[0,2[
2021-06-03 7:00	2021-06-03 13:55	6,9	6,8	33,4	1,0	14,4	[0,2[
2021-06-05 17:40	2021-06-05 18:50	1,2	7,4	2,2	6,3	50,4	[0,2[
2021-06-14 1:10	2021-06-14 11:25	10,3	8,6	8,3	0,8	14,4	[0,2[

**Tableau 4.1 Caractéristiques des évènements pluviométriques (suite)**

Date début	Date fin	Durée (h)	Précipitation (mm)	Temps sec antécédent (j)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité maximale sur 5 min (mm/h)	Période de retour (ans)
2021-06-18 15:20	2021-06-19 2:55	11,6	6,2	4,2	0,5	4,8	[0,2]
2021-06-21 15:10	2021-06-21 15:25	0,2	2	2,5	8,0	9,6	[0,2]
2021-06-26 7:15	2021-06-26 22:25	15,2	28,2	4,7	1,9	24	[0,2]
2021-06-30 16:50	2021-06-30 16:55	0,1	5	3,8	60,0	43,2	[0,2]
2021-07-06 17:25	2021-07-06 18:30	1,1	7	6,0	6,5	16,8	[0,2]
2021-07-08 17:45	2021-07-08 23:00	5,3	13,2	2,0	2,5	24	[0,2]
2021-07-13 21:50	2021-07-14 0:15	2,4	4,2	5,0	1,7	21,6	[0,2]
2021-07-20 19:15	2021-07-21 1:10	5,9	11,4	6,8	1,9	12	[0,2]
2021-07-23 17:50	2021-07-23 18:25	0,6	3,6	2,7	6,2	12	[0,2]
2021-07-25 2:15	2021-07-25 6:30	4,3	18	1,3	4,2	19,2	[0,2]
2021-08-07 13:40	2021-08-07 13:45	0,1	3,4	13,3	40,8	28,8	[0,2]
2021-08-09 5:25	2021-08-09 5:30	0,1	2,8	1,7	33,6	24	[0,2]
2021-08-11 1:45	2021-08-11 9:05	7,3	8	1,8	1,1	19,2	[0,2]
2021-08-29 18:00	2021-08-29 19:00	1,0	3,8	18,4	3,8	26,4	[0,2]
2021-08-30 5:50	2021-08-30 9:40	3,8	7,4	0,5	1,9	31,2	[0,2]
2021-09-05 15:20	2021-09-05 21:15	5,9	9,8	6,2	1,7	16,8	[0,2]
2021-09-06 12:30	2021-09-06 13:00	0,5	2,6	0,6	5,2	24	[0,2]
2021-09-09 22:15	2021-09-10 3:05	4,8	5,4	3,4	1,1	9,6	[0,2]
2021-09-15 3:59	2021-09-15 6:14	2,3	11	5,0	4,9	31,2	[0,2]
2021-09-24 0:04	2021-09-24 9:14	9,2	31,8	8,7	3,5	14,4	[0,2]
2021-10-02 3:19	2021-10-02 15:14	11,9	9,6	7,8	0,8	4,8	[0,2]
2021-10-16 2:54	2021-10-16 18:54	16,0	16,2	13,5	1,0	14,4	[0,2]
2021-10-18 1:29	2021-10-18 9:34	8,1	2,6	1,3	0,3	2,4	[0,2]
2021-10-21 10:44	2021-10-21 12:39	1,9	5	3,0	2,6	9,6	[0,2]
2021-10-22 2:19	2021-10-22 7:49	5,5	13,8	0,6	2,5	14,4	[0,2]
2021-10-26 9:59	2021-10-26 16:34	6,6	5,4	4,1	0,8	7,2	[0,2]
2021-10-30 18:19	2021-10-31 20:14	25,9	44,2	4,1	1,7	9,6	[0,2]
2021-11-02 19:54	2021-11-02 20:29	0,6	2	2,0	3,4	7,2	[0,2]
2021-11-12 8:23	2021-11-12 15:13	6,8	18,2	9,5	2,7	9,6	[0,2]

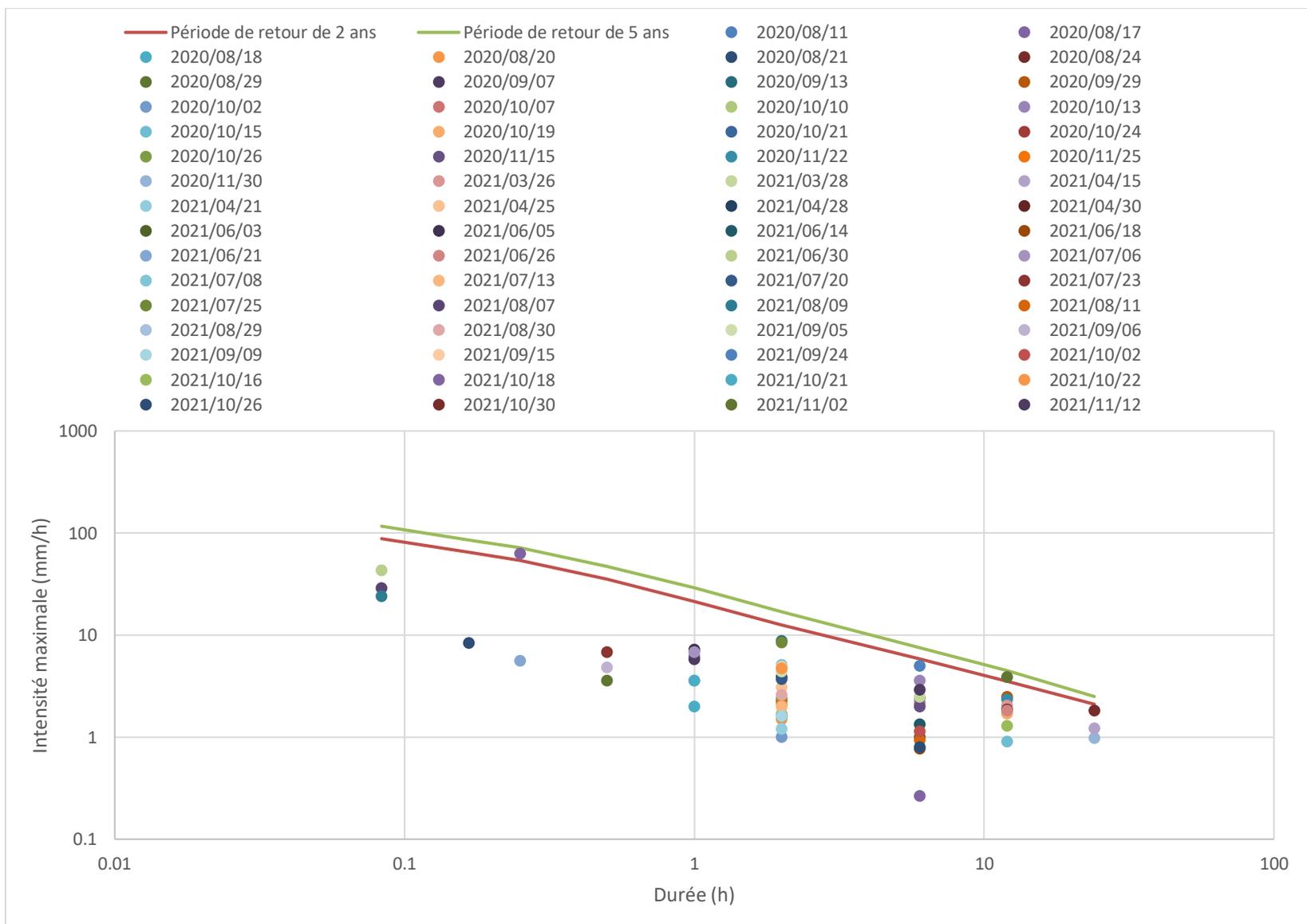


Figure 4.5 Caractérisation des événements pluvieux de Boucherville par rapport aux courbes IDF de l'aéroport de St-Hubert

Sur les 62 évènements, la durée de la pluie varie entre 5 minutes et 29,5 h. La hauteur totale de précipitation varie entre 2 mm et 49,8 mm. La période de temps sec antécédent va de 10,8 h à 33,4 j. En tout, 60 évènements ont une récurrence de moins de 2 ans et deux évènements ont une récurrence supérieure à 2 ans, mais inférieure à 5 ans. Les deux évènements de récurrence supérieure à 2 ans sont les évènements du 17 août 2020, où il a plu 25,4 mm en 2,3 h, et du 20 août 2020, où il a plu 49,8 mm en 15,1 h. Pour l'évènement du 17 août 2020, les intensités qui dépassent la courbe de récurrence 2 ans sont celles qui sont calculées sur des durées de 15 min, 30 min et 1 h. Pour le 20 août 2020, les intensités qui dépassent la courbe de récurrence 2 ans sont celles qui sont calculées sur 12 h et sur la durée totale de la pluie.

#### **4.1.2 Données des sondes de hauteur d'eau**

Cette section décrit le processus de validation des données des sondes de hauteur d'eau. Elle présente aussi les résultats de débits obtenus avec les différentes sondes de pression.

##### *4.1.2.1 Validation*

La collecte de données sur le site du stationnement incitatif de Boucherville a permis d'obtenir des pressions qui ont été converties en hauteurs d'eau. En tout, trois types de sondes ont été utilisées, soit les sondes HOBO, Global Waters et la sonde de l'échantillonneur, tel qu'indiqué à la section 3.1.5.2. Les sondes ont toutes récolté des informations dans la même conduite, soit à son entrée ou à sa sortie. Cette conduite véhiculait l'effluent des ouvrages. Pour valider les données des sondes de pression, une comparaison a été effectuée entre les différentes sondes en considérant que les hauteurs, à l'entrée et à la sortie de la conduite à l'étude, suivent le même patron global. La Figure 4.6 présente un exemple de comparaison et de validation des données des sondes de pression.

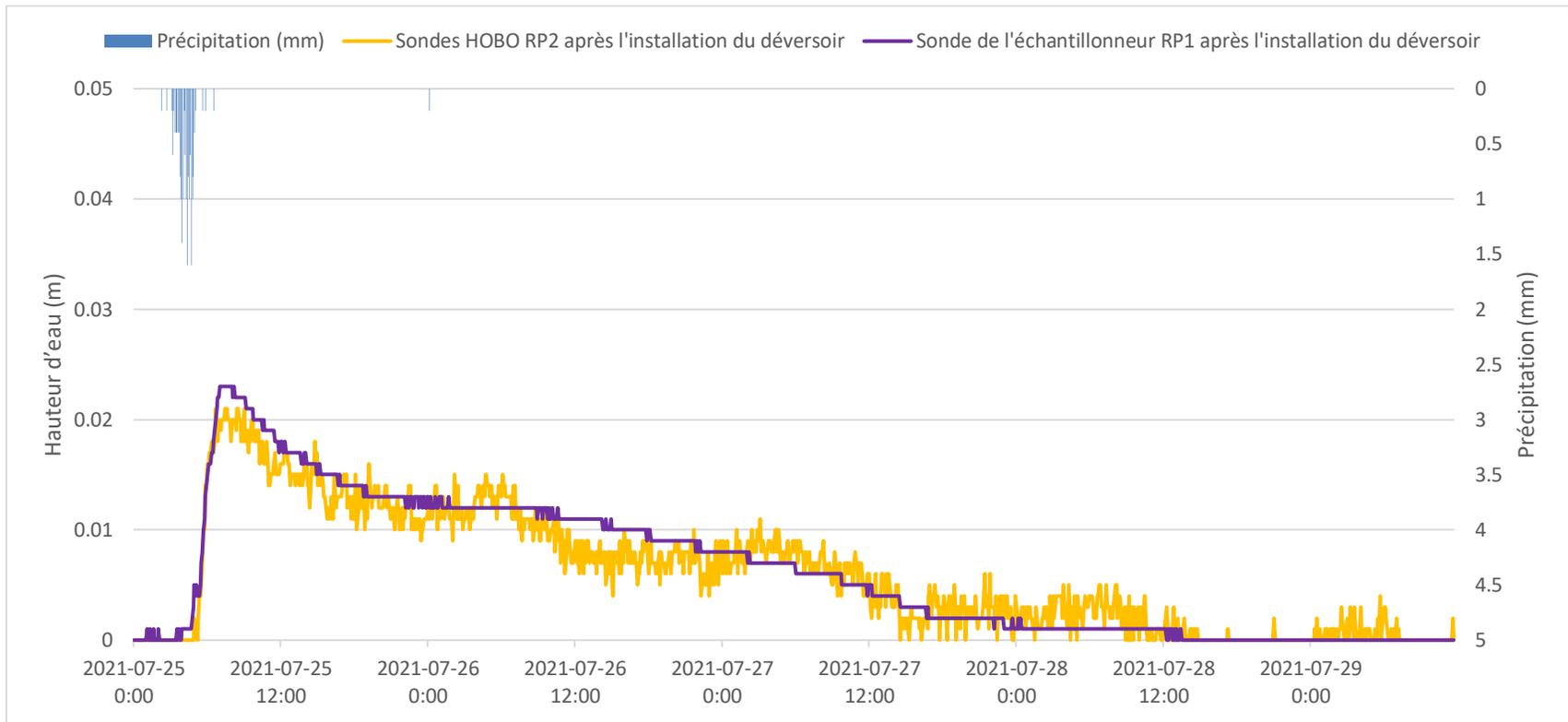


Figure 4.6 Exemple de validation des données des sondes

Les données des sondes HOBO oscillent plus que les données de hauteur d'eau de la sonde de l'échantillonneur. Cependant, les données suivent le même patron et sont du même ordre de grandeur. Les données sont donc considérées comme valides.

#### *4.1.2.2 Débit*

Avant l'ajout du déversoir, le 22 octobre 2020, le débit a été estimé à partir de la hauteur d'eau grâce à l'équation de Manning. Pour ce faire, les données des sondes HOBO à la localisation RP1 ont été utilisées. À noter qu'avant le 22 octobre 2020, aucune autre sonde n'était disponible pour valider les données. À partir du 22 octobre 2020, après l'installation du déversoir, les trois modèles de sondes étaient en fonction et la validation des données a pu être effectuée. La hauteur d'eau à la sortie des infrastructures de contrôle à la source, en amont du déversoir, a été transformé en débit à partir d'un tableau d'équivalence fourni par la compagnie Thel-mar. La Figure 4.7 présente la comparaison entre le débit à la sortie des infrastructures et le ruissellement modélisé pour le stationnement pour le même événement.

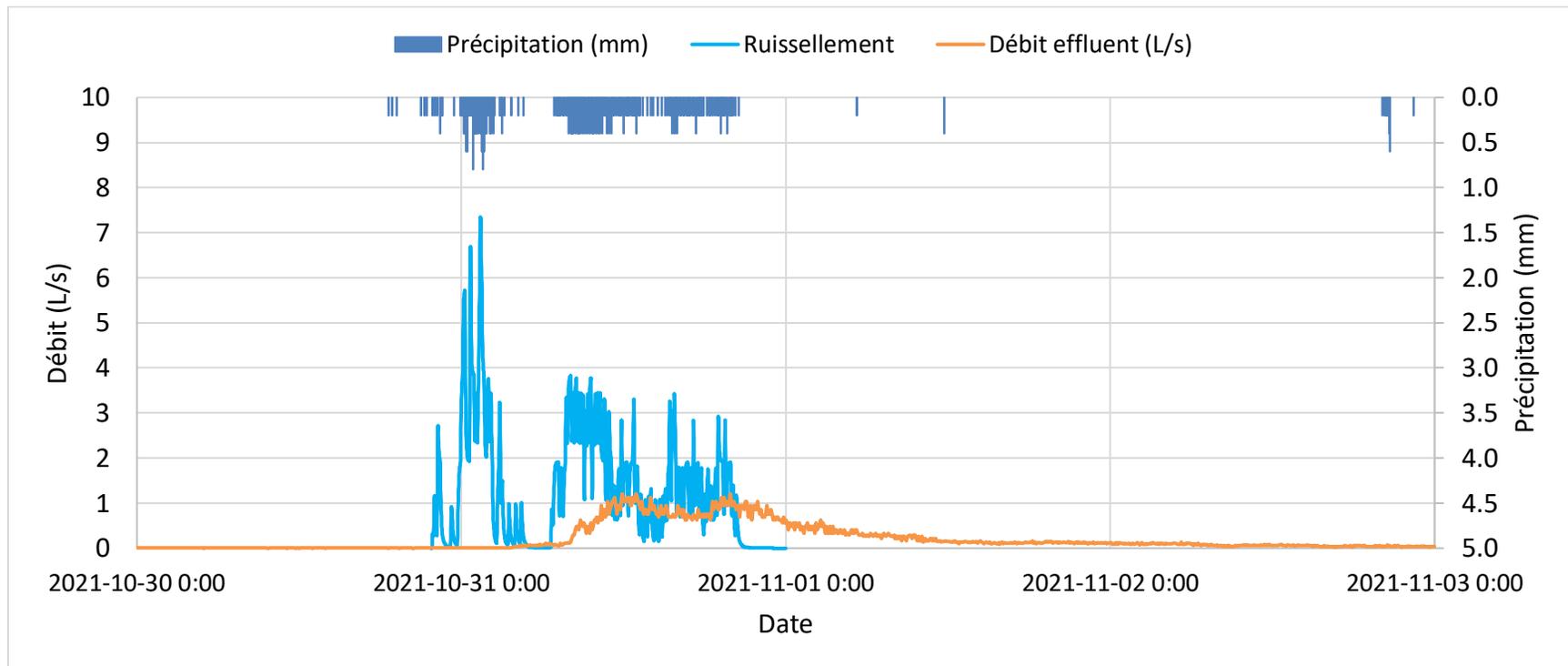


Figure 4.7 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 30 octobre 2021

En comparant le débit effluent des infrastructures et le débit de ruissellement modélisé, il est possible de remarquer que non seulement le volume de ruissellement est réduit, mais aussi que le débit de pointe est atténué et décalé dans le temps par rapport à la pointe d'intensité de la pluie. Ces effets sont favorables pour un réseau d'égout pluvial, car une diminution du volume de ruissellement permet de réduire les apports au réseau et ainsi de diminuer le besoin de rétention à l'aval. De plus, la diminution du débit de pointe permet de réduire les risques de surcharge des conduites du réseau d'égout pluvial. Le décalage dans le temps du débit de pointe permet de laisser passer le débit après la pointe des autres apports au réseau, ce qui limite également les risques de surcharge des conduites. Ces effets sont quantifiés pour chaque évènement pluvieux dans la prochaine section. Pour le reste des évènements avec effluent, les comparaisons du débit de ruissellement simulé et du débit effluent des infrastructures de contrôle à la source sont présentées en annexe.

### **4.1.3 Suivi hydrologique**

Les ouvrages sur le site de Boucherville permettent de capter et d'infiltrer les eaux de pluie et de ruissellement. Conséquemment, le volume de ruissellement qui se rend au réseau pluvial et au milieu récepteur est réduit. L'infiltration des eaux permet aussi une réduction et un décalage du débit de pointe par le biais d'une réduction de l'imperméabilisation du sol et de l'augmentation du temps de concentration (MDDEP & MAMROT, 2014). Ces effets ont été quantifiés sur le terrain et les résultats par évènement pluvieux sont présentés au Tableau 4.2.

**Tableau 4.2 Performance hydrologique des infrastructures de contrôle à la source pour différents évènements pluvieux**

Date de l'évènement	Réduction du volume de ruissellement (%)	Décalage du débit de pointe (h)	Réduction du débit de pointe (%)	Date de l'évènement	Réduction du volume de ruissellement (%)	Décalage du débit de pointe (h)	Réduction du débit de pointe (%)
2020-08-11	100	-	100	2021-06-14	100	-	100
2020-08-17	54	0,4	96	2021-06-18	100	-	100
2020-08-18	100	-	100	2021-06-21	100	-	100
2020-08-20	100	-	100	2021-06-26	95	3,3	99
2020-08-21	100	-	100	2021-06-30	100	-	100
2020-08-24	100	-	100	2021-07-06	100	-	100
2020-08-29	67	0,5	89	2021-07-08	97	7,7	100
2020-09-07	100	-	100	2021-07-13	100	-	100
2020-09-13	100	-	100	2021-07-20	100	-	100
2020-09-29	94	16,1	91	2021-07-23	100	-	100
2020-10-02	100	-	100	2021-07-25	91	3,2	99
2020-10-07	100	-	100	2021-08-07	100	-	100
2020-10-10	100	-	100	2021-08-09	100	-	100
2020-10-13	100	-	100	2021-08-11	100	-	100
2020-10-15	100	-	100	2021-08-29	100	-	100
2020-10-19	88	5,0	91	2021-08-30	100	-	100
2020-10-21	76	4,3	93	2021-09-05	100	-	100
2020-10-24	97	0,7	100	2021-09-06	100	-	100
2020-10-26	91	2,1	99	2021-09-09	100	-	100
2020-11-15	100	-	100	2021-09-15	100	-	100
2020-11-22	97	18,2	98	2021-09-24	89	3,9	95
2020-11-25	100	-	100	2021-10-02	100	-	100
2020-11-30	80	0,1	99	2021-10-16	100	-	100
2021-04-15	14	20,1	88	2021-10-18	100	-	100
2021-04-21	100	-	100	2021-10-21	100	-	100
2021-04-25	100	-	100	2021-10-22	66	4,3	96
2021-04-28	100	-	100	2021-10-26	100	-	100
2021-04-30	-97	12,2	63	2021-10-30	44	11,2	84
2021-06-03	100	-	100	2021-11-02	100	-	100
2021-06-05	100	-	100				

Les évènements pluvieux où il n'y a pas eu d'eau à la sortie du drain de la zone à l'étude ont été considérés comme ayant une réduction du débit de pointe et du ruissellement de 100 %. Dans ces cas, le décalage du débit de pointe n'est pas calculé, car il est infini.

Le Tableau 4.3 présente les statistiques relatives au Tableau 4.2.

**Tableau 4.3 Statistiques des performances hydrologiques des ouvrages du stationnement incitatif de Boucherville**

Paramètres	Réduction du volume de ruissellement (%)	Décalage du débit de pointe (h)	Réduction du débit de pointe (%)
Moyenne	90,6	6,7	98
Médiane	100,0	4,3	100,0
Valeur minimale	-96,7	0,1	63,4
Valeur maximale	100,0	20,1	100,0
Écart-type	29,0	6,3	5,7
Taille de l'échantillon	59	17	59

Durant le suivi du site, 71 % des évènements n'ont pas eu d'effluent, c'est-à-dire que les infrastructures de contrôle à la source ont capté la pluie en son entièreté. Il y a 17 évènements où des effluents ont été observés à la sortie des infrastructures. Sur ces 17 évènements, 11 évènements ont une hauteur de précipitation supérieure à 25 mm. Les trois évènements du 21 octobre au 26 octobre 2020 ont des effluents puisqu'ils succèdent un évènement de plus de 25 mm et le temps sec antécédent à la pluie n'est pas suffisant pour assécher le sol. De plus, la majorité des évènements avec effluent (dix évènements) se produisent à l'automne, soit de fin septembre à fin novembre. À cette période de l'année, l'ensoleillement et la température ambiante de l'air chutent et les conditions sont moins propices pour que les infrastructures de contrôle à la source reviennent rapidement aux conditions initiales d'humidité du sol. La hauteur de précipitation, le temps sec antécédent et les conditions de température semblent donc tous avoir un impact sur la performance hydrologique des infrastructures de contrôle à la source du stationnement incitatif de Boucherville. Il aurait été intéressant de pousser l'étude en suivant la teneur en eau à différentes profondeurs dans le sol des cellules de biorétention et dans les pavages perméables. Il aurait ainsi été possible d'estimer l'infiltration vers la nappe phréatique et la rétention dans les ouvrages et de mieux comprendre l'hydrologie derrière les ouvrages de contrôle à la source.

Selon les sections 2.1.1 et 2.2.1, dans la littérature, la réduction moyenne du volume de ruissellement pour des cellules de biorétention et des pavages perméables varie entre 37,6 et 97 %. Les données collectées sont donc dans la partie supérieure de l'intervalle, avec une moyenne de 90,6 %. La réduction du débit de pointe dans la littérature a une gamme assez étendue, qui varie entre 16 et 99 %. La moyenne des résultats obtenus se situe près de la borne supérieure de la gamme. Dans la littérature, le décalage du débit de pointe peut se situer entre 23 à

3462 min, ce qui représente 0,4 à 57,7 h. Le décalage moyen du débit de pointe pour le stationnement étudié se situe à l'intérieur des limites établies par les études précédentes.

La réduction du volume de ruissellement varie de -96,7 % à 100 % avec une moyenne de 90,6 %. La valeur minimale de -96,7 % a eu lieu le 30 avril 2021. La valeur négative signifie qu'il y a eu un plus gros volume d'eau mesuré par les sondes de pression à la sortie des infrastructures de contrôle à la source qu'il n'y a eu de volume de ruissellement. Les drains perforés les plus profonds sont situés à environ 1 m sous la surface du sol. À cette date, la neige au sol était déjà fondue. Or, il est possible que l'eau de la fonte fût encore stockée dans les réservoirs des ouvrages. Pour confirmer l'hypothèse, il aurait fallu mesurer l'humidité présente dans le sol et le prendre en compte dans le bilan hydrologique.

La réduction du débit de pointe varie de 63,4 à 100 %, avec une moyenne de 98 %, signifiant que pour tous les événements, le débit de pointe à la sortie des infrastructures de contrôle à la source est inférieur au débit de ruissellement d'un stationnement imperméable. La plus faible performance a également eu lieu le 30 avril 2021.

Pour le décalage du débit de pointe, il varie de 5 min à 20,1 h, avec une moyenne de décalage de 6,7 h. Le décalage de 5 min est associé à la pluie du 30 novembre 2020. À cette date, la température ambiante et l'ensoleillement sont moindres que pendant la période estivale. Les infrastructures ont donc besoin de plus de temps pour que le sol s'assèche et revienne aux conditions optimales de rétention.

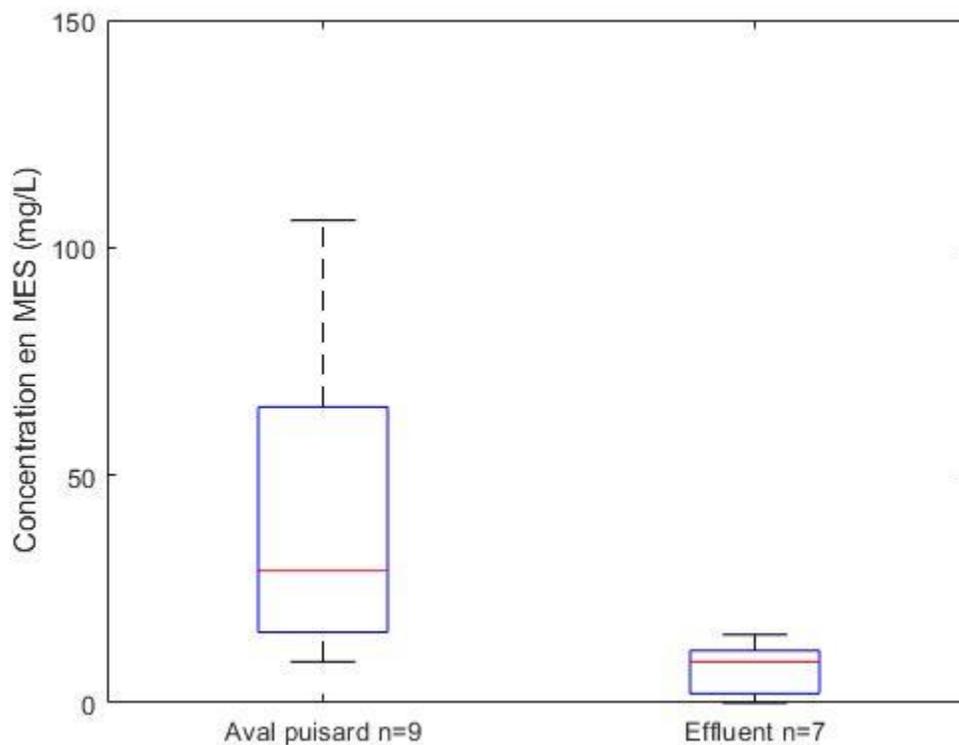
#### **4.1.4 Suivi physico-chimique**

En captant et infiltrant les eaux de pluies et de ruissellement, les infrastructures de contrôle à la source sur le site de Boucherville peuvent également avoir un impact sur la qualité de l'eau. Pour évaluer cet impact, l'effet des infrastructures sur plusieurs paramètres seront analysés, tels que les MES, P, N, DCO et la conductivité électrique.

##### **4.1.4.1 MES**

Les MES dans les eaux de ruissellement urbain proviennent de sources telles que les émissions atmosphériques, la dégradation de l'asphalte, les travaux de construction et l'épandage de sels et de sable en période hivernale (Minnesota Pollution Control Agency, 2022b). Les valeurs typiques en milieu urbain sont de 50 à 700 mg/L avec une médiane de 200 mg/L (MDDEP & MAMROT, 2014). Il est important de contrôler la quantité de MES rejetée au réseau d'égout pluvial, car les MES peuvent altérer les conditions des milieux récepteurs et perturber la vie

aquatique. De plus, les MES peuvent se déposer dans les conduites pluviales, ce qui occasionne une réduction de la section d'écoulement. De plus, les métaux et le phosphore sont souvent associés à des particules en suspension (MDDEP & MAMROT, 2014). Donc, en réduisant les MES, il est possible de réduire la quantité de métaux lourds et de phosphore dans les eaux de ruissellement. En pratique, en ingénierie, lors de la conception de nouveaux développements, le MELCC exige un enlèvement minimal de 60 % des MES. La Figure 4.8 présente les concentrations de MES en aval du puisard P-14 sur le site et à l'effluent des infrastructures de contrôle à la source. Les données qualitatives à l'aval du puisard P-14 permettent de caractériser les eaux véhiculant normalement dans un réseau d'égout pluvial.



**Figure 4.8 Concentrations en MES à l'aval du puisard P-14 et à l'effluent des infrastructures de contrôle à la source**

Pour le site à l'étude, la concentration de MES à l'aval du puisard P-14 varie entre 9 et 106 mg/L, avec une médiane de 29 mg/L. Ces valeurs sont nettement inférieures aux valeurs typiques de ruissellement urbain. Le stationnement incitatif a été très peu utilisé entre août 2020 et novembre 2021 dû à la réduction de l'utilisation du transport en commun en temps de pandémie. En moyenne, il y avait seulement une dizaine d'automobiles chaque jour pour un stationnement qui

peut accueillir jusqu'à 231 automobiles, ce qui représente une utilisation de 4 %. La concentration en MES à la sortie des infrastructures de contrôle à la source sur le site varie entre 0 et 12 mg/L avec une médiane de 9 mg/L. Donc, malgré les faibles concentrations à l'entrée des infrastructures, les eaux de l'effluent sont tout de même moins chargées en particules. Le Tableau 4.4 quantifie cette performance d'enlèvement par évènement pluvieux pour tous les paramètres analysés. Quant à lui, le Tableau 4.5 présente les statistiques associées aux performances des ouvrages.

Au Tableau 4.4, pour quelques évènements, il y a eu un échantillonnage, mais le calcul de performance n'est pas possible. La raison est que, dans ces cas, un échantillonnage a été fait, mais seulement à l'aval du puisard P-14 ou seulement à la sortie des infrastructures de contrôle à la source. La performance d'enlèvement ne peut donc pas être calculée. De plus, une performance de 100 % est parfois notée pour des évènements sans échantillonnage. En effet, selon les données hydrologiques récupérées, il est possible de déterminer s'il y a eu un débit à la sortie des infrastructures de contrôle à la source. S'il n'y en a pas eu, cela signifie que les infrastructures ont retenu 100 % des apports en eau et, donc, que la performance d'enlèvement des polluants est de 100 %, même s'il n'y a pas eu d'échantillonnage. Une performance négative signifie qu'il y a plus de polluant à la sortie des ouvrages qu'il y en a dans le ruissellement.

**Tableau 4.4 Performance d'enlèvement (en termes de concentrations) des MES, de la DCO, du P, de l'azote total et de la conductivité pour les différents évènements pluvieux**

Date	Présence d'effluent à la sortie des infras	Échantillonnage effectué	Enlèvement des MES (%)	Enlèvement de la DCO (%)	Enlèvement du phosphore total (%)	Enlèvement de l'azote total (%)	Réduction de la conductivité (%)
2020-08-11	-	-	100	100	100	100	100
2020-08-17	X	-	-	-	-	-	-
2020-08-18	-	-	100	100	100	100	100
2020-08-20	-	-	100	100	100	100	100
2020-08-21	-	-	100	100	100	100	100
2020-08-24	-	-	100	100	100	100	100
2020-08-29	X	-	-	-	-	-	-
2020-09-07	-	-	100	100	100	100	100
2020-09-13	-	-	100	100	100	100	100
2020-09-29	X	X	-	-	-	-	-
2020-10-02	-	-	100	100	100	100	100
2020-10-07	-	-	100	100	100	100	100
2020-10-10	-	-	100	100	100	100	100
2020-10-13	-	-	100	100	100	100	100
2020-10-15	-	-	100	100	100	100	100
2020-10-19	X	-	-	-	-	-	-
2020-10-21	X	-	-	-	-	-	-
2020-10-24	X	-	-	-	-	-	-
2020-10-26	X	-	-	-	-	-	-
2020-11-15	-	-	100	100	100	100	100
2020-11-22	X	-	-	-	-	-	-
2020-11-25	-	-	100	100	100	100	100
2020-11-30	X	-	-	-	-	-	-
2021-03-26	X	X	-	-	-	-	-
2021-03-28	-	-	100	100	100	100	100
2021-04-15	X	X	69	-	-	-	98
2021-04-21	-	-	100	100	100	100	100
2021-04-25	-	-	100	100	100	100	100
2021-04-28	-	-	100	100	100	100	100
2021-04-30	X	X	-	-	-	-	-
2021-06-03	-	X	100	100	100	100	100
2021-06-05	-	-	100	100	100	100	100
2021-06-14	-	-	100	100	100	100	100
2021-06-18	-	-	100	100	100	100	100
2021-06-21	-	X	100	100	100	100	100
2021-06-26	X	X	-	-	-	-	-
2021-06-30	-	-	100	100	100	100	100
2021-07-06	-	-	100	100	100	100	100
2021-07-08	X	X	65	64	52	-72	98
2021-07-13	-	X	100	100	100	100	100
2021-07-20	-	X	100	100	100	100	100
2021-07-23	-	-	100	100	100	100	100
2021-07-25	-	-	100	100	100	100	100
2021-08-07	-	-	100	100	100	100	100
2021-08-09	-	-	100	100	100	100	100
2021-08-11	-	-	100	100	100	100	100
2021-08-29	-	-	100	100	100	100	100
2021-08-30	-	X	100	100	100	100	100
2021-09-05	-	-	100	100	100	100	100
2021-09-06	-	-	100	100	100	100	100
2021-09-09	-	-	100	100	100	100	100
2021-09-15	-	X	100	100	100	100	100

**Tableau 4.4 Performance d'enlèvement (en termes de concentrations) des MES, de la DCO, du phosphore total, de l'azote total et de la conductivité pour les différents évènements pluvieux (suite)**

Date	Présence d'effluent à la sortie des infra	Échantillonnage effectué	Enlèvement des MES (%)	Enlèvement de la DCO (%)	Enlèvement du phosphore total (%)	Enlèvement de l'azote total (%)	Réduction de la conductivité (%)
2021-09-24	X	X	27	-700	-460	-11	-3408
2021-10-02	-	-	100	100	100	100	100
2021-10-16	-	-	100	100	100	100	100
2021-10-18	-	-	100	100	100	100	100
2021-10-21	-	-	100	100	100	100	100
2021-10-22	X	-	-	-	-	-	-
2021-10-26	-	-	100	100	100	100	100
2021-10-30	X	-	-	-	-	-	-
2021-11-02	-	-	100	100	100	100	100
2021-11-12	X	X	44	-55	-171	-67	-1865

**Tableau 4.5 Statistiques des performances d'enlèvement des paramètres de qualité de l'eau (en termes de concentration)**

Statistiques	Enlèvement des MES (%)	Enlèvement de la DCO (%)	Enlèvement du phosphore total (%)	Enlèvement de l'azote total (%)	Réduction de la conductivité (%)
Moyenne	96	79	81	90	-14
Médiane	100	100	100	100	100
Valeur minimale	27	-700	-460	-72	-3408
Valeur maximale	100	100	100	100	100
Écart-type	14	117	89	37	569
Taille de l'échantillon	48	47	47	47	48

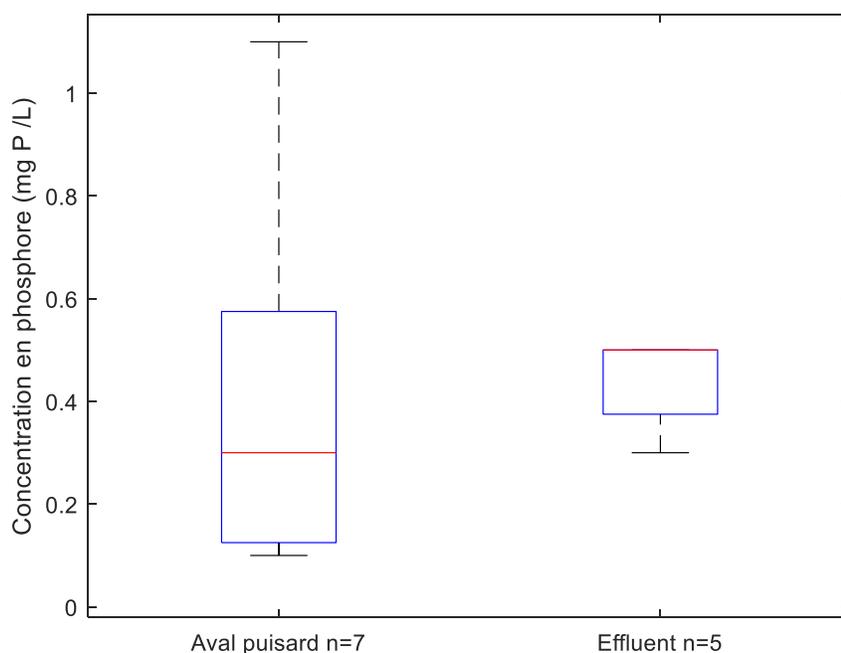
Pour les MES, l'enlèvement va de 27 à 100 %, avec une moyenne de 96 % et une médiane de 100 %. Les performances d'enlèvement de 100 % sont associées aux évènements sans effluent. Pour les évènements pluvieux avec effluent, les performances sont de 69 %, 65 %, 27 % et 44 % d'enlèvement. Une limite du projet est que peu de données lors d'évènements pluvieux avec effluent ont été récoltées et qu'il y avait peu de circulation sur le stationnement. Les performances d'enlèvement sont inférieures à celles retrouvées dans la littérature, soit des performances entre 58 et 99,5 %. Or, comme les valeurs à l'entrée sont faibles, il est plus difficile d'obtenir des performances d'enlèvement élevées. En effet, le pourcentage d'enlèvement tend à être plus faible pour les affluents plus propres (Wright Water Engineers & Geosyntec Consultants, 2007). Il est donc utile de comparer les valeurs de concentrations à la sortie des infrastructures de contrôle à

la source avec les valeurs acceptées de rejet aux milieux récepteurs. Selon les critères du MELCC de qualité d'eau de surface, pour protéger la vie aquatique des effets aigus engendrés par les MES, la limite est posée à une augmentation de 25 mg/L par rapport à la concentration initiale du milieu récepteur. Pour les effets chroniques, la valeur peut descendre jusqu'à 5 mg/L pour les eaux limpides, où naturellement les eaux ont une concentration en MES inférieure à 25 mg/L (Caux *et al.*, 1997; CCME, 1999). La concentration médiane en MES à la sortie des infrastructures de contrôle à la source, soit de 9 mg/L, est sous le critère de concentration maximale en MES pour protéger la vie aquatique des effets aigus. Donc, même si les pourcentages d'enlèvement sont inférieurs à ceux retrouvés dans la littérature, les infrastructures du site de Boucherville semblent enlever adéquatement les MES.

#### 4.1.4.2 Phosphore total

En milieu urbain, le phosphore total peut provenir de plusieurs sources. Le ruissellement transporte le phosphore présent dans les engrais, les excréments d'animaux, les résidus végétaux et les détergents associés aux automobiles (Yang & Toor, 2018). Comme il a été mentionné à la section 3.1.2.2, les sources connues de phosphore pour le site à l'étude sont un engrais liquide qui est aspergé sur les végétaux au printemps pour aider à leur croissance ainsi que les cellules de biorétention elles-mêmes, qui sont des réservoirs de résidus végétaux. L'engrais liquide ajouté est une source ponctuelle dans le temps, c'est-à-dire qu'elle a un impact limité dans le temps, tandis que les résidus végétaux présents dans les cellules de biorétention sont une source naturelle et continue dans le temps. Cependant, un entretien est prévu à l'automne pour tailler les arbustes et les graminées et pour ramasser une partie des résidus végétaux. Cet entretien contribue à diminuer l'apport en phosphore sur le site.

Les concentrations typiques en phosphore pour le ruissellement urbain varient de 0,15 à 0,85 mg/L, avec une médiane de 0,35 mg/L (MDDEP & MAMROT, 2014). La Figure 4.9 illustre les concentrations en phosphore total à l'aval du puisard P-14 sur le site ainsi que les concentrations en phosphore total à la sortie des infrastructures de contrôle à la source.



**Figure 4.9 Concentrations en phosphore à l'aval du puisard P-14 et à l'effluent des infrastructures de contrôle à la source**

La concentration en phosphore total à l'aval du puisard P-14 varie de 0,1 à 1,1 mg/L, avec une médiane de 0,3 mg/L. Ces valeurs sont similaires aux concentrations typiques pour le ruissellement urbain. La concentration en phosphore total à la sortie des ouvrages du site varie entre 0,3 et 0,5 mg/L. Selon les critères de qualité des eaux de surface du MELCC, la concentration maximale acceptée est de 0,03 mg/L pour protéger le milieu récepteur de la croissance d'algues et de l'eutrophisation (OMOEE, 1994). Donc, les concentrations en phosphore total avec ou sans traitement par les infrastructures du site ne respectent pas le critère de protection des eaux de surface.

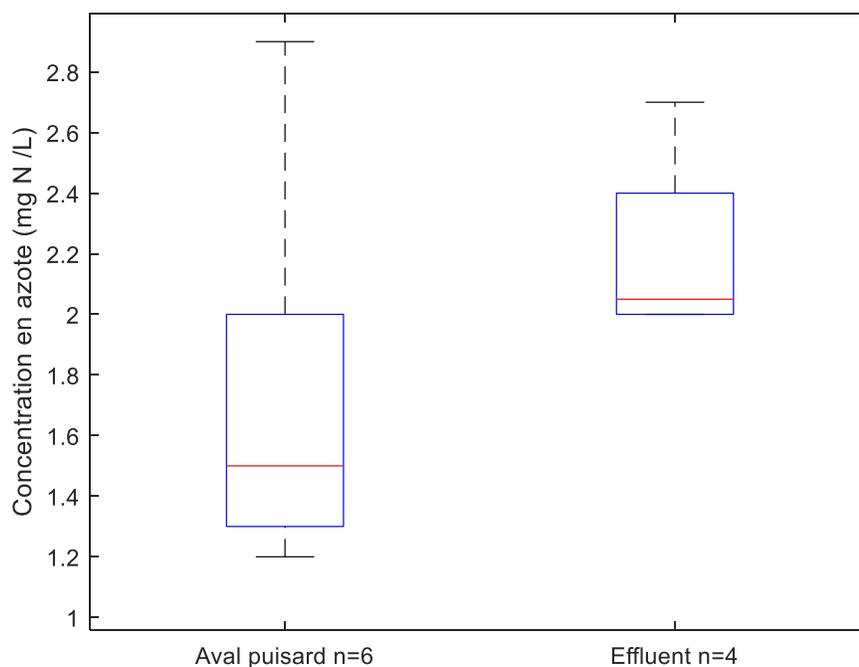
La performance d'enlèvement du phosphore des infrastructures sur le stationnement incitatif varie entre -460 et 100 % avec une moyenne de 81 % et une médiane de 100 %. Les performances d'enlèvement de 100 % sont associées aux événements sans effluent. Pour les événements pluvieux avec effluent, les performances sont de 52 %, -460 % et -171 % d'enlèvement. Dans la revue de littérature effectuée par Sørberg *et al.* (2020), les valeurs de performance d'enlèvement du phosphore total peuvent varier entre -398 et 98%. Ces valeurs sont similaires à ce qui a été calculé pour le stationnement incitatif de Boucherville. Les variations d'enlèvement du phosphore sont principalement dues à la variation des proportions de phosphore particulaire et dissous. En

effet, le phosphore particulaire peut être facilement filtré par les cellules de biorétention, mais l'enlèvement du phosphore dissous est plus variable entre chaque évènement pluvieux (Qiu *et al.*, 2019).

Deux performances négatives ont eu lieu, soit les 24 septembre et 12 novembre 2021. La composition du terreau peut même être une source de relargage de matière organique et de phosphore dissous, selon la quantité de matière organique et la teneur en certains métaux, tels que l'aluminium, le fer et calcium (Marvin *et al.*, 2020). Un terreau de plantation avec une teneur en matière organique de 10 % ou plus peut causer un relargage de phosphore (Roy-Poirier *et al.*, 2010). Le terreau utilisé pour la plantation des vivaces et des arbustes est composé de 10 à 15 % de matière organique. De plus, le temps de rétention semble être un paramètre important dans l'enlèvement du phosphore (Roy-Poirier *et al.*, 2010). À noter que les conclusions tirées avec les résultats d'évènements avec effluents seraient à valider avec plus de données.

#### 4.1.4.3 Azote

Les sources d'azote total en milieu urbain sont les mêmes que pour le phosphore, soit les engrais, les excréments d'animaux et les résidus végétaux. Les concentrations typiques en azote pour le ruissellement urbain varient de 1 à 4 mg/L, avec une médiane de 2 mg/L (MDDEP & MAMROT, 2014). La Figure 4.10 illustre les concentrations en azote total à l'aval du puisard P-14 sur le site ainsi que les concentrations en azote total à la sortie des infrastructures de contrôle à la source.



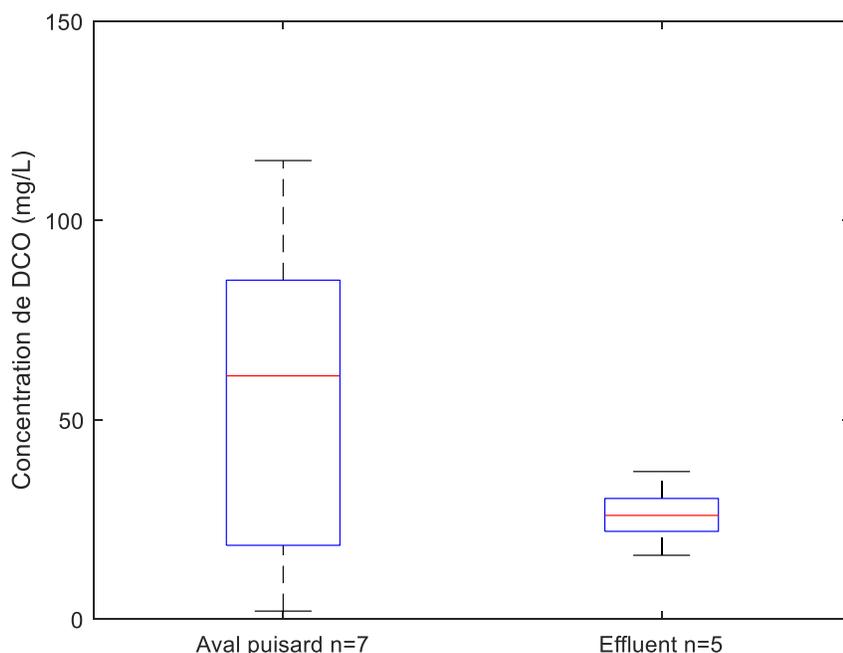
**Figure 4.10 Concentrations en azote à l'aval du puisard P-14 et à l'effluent des infrastructures de contrôle à la source**

La concentration en azote total à l'aval du puisard P-14 varie de 1,2 à 2,9 mg/L, avec une médiane de 1,5 mg/L. Ces valeurs sont similaires aux concentrations typiques pour le ruissellement urbain. La concentration en azote total à la sortie des infrastructures de contrôle à la source du site varie entre 2,1 et 2,7 mg/L, avec une médiane de 2,2 mg/L. Comme pour le phosphore, il y a une source d'azote dans les infrastructures vertes qui fait que la concentration à l'effluent est supérieure à celle à l'aval du puisard P-14. La performance d'enlèvement résultante est en moyenne de 90 %. Les performances peuvent varier de -72 % à 100 %. Selon la littérature, la performance moyenne d'enlèvement de l'azote peut se situer entre -8 et 99,1 %, tout dépendant de la configuration des infrastructures. Les performances d'enlèvement de 100 % sont associées aux évènements sans effluent. Pour les évènements avec effluents, les performances d'enlèvement sont de -72, -11 et -67 %, respectivement pour les 8 juillet, 24 septembre et 12 novembre 2021. Il y a donc du relargage d'azote pour chaque évènement avec effluent observé. Les concentrations d'azote peuvent augmenter après des périodes de temps sec, car les conditions aérobiques inter-évènement nitrifient l'azote, la rendant ainsi disponible pour du relargage (Hatt *et al.*, 2007). Pour enlever l'azote avec des systèmes de biorétention, de longs temps de rétention sont nécessaires pour avoir les conditions anoxiques idéales pour les

bactéries dénitrifiantes. En pratique, cela peut être réalisé en utilisant des terreaux à faible porosité et des drains décalés par rapport au fond de l'infrastructure ou en contrôlant le débit de sortie (Peterson *et al.*, 2015). De plus, l'ajout de compost dans le mélange de terreau à plantation peut causer du relargage d'azote (Roseen & Stone, 2013). Par contre, davantage de résultats seraient nécessaires pour conclure à un relargage constant d'azote pour les infrastructures de contrôle à la source du site.

#### 4.1.4.4 Demande chimique en oxygène

La demande chimique en oxygène, ou DCO, est un paramètre utilisé pour quantifier la consommation d'oxygène pour oxyder chimiquement la matière organique présente dans les eaux. En eaux pluviales, les sources de matière organique sont les excréments animaux, les déchets, les huiles et graisses automobiles et les engrais (Minnesota Pollution Control Agency, 2022a). Les valeurs typiques dans les eaux de ruissellement urbain se situent entre 20 mg/L et 200 mg/L, avec une médiane de 70 mg/L. La Figure 4.11 présente les concentrations de DCO en aval du puisard P-14 sur le site et à l'effluent des infrastructures de contrôle à la source.



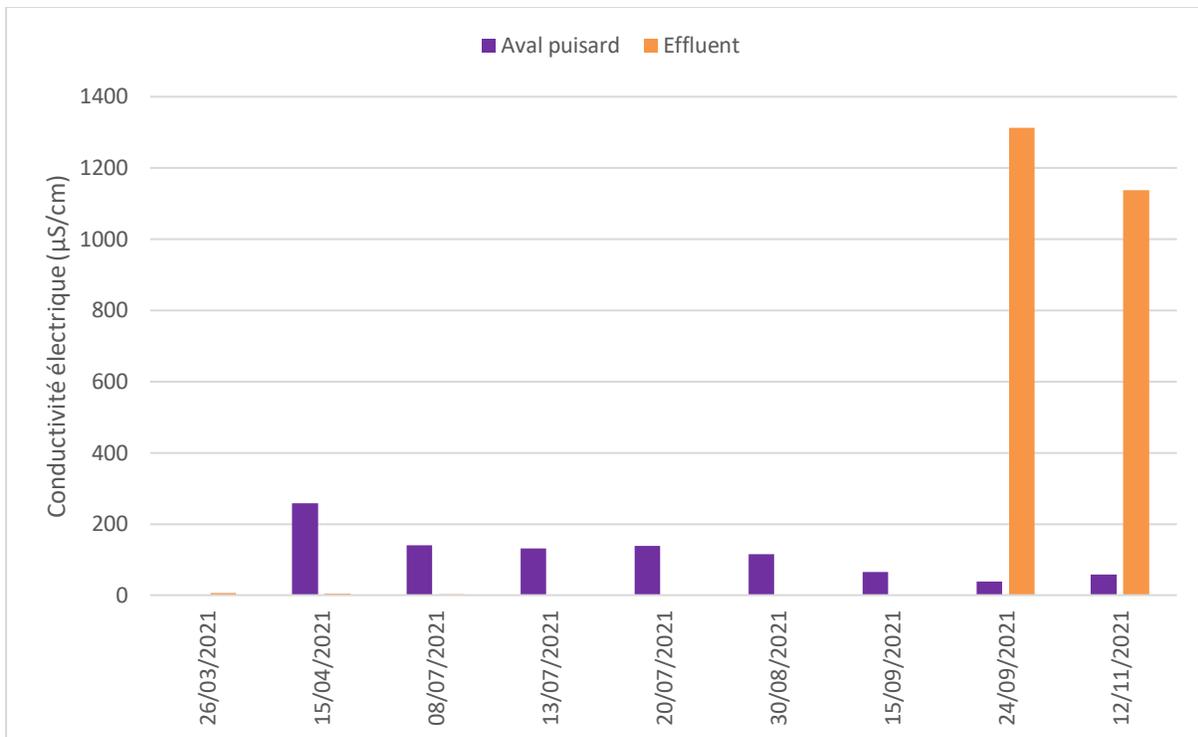
**Figure 4.11 Concentrations en an DCO à l'aval du puisard P-14 et à l'effluent des infrastructures de contrôle à la source**

La concentration en DCO à l'aval du puisard P-14 varie entre 2 et 115 mg/L avec une médiane de 61 mg/L. Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles du ruissellement typique

urbain. La concentration en DCO à la sortie des infrastructures de contrôle à la source varie entre 16 et 37 mg/L avec une médiane de 26 mg/L. La médiane à la sortie des infrastructures est inférieure à celle à l'aval du puisard P-14. Par contre, la performance d'enlèvement des infrastructures varie de -700 à 100 %, avec une moyenne de 79 %. Selon la littérature, la performance moyenne d'enlèvement de la DCO peut se situer entre -50,6 et 97 %. Les performances d'enlèvement des événements sans effluent sont de 100 %, tandis que les événements avec effluents ont des performances de 64 %, -700 % et -55 %. Les valeurs négatives de performance signifient qu'il y a plus de DCO dans les échantillons à l'effluent qu'il y en a dans les échantillons à l'aval du puisard P-14. Il est certain que des données supplémentaires seraient nécessaires pour avoir plus d'évènements avec effluents. Or, tout comme pour le phosphore, les deux performances négatives ont eu lieu les 24 septembre et 12 novembre 2021. Comme il a été vu précédemment, la composition du terreau de plantation a un impact important sur le relargage de matière organique (Marvin *et al.*, 2020). De plus, à l'automne, une plus grande quantité de résidus végétaux est disponible dû à la perte du feuillage, ce qui augmente la quantité de résidus végétaux disponible et ainsi la quantité de matière organique.

#### 4.1.4.5 Conductivité électrique

La conductivité électrique est un paramètre qui permet d'estimer la quantité d'ions et de sels dissous dans l'eau. Ces ions peuvent provenir des sols ou bien de milieux urbains, sous forme de sels de déglçage utilisés sur les pavages. Ce paramètre est utilisé sur une base d'essai pour remplacer la concentration en sodium. La Figure 4.12 présente les résultats de conductivité électrique au cours de l'année 2021 pour les eaux à l'aval du puisard P-14 et pour les eaux à l'effluent des infrastructures de contrôle à la source.



**Figure 4.12 Suivi de la conductivité électrique dans le temps**

La conductivité électrique à l'aval du puisard P-14 diminue graduellement dans le temps à partir du 15 avril 2021 jusqu'au 24 septembre 2021. Cette observation pourrait être expliquée par le fait que les sels épandus durant l'hiver s'accumulent dans la fosse à sédiments et dans le substrat suite à la fonte des neiges et sont graduellement lessivés tout au long de la saison estivale.

Pour les eaux à l'effluent des infrastructures de contrôle à la source, la conductivité électrique est pratiquement nulle, allant de 0 à 5 µS/cm du 26 mars 2021 au 15 septembre 2021. Puis, les 24 septembre et 12 novembre 2021, la conductivité augmente à des valeurs au-dessus de 1000 µS/cm. La performance de réduction de la conductivité varie entre -3408 et 100 %, avec une moyenne de -14 % et une médiane de 100 %. Selon la littérature, la performance moyenne de réduction de la conductivité peut se situer entre -116,0 et 86 %. Les performances de réduction pour les événements sans effluent sont de 100 %, tandis que les événements avec effluents ont des performances de 98 %, -3408 % et -1865 %. Les valeurs négatives de performance signifient qu'il y a plus d'ions conducteurs dans les échantillons à l'effluent qu'il y en a dans les échantillons à l'aval du puisard P-14. Les deux performances négatives ont eu lieu les 24 septembre et 12 novembre 2021. Globalement, à ces dates, il y a eu du relargage de phosphore, d'azote et de DCO. Comme discuté, le phosphore est relargué sous forme d'ions dissous dans l'eau. Il en va de même pour l'azote et la matière organique. Ce relargage pourrait avoir fait augmenter la

conductivité électrique de l'eau pour ces dates. La conductivité électrique ne semble donc pas être un bon paramètre dans ce cas-ci pour suivre la concentration en sels de déglacage, car la matière organique dans le sol des cellules de biorétention peut être une source de relargage et d'augmentation de la conductivité.

#### **4.1.5 Suivi des végétaux**

Cette section présente les résultats du suivi des végétaux effectué sur le site de Boucherville. Le suivi est séparé en deux parties, soit le suivi de la croissance des végétaux dans le pavage alvéolé et le suivi du taux de survie des végétaux à l'intérieur des cellules de biorétention.

##### *4.1.5.1 Pavage alvéolé*

Le suivi du pavage alvéolé a été effectué entre le 1<sup>er</sup> juin et le 15 septembre 2021. Entre ces dates, sept prises de photos ont été récoltées : 1<sup>er</sup> juin, 15 juin, 26 juin, 8 juillet, 21 juillet, 3 septembre et 15 septembre. Les Figure 4.13 et Figure 4.14 présentent les photos prises du pavage alvéolé au site #3 pour le 1<sup>er</sup> juin et 8 juillet 2021.

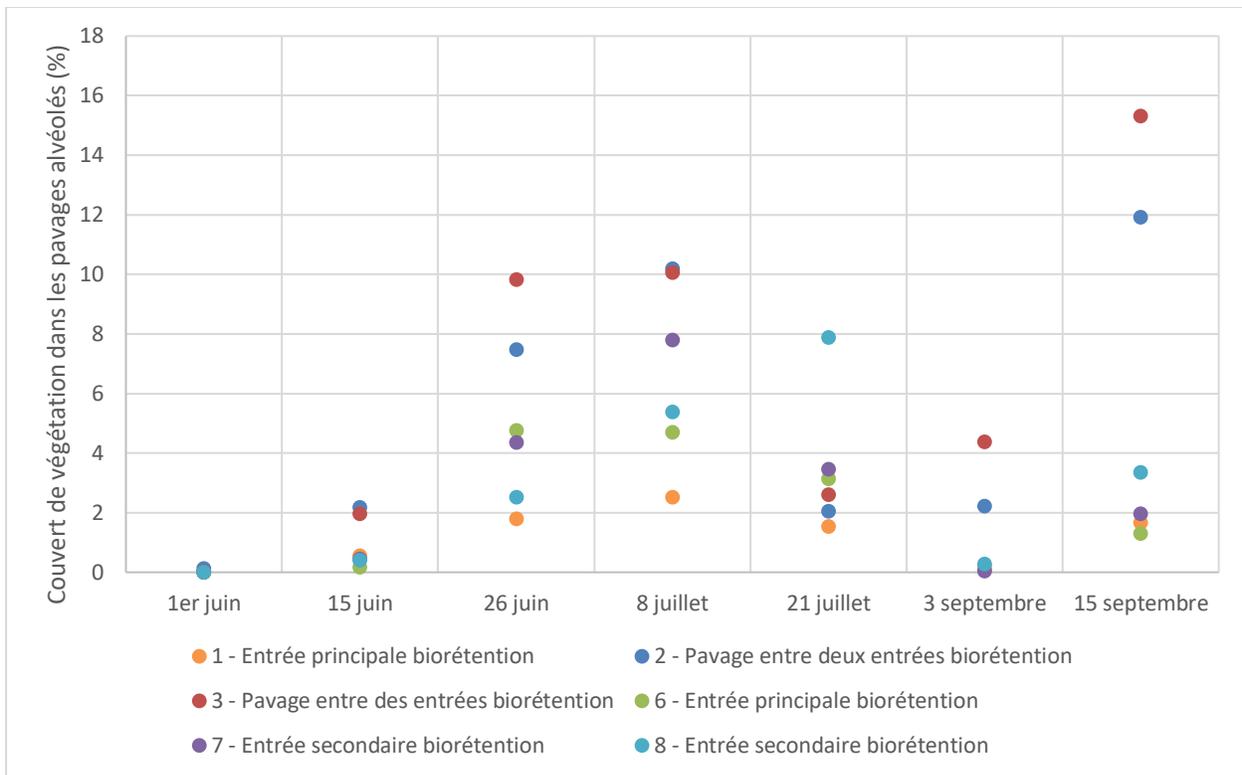


**Figure 4.13 Pavage perméable au site #3 le 1<sup>er</sup> juin 2021**

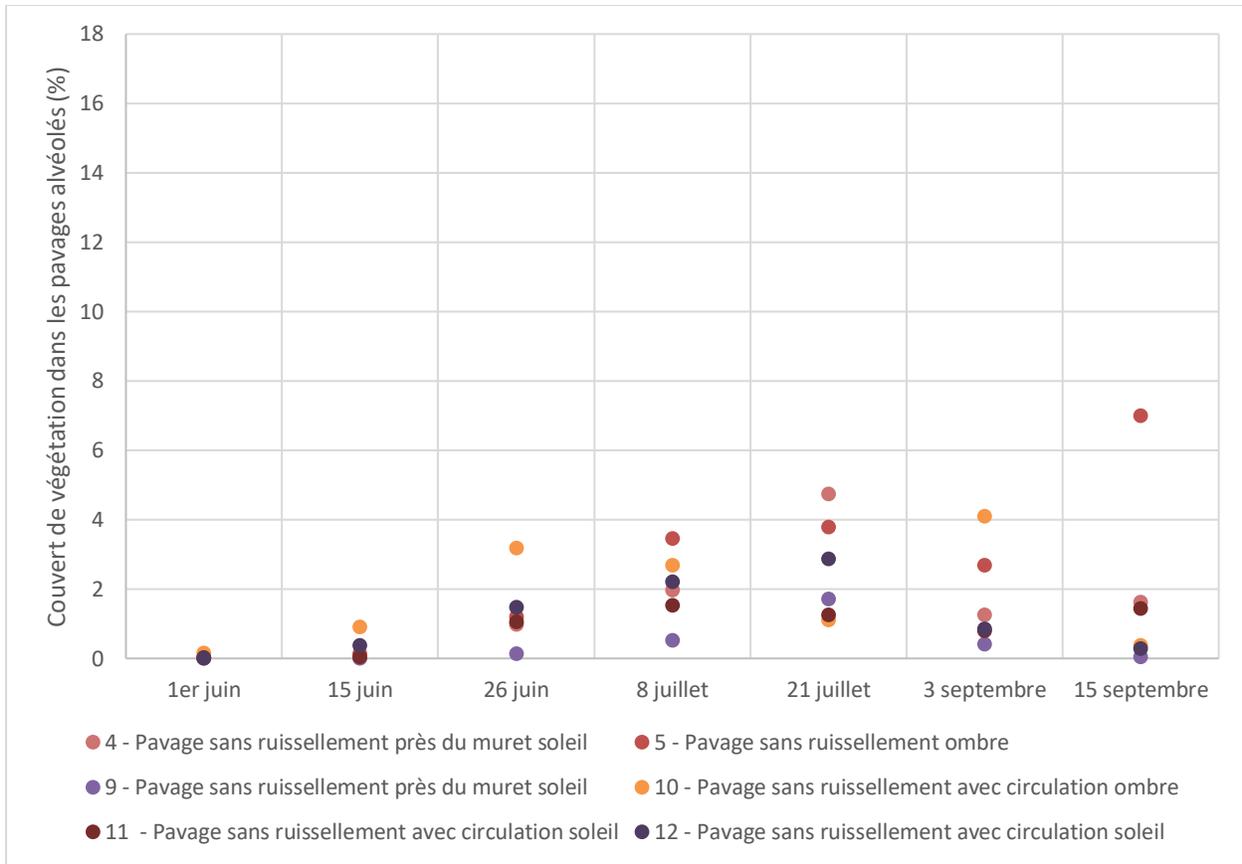


**Figure 4.14 Pavage perméable au site #3 le 8 juillet 2021**

Par deux fois, des végétaux ont étéensemencés dans les espaces des pavages alvéolés depuis la construction du stationnement incitatif mais, comme démontré à la Figure 4.13, en date du 1<sup>er</sup> juin 2021, très peu de végétaux avaient poussé. Le 1<sup>er</sup> juin 2021, le recouvrement de pixels verts sur l'image était de 0,01 %. Le 8 juillet 2021, le recouvrement était de 10,07 %, car des végétaux ont poussé dans le pavage alvéolé. Le pourcentage de recouvrement ne tient pas compte de la surface occupée par les alvéoles de béton. L'évolution du recouvrement du pavage alvéolé est présentée aux Figure 4.15 et Figure 4.16. La Figure 4.15 présente le recouvrement pour les sites près des cellules de biorétention, tandis que la Figure 4.16 présente les autres sites.



**Figure 4.15 Recouvrement végétal du pavage alvéolé à proximité des cellules de biorétention**



**Figure 4.16 Recouvrement végétal du pavage alvéolé pour les autres sites**

Pour le pavage alvéolé près des cellules de biorétention, les sites #2 et #3 ont un recouvrement supérieur pour six visites sur sept. Ces sites sont localisés entre l'entrée principale et une entrée secondaire des cellules de biorétention. Près des aires de biorétention, il y a un apport en eau de ruissellement en provenance des aires de pavage perméable imperméabilisées. Or, lors de fortes pluies, le ruissellement peut briser ou arracher certains végétaux. De plus, l'ensoleillement estival réchauffe les blocs de pavés et assèche le substrat disponible pour les végétaux. Les sites #2 et #3 sont donc idéalement situés. En effet, ils ont un apport d'eau, mais ils ne sont pas exposés à autant de ruissellement que les entrées principales des cellules de biorétention. Ils sont aussi protégés des rayons du soleil pour une partie de la journée, grâce aux arbustes qui créent de l'ombrage.

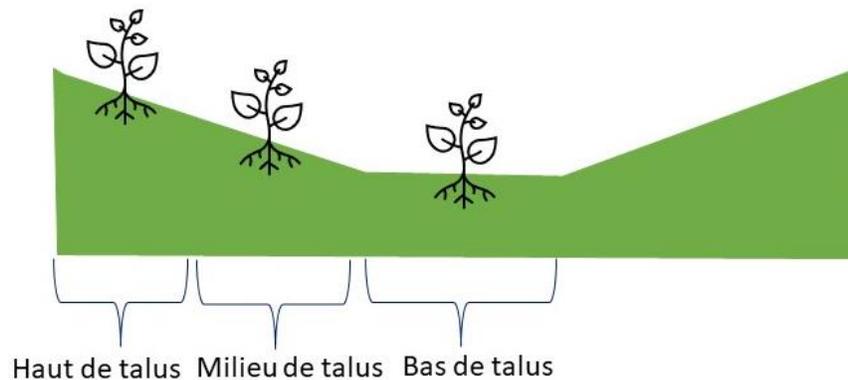
Les sites #5 et #10 ont en moyenne un recouvrement végétal plus élevé. Ces sites ont des taux de circulation différents, mais ont tous les deux des obstacles qui créent de l'ombrage pour une partie de la journée. Aucun de ces deux sites ne reçoit d'apport de ruissellement et, en général,

les taux de recouvrement maximaux sont inférieurs à ceux des sites situés près des cellules de biorétention, qui reçoivent des apports d'eau par ruissellement.

Pour le pavage alvéolé sur le site de Boucherville, la quantité d'ombre semble être un critère important pour la survie des végétaux.

#### 4.1.5.2 *Survie des végétaux des cellules de biorétention*

La survie des végétaux dans les cellules de biorétention a été déterminée en effectuant plusieurs décomptes des végétaux du site. Les décomptes ont été comparés entre eux et le taux de survie a pu être calculé. Pour la saison estivale de 2021, un décompte a eu lieu le 1<sup>er</sup> juin et un autre le 24 septembre 2021. Le décompte du nombre de végétaux qui était indiqué sur les plans d'implantation a également été effectué et a été intitulé « décompte théorique ». Pour répertorier les végétaux, leur localisation par rapport au talus d'une cellule de biorétention a été prise en note. La Figure 4.17 présente les localisations des végétaux possibles qui ont été utilisées dans les décomptes.



**Figure 4.17 Localisation des végétaux par rapport au talus d'une cellule de biorétention**

Le Tableau 4.6 présente les résultats des décomptes et le taux de survie pour 2021.

Tableau 4.6 Décompte des végétaux dans les cellules de biorétention du site et taux de survie pour l'année 2021

Type	Nom	Localisation	Décompte théorique	Décompte 1 <sup>er</sup> juin 2021	Décompte 24 septembre 2021	Écart entre le décompte théorique et le décompte du 1 <sup>er</sup> juin (%)	Survie pour la saison 2021 (%)
Arbre	<i>Celtis occidentalis</i>	-	8	8	8	0	100
	<i>Ginkgo biloba</i>	-	9	9	9	0	100
	<i>Gleditsia triacanthos inermis</i> 'Northern Acclaim'	-	3	3	3	0	100
	<i>Gymnocladus dioicus</i> 'Espresso'	-	14	14	14	0	100
	<i>Larix laricina</i>	-	4	4	4	0	100
	Orme 'New Horizon'	-	2	2	2	0	100
	Orme 'Sapporo Gold'	-	2	2	2	0	100
	Orme 'Vanguard'	-	3	3	3	0	100
Arbuste	<i>Cornus Stoloniifera</i> 'Kelsey'	Bas de talus	60	51	48	15	94
	<i>Dierville chèvrefeuille</i>	Bas de talus	93	85	84	9	99
	<i>Hypericum kalmianum</i>	Milieu/Bas de talus	244	238	219	2	93
	<i>Rhus aromatica</i>	Bas de talus	60	55	55	8	100
	<i>Rosa blanda</i>	Bas de talus	104	92	92	12	100
	<i>Salix repens</i>	Milieu/Bas de talus	50	46	45	8	98
	<i>Syphoricarpos albus</i>	Bas de talus	55	55	55	0	100
	<i>Saule pourpre Gracilis</i>	Milieu/Bas de talus	13	13	7	0	54
Vivace	<i>Alchemilla mollis</i>	Bas de talus	101	101	101	0	100
		Haut de talus	60	16	0	73	0
		Bas de talus	125	104	94	17	91
	<i>Hémérocalle abricot-orangé</i>	Haut/Milieu/Bas de talus	262	242	221	8	94
	<i>Hemerocallis</i> 'Pink Prelude'	Haut de talus	218	192	174	12	92
	<i>Hemerocallis</i> 'Stella de Oro'	Haut/Milieu de talus	306	253	252	17	100
	<i>Panic raide</i>	Haut/Milieu/Bas de talus	259	235	232	9	99
	<i>Rudbeckia fulgida</i> var. 'Pot of Gold'	Haut de talus	455	124	91	73	74
<i>Sesleria autumnalis</i>	Haut de talus	701	511	416	27	83	

Le taux de survie des arbres est de 100 %, peu importe l'espèce. Pour les arbustes, le taux de survie pour 2021 varie entre 54 et 100 %. Le taux de survie de 54 % est attribué au *Saule pourpre Gracilis* avec une perte 6 arbustes entre le 1<sup>er</sup> juin et le 24 septembre. Pour les vivaces, le taux de survie varie entre 0 et 100 %. En effet, tous les *Alchemilla mollis* situés en haut de talus sont morts, tandis que 91 % des *Alchemilla mollis* situés en bas de talus ont survécu. Comme indiqué au Tableau 3.4, cette espèce a une faible résistance à la sécheresse, ce qui expliquerait pourquoi elle survit moins bien en haut de talus, car le taux d'humidité dans le sol y est moindre qu'en bas de talus. Si l'écart entre le décompte théorique et le décompte du 1<sup>er</sup> juin est pris en compte, l'espèce *Rudbeckia fulgida* var. 'Pot of Gold' a également un faible taux de survie.

#### 4.1.6 Recommandations

Cette section contient des recommandations pour les futures conceptions d'ouvrages, ainsi que pour leur entretien.

##### 4.1.6.1 Recommandations pour la conception des cellules de biorétention

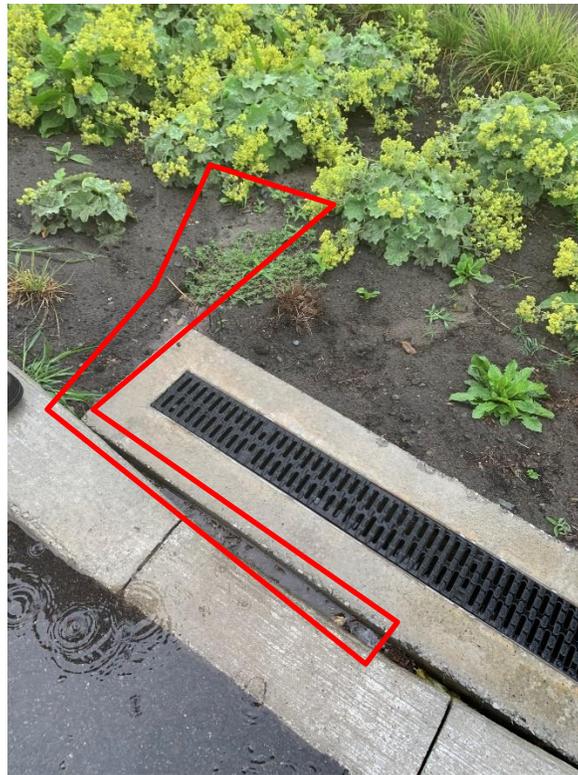
Comme vu précédemment dans la section 3.1.2.2, les eaux de ruissellement entrent dans les cellules de biorétention par des abaissements dans les bordures. La conception prévoyait que les eaux de ruissellement, après être entrées, passeraient par un bassin de stockage des sédiments. Or, les abaissements dans la bordure et les bassins de stockage sont séparés par un espace d'environ 2 pouces. La Figure 4.18 présente l'implantation réelle du bassin de stockage des sédiments.



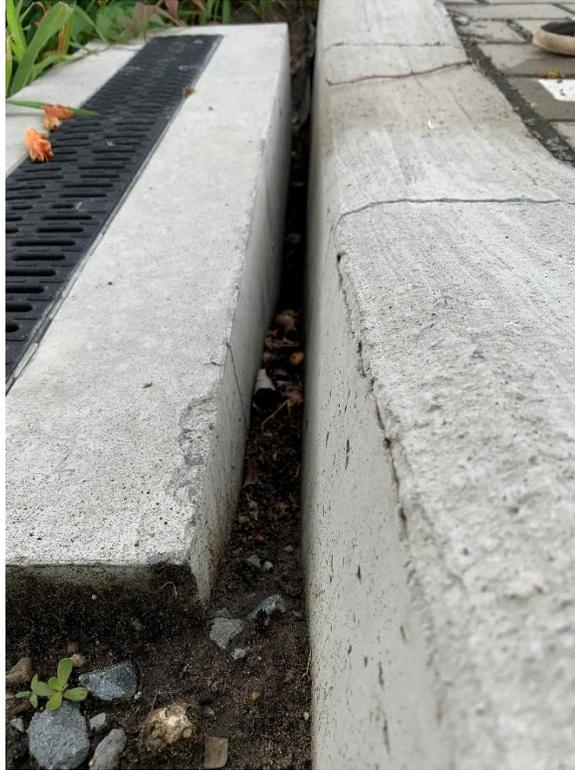
**Figure 4.18** Espacement entre la bordure abaissée à l'entrée d'une cellule de biorétention et d'un bassin de stockage des sédiments

Cet espace séparant la bordure du bassin fait en sorte que les eaux de ruissellement contournent le bassin de sédimentation.

Donc, non seulement le bassin ne peut pas remplir son objectif, mais, en plus, les eaux érodent le terreau mis en place entre le bassin et la bordure. En date du 14 juillet 2021, le terreau de plantation était creusé de 9,5 pouces. La Figure 4.19 montre le contournement du bassin de stockage des sédiments par les eaux de ruissellement. La Figure 4.20 présente le creusement entre la bordure abaissée et le bassin de stockage des sédiments.



**Figure 4.19 Contournement du bassin de stockage des sédiments par les eaux de ruissellement entrant dans une cellule de biorétention (la délimitation en rouge représente le chemin des eaux de ruissellement)**



**Figure 4.20 Creusement du terreau à l'entrée d'une cellule de biorétention par les eaux de ruissellement**

Pour les conceptions futures, il faudrait s'assurer qu'il n'y ait pas d'espace entre la bordure et le bassin de sédimentation. Comme il a été présenté à la section 3.1.2, le site comprend trois types d'ouvrages, couvrant ainsi 60 % de la superficie du site. Ce pourcentage élevé a pour conséquence de faibles ratios de superficie imperméable drainée par unité d'aire d'infrastructures de contrôle à la source. Il y a donc très peu de ruissellement sur le site pour alimenter les aires de biorétention. Une solution a été d'imperméabiliser une partie du pavage perméable pour augmenter les apports en eau mais, pour les conceptions futures, il faudrait prévoir plus d'apports d'eau aux cellules de biorétention pour la survie des végétaux.

Les analyses de la qualité de l'eau à l'effluent des infrastructures de contrôle à la source ont montré un faible enlèvement ou même un relargage en phosphore et en azote. Comme il a été mentionné à la section 4.1.4.3, il faut prévoir des conditions aérobies et anoxiques pour permettre la dénitrification et l'enlèvement de l'azote. Il est donc recommandé de prévoir des terreaux de faible porosité et des drains décalés par rapport au fond de l'infrastructure ou de contrôler le débit de sortie (Peterson *et al.*, 2015). De plus, la composition du terreau à plantation a un impact important sur la qualité des eaux des effluents (Roseen & Stone, 2013). Pour le phosphore, le

taux d'enlèvement dépend du temps de rétention, de la composition du terreau car des pourcentages élevés de matière organique peuvent causer du relargage, et de la variété des végétaux implantés (Roy-Poirier *et al.*, 2010).

#### 4.1.6.2 *Recommandations pour le choix des végétaux*

En général, le pourcentage de survie des végétaux dans les cellules de biorétention est élevé. Par contre, certains végétaux ont mal résisté aux conditions dans les cellules de biorétention et aux conditions météorologiques de la période de suivi. Selon ces taux de survie, les végétaux qui ne sont pas recommandés pour des cellules de biorétention avec un apport faible en ruissellement sont *Alchemilla mollis*, *Rudbeckia fulgida* var. 'Pot of Gold' et *Saule pourpre Gracilis*. Les Figure 4.21, Figure 4.22 et Figure 4.23 présentent les végétaux ayant moins bien survécu.



**Figure 4.21 Exemple de performance de *Rudbeckia fulgida* var. 'Pot of Gold' dans les cellules de biorétention du site de Boucherville**



Figure 4.22 Exemple de performance de *Alchemilla mollis* dans les cellules de biorétention du site de Boucherville

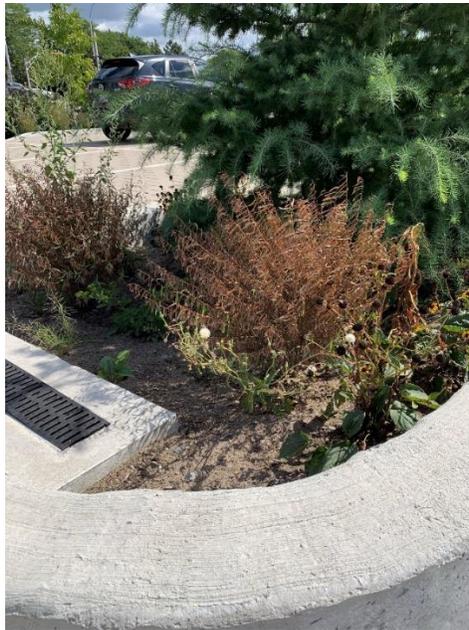
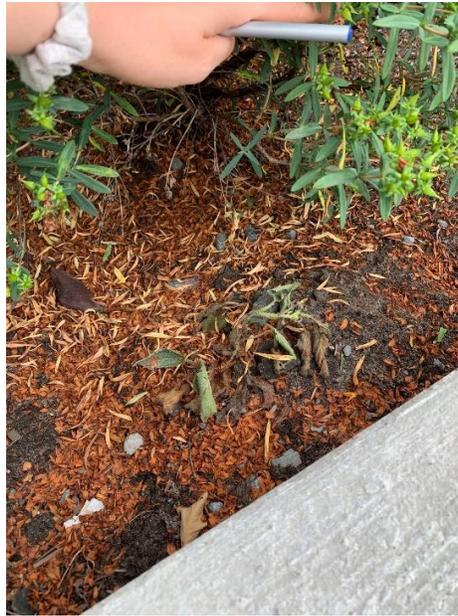


Figure 4.23 Exemple de performance de *Saule pourpre Gracilis* dans les cellules de biorétention du site de Boucherville

#### 4.1.6.3 *Recommandations pour l'entretien*

En ce qui concerne l'entretien des infrastructures de contrôle à la source, deux recommandations sont proposées. Premièrement, pour les cellules de biorétention, un espacement insuffisant a été prévu entre les arbustes en bas et milieu de talus et les vivaces en haut de talus. Conséquemment, les arbustes envahissent les vivaces et peuvent aller jusqu'à causer leur décès. La Figure 4.24 est un exemple d'envahissement des vivaces par les arbustes.



**Figure 4.24 Exemple d'envahissement des vivaces par les arbustes**

Pour le pavage perméable imperméabilisé ou pour le pavage asphalté, il serait recommandé de prévoir un balayage des surfaces chaque année pour empêcher l'accumulation de sédiments et de débris. La Figure 4.25 illustre l'accumulation et le transport des sédiments sur le pavage perméable imperméabilisé.



**Figure 4.25 Accumulation et transport des sédiments sur le pavage perméable imperméabilisé durant un évènement de pluie**

## **4.2 Résultats de l'analyse des pluies historiques**

### **4.2.1 Traitement des données**

La première étape du traitement a permis de repérer 806449 erreurs de dates inversées, 1433 erreurs de doublons et 4062506 données manquantes. Les valeurs manquantes représentent 13,8 % des données. La deuxième étape, soit la validation par comparaison aux courbes intensité-durée-fréquence de la station Jean-Lesage d'Environnement Canada a permis de repérer 4233 valeurs aberrantes.

### **4.2.2 Scénarios de séparation d'évènements**

Dans cette deuxième section du chapitre des résultats, il sera question de présenter les résultats de l'analyse des pluies historique de la Ville de Québec pour la gestion des eaux pluviales.

À la section 3.2.3, plusieurs scénarios ont été établis pour l'identification du début et de la fin d'un évènement pluvieux. Le nombre d'évènements résultant par scénario pour chaque durée de pluie étudiée est présenté au Tableau 4.7. Ce sont ces évènements qui seront utilisés pour poursuivre l'analyse des évènements pluvieux historiques de la Ville de Québec.

**Tableau 4.7 Nombre d'évènements classés par scénario et durée**

Scénario	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	12 h	24 h
A	3 198	960	-	-	-	-	-
B	1 990	605	-	-	-	-	-
C	551	157	-	-	-	-	-
D	-	-	232	8	-	-	-
E	-	-	733	101	-	-	-
F	-	-	2 716	370	-	-	-
G	-	-	344	64	-	-	-
H	-	-	-	-	241	39	4
I	-	-	-	-	557	172	25
J	-	-	-	-	559	172	25
K	-	-	-	-	302	159	25

Les scénarios A, B et C diffèrent au niveau du temps inter-événement sec minimal. Le nombre d'évènements repérés en est affecté, car celui-ci diminue graduellement avec l'augmentation du temps inter-événement sec minimal. Le même phénomène est illustré aux paires de scénarios F-G et J-K. En augmentant le nombre de pas de temps nuls permis à l'intérieur d'un événement, le nombre d'évènements augmente. Cette observation est applicable aux paires de scénarios D-E et H-I. L'augmentation du nombre de pas de temps nuls permis à l'intérieur d'un événement est particulièrement importante pour l'identification d'évènements de plus longues durées, car sinon aucun événement n'est trouvé.

Pareillement, en augmentant le seuil de temps sec, le nombre d'évènements augmente généralement. C'est le cas pour les paires de scénarios E-F et I-J. Pour ce critère, le passage d'un seuil de 0 mm à 0,1 mm pour les événements de courtes durées permet de trouver plus d'évènements que d'augmenter de 0,2 mm à 0,3 mm pour les événements de longues durées.

Il est à noter que pour un même système météorologique, plusieurs pluviomètres peuvent capter des précipitations et ainsi produire plusieurs événements. Par exemple, pour le scénario I d'une durée de 24 h, le tableau indique que 25 événements ont été trouvés. Or, ces 25 événements correspondent à seulement 3 systèmes météorologiques différents.

Les critères de sélection des événements pluvieux peuvent non seulement avoir un impact sur le nombre d'évènements trouvés, mais aussi sur les caractéristiques externes des évènements. Le Tableau 4.8 présente quelques caractéristiques externes pour les évènements de 1 h identifiés.

**Tableau 4.8 Caractéristiques externes des évènements d'une heure pour les scénarios D à G**

Scénario (nb d'évènements)	Hauteur de pluie minimale des évènements (mm)	Hauteur de pluie maximale des évènements (mm)	Hauteur de pluie moyenne des évènements (mm)	Intensité maximale sur 5 minutes des évènements (mm/h)
D (232)	1,2	47,8	7,3	138,0
E (733)	1,1	47,8	5,7	138,0
F (2 716)	1,1	47,8	4,4	138,0
G (344)	1,1	47,8	5,7	138,0

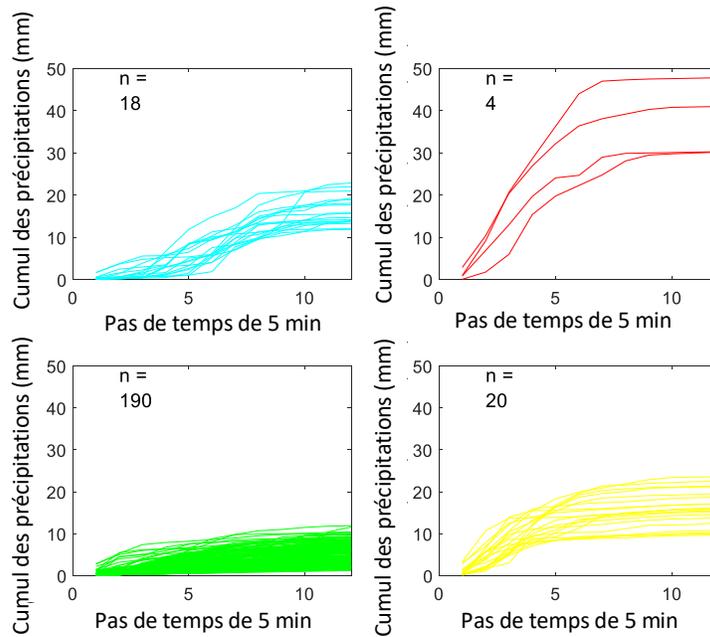
Le scénario a peu d'impact sur les évènements extrêmes trouvés. En effet, les hauteurs de pluie minimale et maximale des évènements varient peu selon le scénario et le nombre d'évènements. Il en va de même pour l'intensité maximale sur 5 min. Or, la hauteur de pluie moyenne des évènements diminue lorsque les critères d'identification des évènements sont plus permissifs. Du scénario D au scénario F, les critères permettent de trouver de 232 à 2 716 évènements et la hauteur moyenne de pluie des évènements diminue de 7,3 à 4,4 mm. Du scénario F au scénario G, les critères sont plus restrictifs, passant de 2 716 évènements à 344 évènements. La hauteur moyenne passe ainsi de 4,4 à 5,7 mm, signifiant que la hauteur de pluie moyenne augmente, plus le nombre d'évènements diminue. Il est à noter que l'analyse a également été faite pour toutes les autres durées de pluie analysées et que les conclusions tirées sont les mêmes que pour les pluies de 1 h.

Il sera vu dans les sections suivantes que la majorité des pluies identifiées sont de faible intensité et de faible hauteur totale. Pour la région de Québec, 90 % des évènements pluvieux ont une hauteur totale de pluie inférieure à 26 mm et 80 % des évènements pluvieux ont une hauteur totale inférieure à 17 mm (MDDEP & MAMROT, 2014). Il est logique que les évènements trouvés en assouplissant les critères suivent la même tendance. La hauteur de pluie moyenne diminue donc par l'ajout d'évènements majoritairement de faible hauteur.

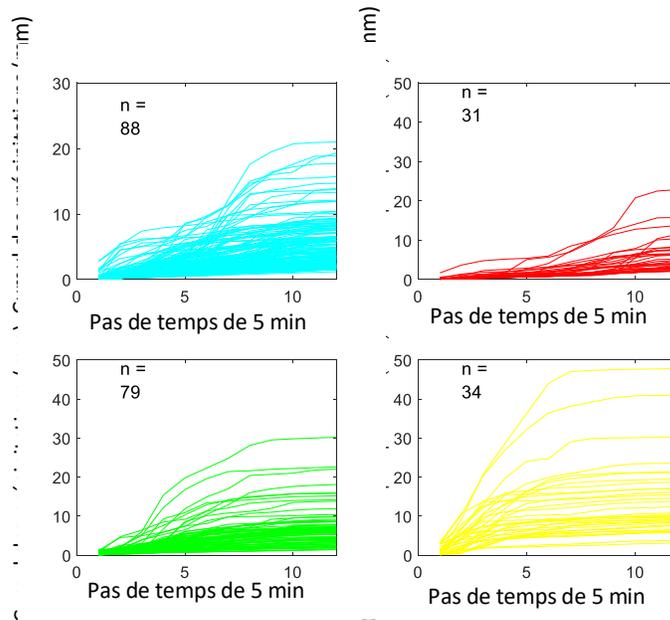
#### **4.2.3 Méthode de regroupement par k-moyennes**

Une fois les évènements séparés, ils ont été regroupés sur la base de leur patron temporel. Comme il a été noté à la section 3.2.4, deux méthodes de regroupement ont été testées, soit en

utilisant les données telles quelles ou en les rendant adimensionnelles. Le scénario D pour une pluie de 1 h est utilisé pour comparer les méthodes de regroupement par k-moyennes. Les Figure 4.26 et Figure 4.27 présentent les regroupements obtenus en utilisant les données brutes et en les rendant adimensionnelles, respectivement. Les patrons moyens des regroupements sont présentés aux Figure 4.28 et Figure 4.29.



**Figure 4.26 Cumul des précipitations en fonction du temps pour le scénario 1 h-D avec quatre groupes de k-moyennes et avec les données brutes**



**Figure 4.27 Cumul des précipitations en fonction du temps pour le scénario 1 h-D avec quatre groupes de k-moyennes et avec les données standardisées**

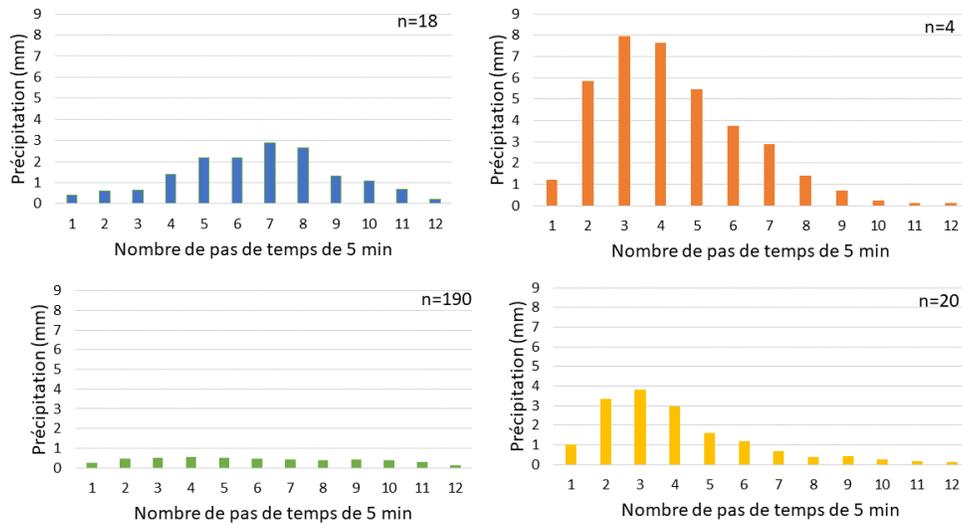


Figure 4.28 Patrons temporels moyens pour le scénario 1 h-D avec les données brutes et quatre groupes de k-moyennes

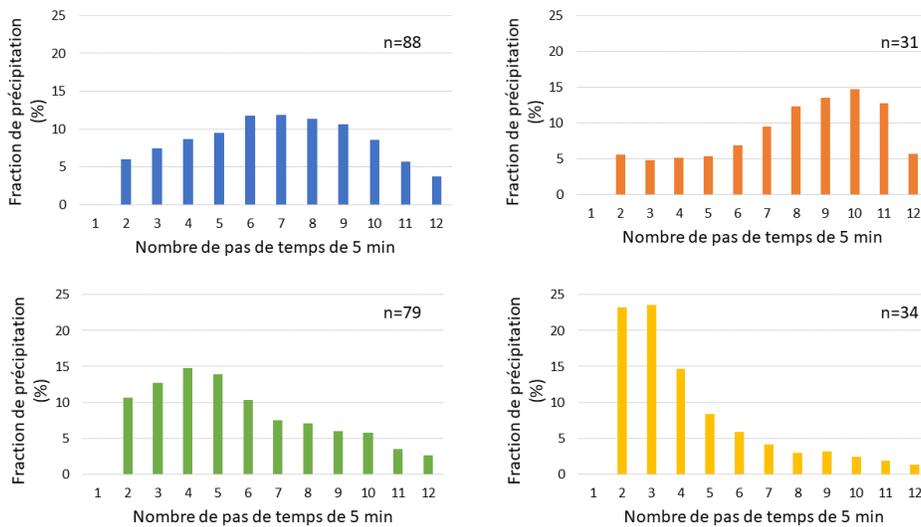


Figure 4.29 Patrons temporels moyens pour le scénario 1 h-D avec les données standardisées et quatre groupes de k-moyennes

La principale différence entre des données pluviométriques adimensionnelles et des données brutes est que le regroupement par k-moyennes des données brutes est intimement relié à la hauteur totale des précipitations. Ce phénomène peut être observé au Tableau 4.9.

**Tableau 4.9 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la hauteur de pluie totale d'un évènement pour les deux méthodes de regroupement pour le scénario 1h-D**

Hauteur de pluie totale (mm)	Méthode des données brutes				Méthode des données adimensionnelles			
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
[0, 5[	0	0	107	0	57	16	32	2
[5, 10[	0	0	78	1	20	10	36	13
[10, 15[	9	0	5	6	6	3	4	7
[15, 20[	6	0	0	9	4	1	4	6
[20, 25[	3	0	0	4	1	1	2	3
[25, 30[	0	0	0	0	0	0	0	0
[30, 35[	0	2	0	0	0	0	1	1
[35+	0	2	0	0	0	0	0	2

En effet, le groupe 3 des données brutes regroupe le plus grand nombre d'évènements et ceux-ci sont tous inférieurs à 15 mm. Aucun autre groupe pour cette méthode de regroupement ne contient des évènements entre 0 et 5 mm. Le groupe 2 contient seulement quatre évènements, mais ceux-ci ont des hauteurs de précipitation totales de plus de 30 mm. Pour la méthode de regroupement des données adimensionnelles, les évènements sont répartis plus équitablement dans les groupes. Par exemple, les pluies de moins de 5 mm sont réparties entre les groupes 1 à 3. La méthode des données brutes est donc utile si une importance particulière est donnée aux patrons temporels des évènements de plus grande hauteur totale.

La méthode des données brutes a été choisie pour poursuivre l'analyse, car celle-ci permet également de représenter la réalité atmosphérique. En effet, la majorité des pluies au Québec sont de faibles intensité et hauteur totale. La méthode des données brutes permet de regrouper ces pluies dans une seule catégorie. De plus, le but de cette section est d'analyser les pluies utilisées pour la conception; il y a donc un intérêt à ce que les pluies de faibles intensités soient séparées des pluies de plus fortes intensités et récurrences.

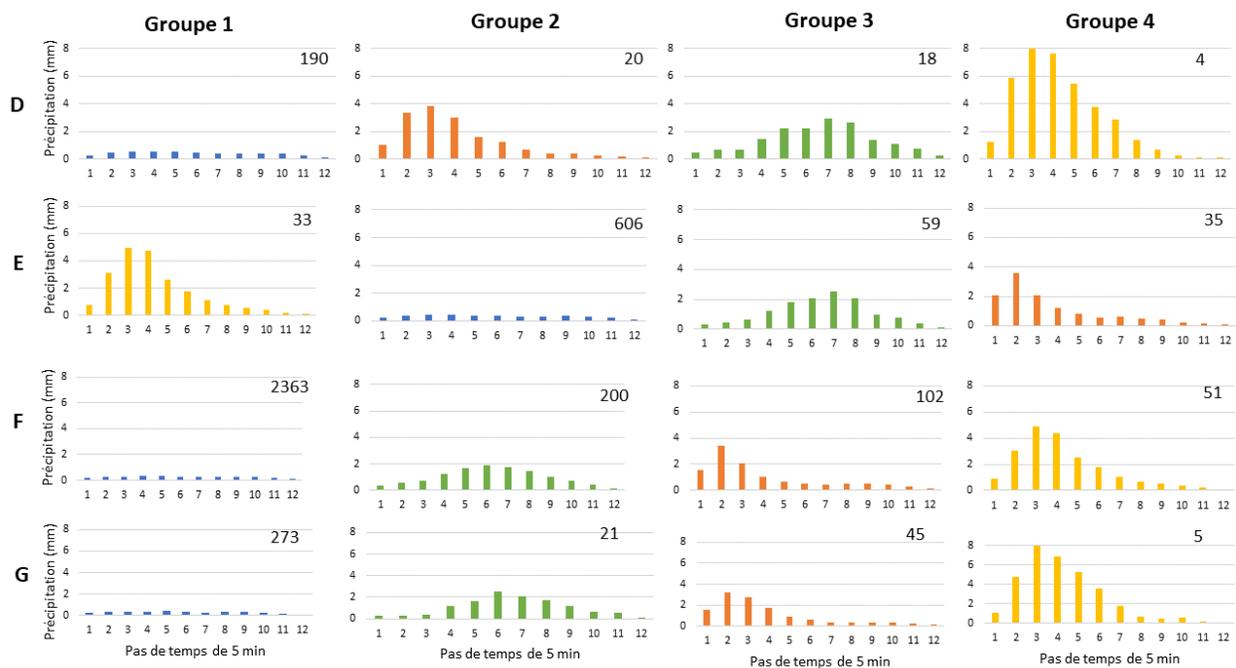
#### 4.2.4 Pluies de courte durée

Les prochaines sections présentent le regroupement et l'analyse des patrons temporels moyens pour les pluies de 1 h et de 2 h.

#### 4.2.4.1 Pluies de 1 h

Les pluies de 1 h sont d'intérêt pour un bassin versant urbanisé de moins de 50 ha si le paramètre à utiliser pour la conception d'un ouvrage est le débit (MDDEP & MAMROT, 2014). Il sera donc question dans cette section d'analyser les regroupements des patrons temporels et les évènements obtenus selon les scénarios décrits à la section 3.2.3.

La Figure 4.30 présente le regroupement par k-moyennes des patrons temporels moyens des pluies de 1 h selon les quatre scénarios.



**Figure 4.30 Regroupement par k-moyennes en patrons temporels moyens d'une durée d'une heure selon les scénarios D, E, F et G**

Les caractéristiques, telles que la période de retour, la hauteur d'eau totale et le mois d'occurrence des évènements identifiés par le regroupement par k-moyennes, sont présentées en annexe pour toutes les durées de pluie analysées.

Les patrons temporels moyens similaires sont identifiés par quatre couleurs. En bleu, le patron temporel est uniforme et de faible intensité ; celui-ci regroupe la majorité des évènements par scénario. À noter que le nombre de pluies uniformes trouvé pourrait être dû au fait que celles-ci sont réparties plus uniformément sur le territoire. Plusieurs pluviomètres auraient donc pu les enregistrer, tandis que les pluies plus intenses peuvent être des orages localisés enregistrés par

seulement quelques pluviomètres. La période de retour des événements identifiés par les patrons temporels en bleu est inférieure à 2 ans. La hauteur d'eau totale de ces événements est inférieure à 15 mm et la hauteur de pluie moyenne varie entre 3,1 et 4,8 mm. Les événements sont repartis entre les mois de mai à octobre.

En vert, le patron temporel moyen a une pointe d'intensité au milieu de la pluie avec une croissance et une décroissance symétrique, semblable à une pluie triangulaire. La période de retour de la majorité des événements regroupés dans ce patron est inférieure à 5 ans. La majorité des événements se retrouvent également entre 5 et 25 mm de pluie totale et leur hauteur de pluie moyenne est de 12 à 16,3 mm. Les événements regroupés dans ce patron ont lieu de mai à septembre.

En orange, des pluies avec une pointe d'intensité au début de la pluie sont regroupées. La période de retour de la majorité de ces événements est inférieure à 5 ans, avec trois pluies de récurrence 10 ans. La majorité des événements regroupés dans ce patron se retrouvent également entre 5 et 25 mm de pluie totale et la hauteur de pluie moyenne est de 11,6 à 16,1 mm. Les événements pluvieux de ces groupes ont lieu de mai à septembre, avec plus de 60 % des pluies ayant lieu en juin et juillet.

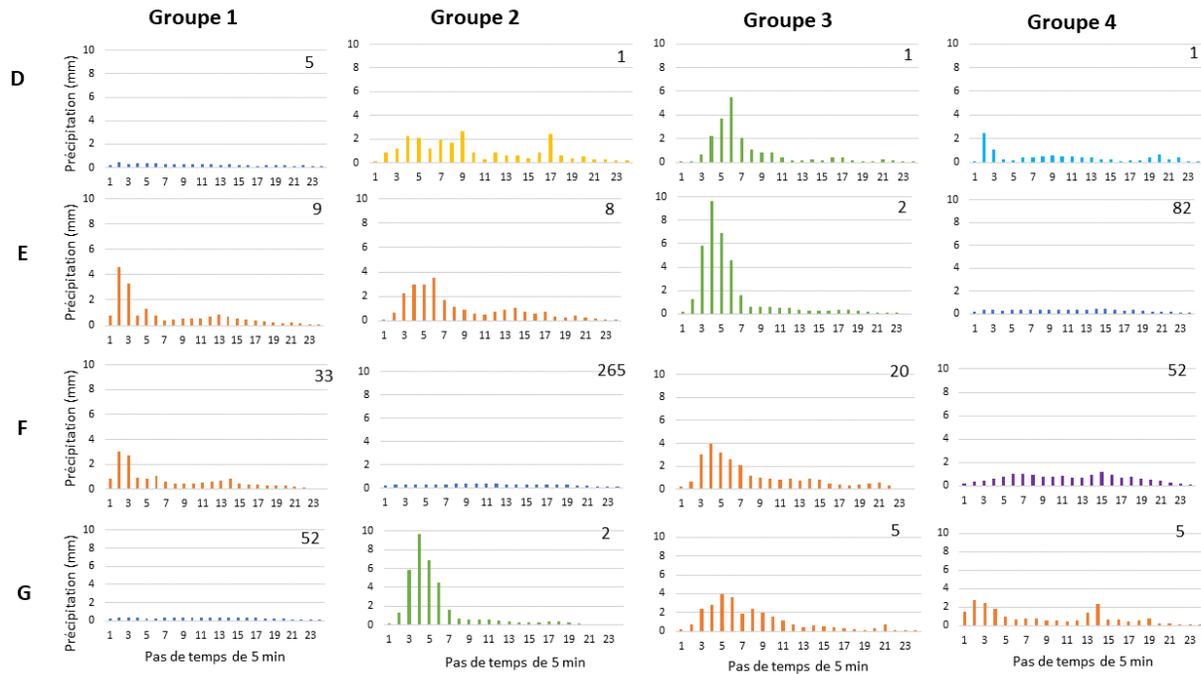
En jaune, sont classés le plus petit nombre d'événements par scénario. Tout comme les pluies en orange, il s'agit de pluies avec une pointe d'intensité en début d'événement. Or, l'intensité et la durée de la pointe sont plus élevées pour les patrons en jaune que pour ceux en orange. Les événements dans ce groupe peuvent avoir des périodes de retour supérieures à 100 ans. La hauteur d'eau totale des pluies varie entre 10 mm et 50 mm et les pluies ont lieu entre mai et août. La hauteur de pluie moyenne des patrons temporels varie entre 20,4 et 37,3 mm. Ce patron se rapproche le plus de la pluie synthétique SEA.

Les pluies en orange et vert ont des caractéristiques similaires. Seul le patron temporel est différent. Pour un volume total de pluie similaire, le pic d'intensité est 25 à 80 % supérieur lorsque la pointe se trouve en début de l'événement de pluie. Dans ce cas-ci, le choix de patron temporel a un impact sur le débit maximum de ruissellement pour la conception d'ouvrages hydrauliques.

Comme les mêmes quatre types de patrons sont identifiés pour tous les scénarios, il semblerait que peu importe les critères de séparation d'événements pluvieux choisis, les patrons temporels moyens restent les mêmes pour les pluies d'une durée d'1 h.

#### 4.2.4.2 Pluies de 2 h

La Figure 4.31 présente le regroupement par k-moyennes des patrons temporels moyens des pluies de 2 h selon les quatre scénarios.



**Figure 4.31 Regroupement par k-moyennes en patrons temporels moyens d'une durée de deux heures selon les scénarios D, E, F et G**

Les patrons temporels moyens similaires sont identifiés par six couleurs. En bleu foncé, le patron temporel est uniforme et de faible intensité ; ce patron regroupe la majorité des évènements par scénario. La période de retour des évènements de ces groupes est inférieure à 2 ans. La hauteur d'eau totale de la pluie est majoritairement inférieure à 15 mm et la hauteur de pluie moyenne varie entre 6,2 et 7,7 mm. Les évènements sont repartis entre les mois de mai à octobre.

En vert, le patron temporel moyen a une pointe d'intensité au début de la pluie suivie d'une décroissance. La période de retour des évènements varie entre moins de 2 ans à 100 ans. La hauteur d'eau totale de ces pluies varie entre 20,3 mm et 39,7 mm et les pluies ont lieu en juin. La hauteur de pluie moyenne des patrons temporels illustrés en vert est de 20,3 à 35,6 mm. Il est intéressant de noter que le patron temporel moyen ressemble à une pluie de 1 h SEA suivie d'une pluie uniforme de 1 h.

En orange, le patron temporel moyen a une pointe d'intensité au début de la pluie suivie d'une pointe plus faible au milieu de l'évènement. La période de retour de la majorité des évènements est inférieure à 10 ans, avec une pluie de récurrence 100 ans. La hauteur de pluie maximale est de 39,7 mm de pluie totale et la hauteur de pluie moyenne est entre 16,5 à 27,3 mm. Les évènements pluvieux de ces groupes ont lieu de mai à septembre.

En mauve, on retrouve une pluie de faible intensité avec deux pointes d'intensité maximale. La période de retour de la majorité des évènements de ces groupes est inférieure à 5 ans. Les évènements regroupés ont une hauteur de pluie inférieure à 30 mm de pluie totale et la hauteur de pluie moyenne est de 15,8 mm. Ces évènements pluvieux ont lieu de mai à septembre.

En jaune, le groupe identifié comprend seulement un évènement. L'évènement a une période de retour de moins de 2 ans et une hauteur totale de 23,6 mm ; il a lieu en août.

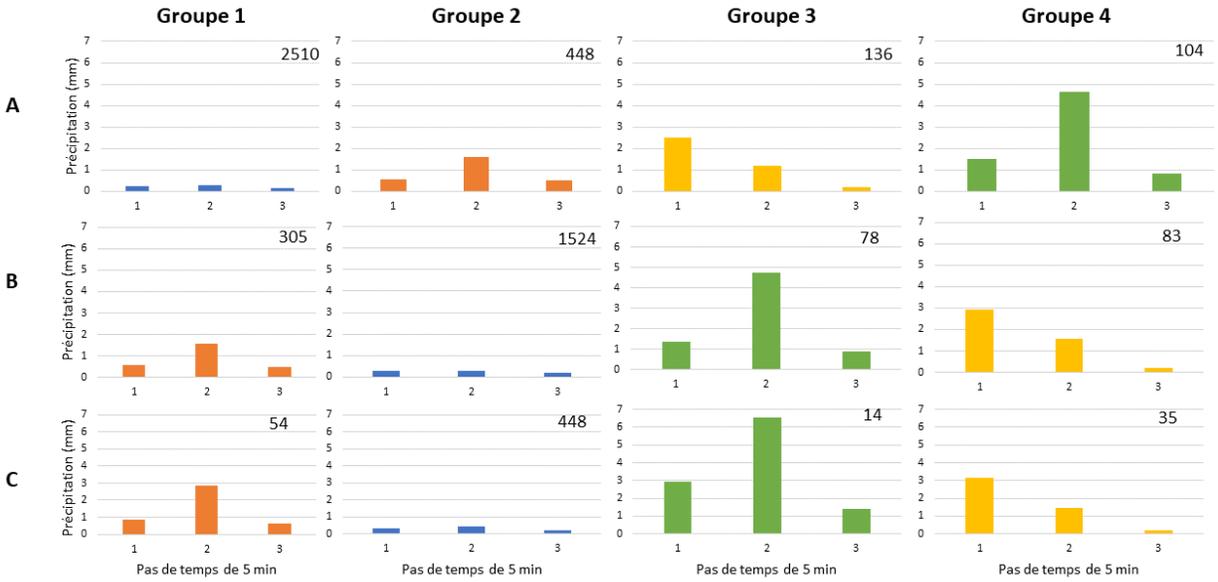
En bleu pâle, il s'agit également d'un regroupement d'un seul évènement. L'évènement a une période de retour de moins de 2 ans et une hauteur totale de 11 mm ; il a lieu en mai. Ces regroupements d'un évènement sont causés par les critères du scénario D, qui sont mal adaptés à des pluies de 2 h.

#### **4.2.5 Pluies de très courtes durées**

Les prochaines sections présentent l'analyse des patrons temporels moyens par regroupement par k-moyennes pour les pluies de 15 et 30 min. Comme les pluies de très courtes durées sont moins utilisées en pratique, elles sont présentées après les pluies de courtes durées.

##### *4.2.5.1 Pluies de 15 minutes*

La Figure 4.32 présente le regroupement par k-moyennes des patrons temporels moyens des pluies de 15 min selon les trois scénarios.



**Figure 4.32 Regroupement par k-moyennes en patrons temporels moyens d'une durée de 15 min selon les scénarios A, B et C**

Les patrons temporels moyens similaires sont identifiés par quatre couleurs. En bleu, le patron temporel est uniforme et de faible intensité ; il regroupe la majorité des évènements par scénario. La période de retour des évènements de ces groupes est inférieure à 2 ans. La hauteur d'eau totale de ces évènements est majoritairement inférieure à 15 mm et la hauteur de pluie moyenne varie entre 0,7 et 0,9 mm. Les évènements sont répartis entre les mois de mai à octobre.

En vert, le patron temporel moyen a une pointe d'intensité au milieu de la pluie. La période de retour des évènements est inférieure à 10 ans. La hauteur d'eau totale des pluies est inférieure à 20 mm et les pluies ont lieu de mai à octobre. La hauteur de pluie moyenne des patrons temporels est de 7 à 10,9 mm.

En orange, le patron temporel moyen a une pointe d'intensité au milieu de la pluie. L'intensité de la pointe est inférieure à l'intensité de la pointe du patron vert. La période de retour de la majorité des évènements est inférieure à 5 ans. La hauteur de pluie totale de ces évènements est inférieure à 15 mm et la hauteur de pluie moyenne est entre 2,6 à 4,4 mm. Les évènements pluvieux ont lieu de mai à octobre.

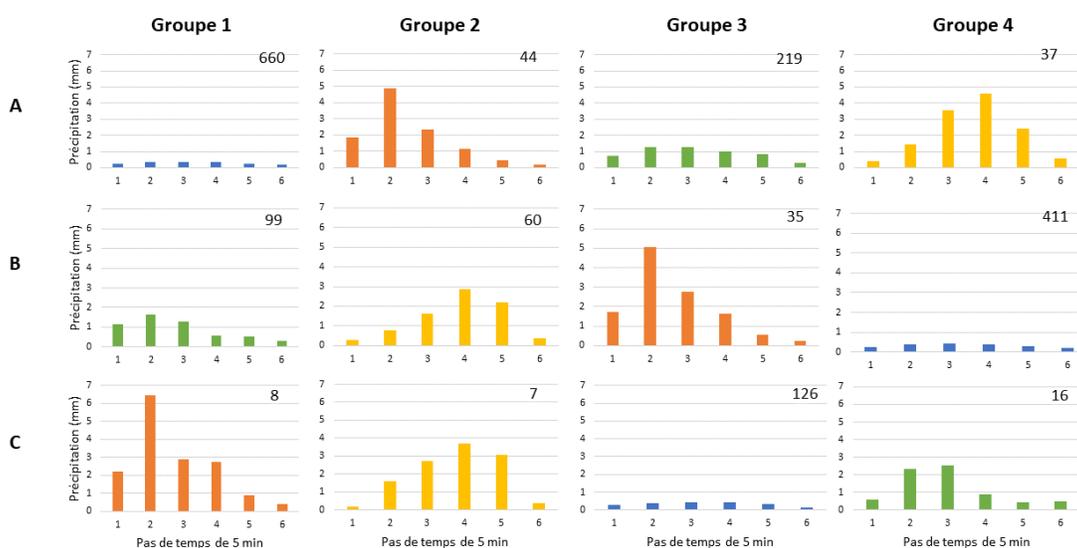
En jaune, le patron temporel moyen a une pointe d'intensité au début de la pluie, suivie d'une décroissance constante. La période de retour de la majorité de ces évènements est inférieure à 2 ans. Les évènements regroupés ont une hauteur de pluie inférieure à 10 mm de pluie totale et

la hauteur de pluie moyenne est entre 3,9 et 4,8 mm. Les évènements pluvieux ont lieu de mai à octobre.

Les quatre mêmes patrons temporels peuvent être identifiés pour les trois scénarios testés. Donc, peu importe le temps inter-événement minimal choisi, les patrons temporels identifiés pour les pluies de 15 minutes sont sensiblement les mêmes.

#### 4.2.5.2 Pluies de 30 minutes

La Figure 4.33 présente le regroupement par k-moyennes des patrons temporels moyens des pluies de 30 min selon les trois scénarios.



**Figure 4.33 Regroupement par k-moyennes en patrons temporels moyens d'une durée de 30 min selon les scénarios A, B et C**

Les patrons temporels moyens similaires sont identifiés par quatre couleurs. En bleu, le patron temporel est uniforme et de faible intensité ; il regroupe la majorité des évènements par scénario. La période de retour de ces évènements est inférieure à 2 ans. La hauteur d'eau totale de la pluie est majoritairement inférieure à 10 mm et la hauteur de pluie moyenne varie entre 1,7 et 2,1 mm. Les évènements sont repartis entre les mois de mai à octobre.

En vert, les pluies regroupées ont une période de retour inférieure à 2 ans. La hauteur d'eau totale des pluies est inférieure à 15 mm et les pluies ont lieu de mai à octobre. La hauteur de pluie moyenne de ces patrons temporels est de 5,4 à 7,4 mm.

En orange, le patron temporel moyen a une pointe d'intensité au début de la pluie. La période de retour des évènements est inférieure à 5 ans. La hauteur de pluie totale est inférieure à 25 mm

et la hauteur de pluie moyenne varie entre 10,9 à 15,6 mm. La majorité des évènements pluvieux ont lieu de juin à août.

En jaune, le patron temporel moyen a une pointe d'intensité au milieu de la pluie. La période de retour des évènements va jusqu'à 25 ans. Les évènements regroupés ont une hauteur de pluie totale inférieure à 25 mm et la hauteur de pluie moyenne varie entre 8 et 13 mm. La majorité des évènements pluvieux ont lieu de juin à août.

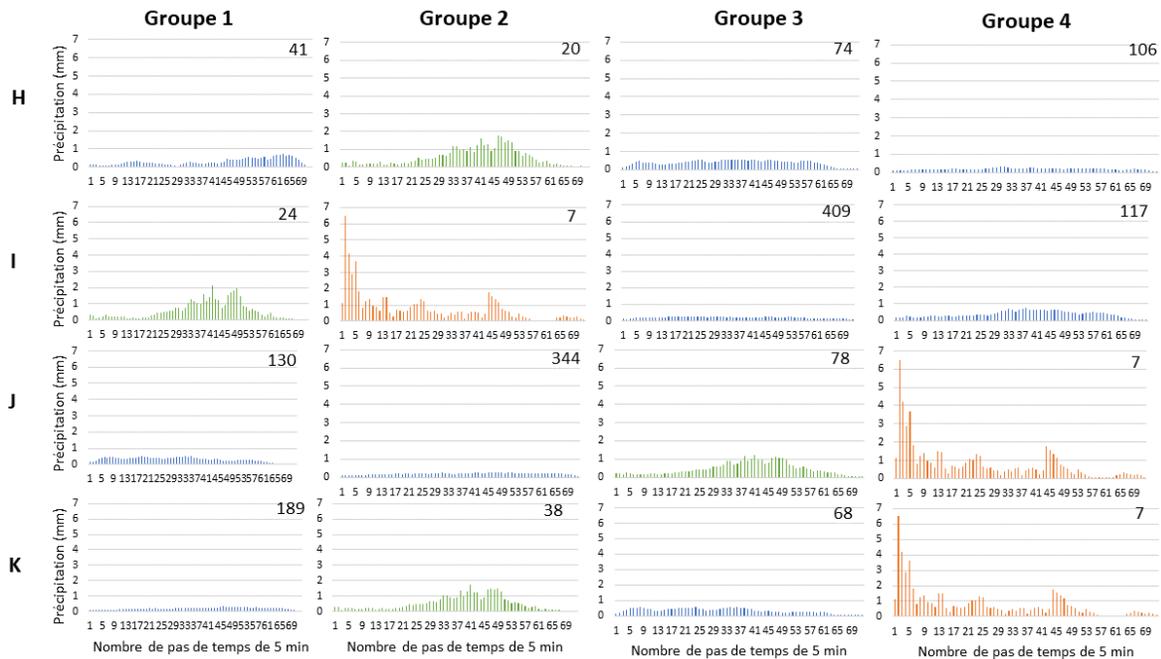
Les quatre mêmes patrons temporels peuvent être identifiés pour les trois scénarios testés. Donc, peu importe le temps inter-événement minimal choisi, les patrons temporels identifiés pour les pluies de 30 minutes sont sensiblement les mêmes.

#### **4.2.6 Pluies de longue durée**

Les pluies de longues durées sont utilisées dans la pratique pour la conception des bassins de rétention et l'analyse des volumes de ruissellement. Les prochaines sections présentent l'analyse des patrons temporels moyens par regroupement par k-moyennes pour les pluies de 6, 12 et 24 h.

##### *4.2.6.1 Pluies de 6 heures*

La Figure 4.34 présente le regroupement par k-moyennes des patrons temporels moyens des pluies de 6 h selon les quatre scénarios.



**Figure 4.34 Regroupement par k-moyennes en patrons temporels moyens d'une durée de six heures selon les scénarios H, I, J et K**

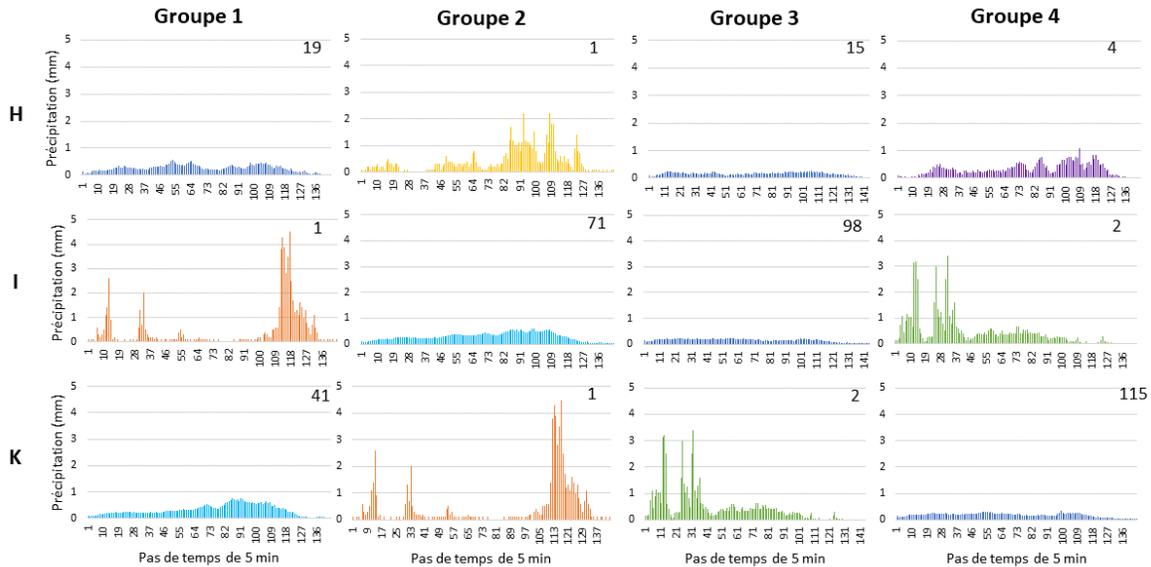
Les patrons temporels moyens similaires sont identifiés par trois couleurs. En bleu, le patron temporel est uniforme et de faible intensité ; il regroupe la majorité des évènements par scénario. La période de retour des évènements est inférieure à 5 ans. La hauteur de pluie moyenne varie entre 14 et 27,6 mm. Ces évènements sont repartis entre les mois de mai à octobre.

En vert, le patron temporel a une pointe au milieu de la pluie. Le patron est semblable à une pluie triangulaire. Les pluies regroupées ont une période de retour inférieure à 5 ans. La majorité de ces pluies ont lieu de juin à août. La hauteur de pluie moyenne de ces patrons temporels est de 38,1 à 41,4 mm.

En orange, le patron temporel moyen a une pointe d'intensité au début de la pluie. Le groupe est composé de 21 évènements qui proviennent de seulement deux systèmes météorologiques. La période de retour des évènements varie entre moins de 2 ans et plus de 100 ans. La hauteur de pluie moyenne de ces évènements est de 58 mm. Les évènements pluvieux ont lieu en juillet et en septembre.

#### 4.2.6.2 Pluies de 12 heures

La Figure 4.35 présente le regroupement par k-moyennes des patrons temporels moyens des pluies de 12 h selon les quatre scénarios.



**Figure 4.35 Regroupement par k-moyennes en patrons temporels moyens d'une durée de 12 heures selon les scénarios H, I et K**

Les patrons temporels moyens similaires sont identifiés par six couleurs. En bleu, le patron temporel est uniforme et de faible intensité ; il regroupe la majorité des évènements de chaque scénario. La période de retour de ces évènements est inférieure à 5 ans. La hauteur de pluie moyenne varie entre 22,6 et 37,5 mm. Les évènements sont repartis entre les mois de mai à octobre, mais ont lieu majoritairement en septembre et octobre.

En bleu pâle, le patron temporel est quasi uniforme, de faible intensité et avec une majorité de la hauteur de la pluie en fin d'évènement. La période de retour des évènements est inférieure à 25 ans. La hauteur de pluie moyenne varie entre 42,3 et 45,8 mm. Les évènements sont repartis entre les mois de mai à octobre, mais ont lieu majoritairement en septembre et octobre.

En vert, le patron temporel correspond à la pluie du 15 juin 2008. Cette pluie a une période de retour inférieure à 25 ans. Sa hauteur de pluie totale est de 65,5 mm.

En orange, le patron temporel correspond à la pluie du 22 mai 2012. Cette pluie a une période de retour de 25 ans. Sa hauteur de pluie totale est de 66,6 mm.

En jaune, le patron temporel correspond à la pluie du 28 juillet 2014. Cette pluie a une période de retour de 10 ans. Sa hauteur de pluie totale est de 57,9 mm.

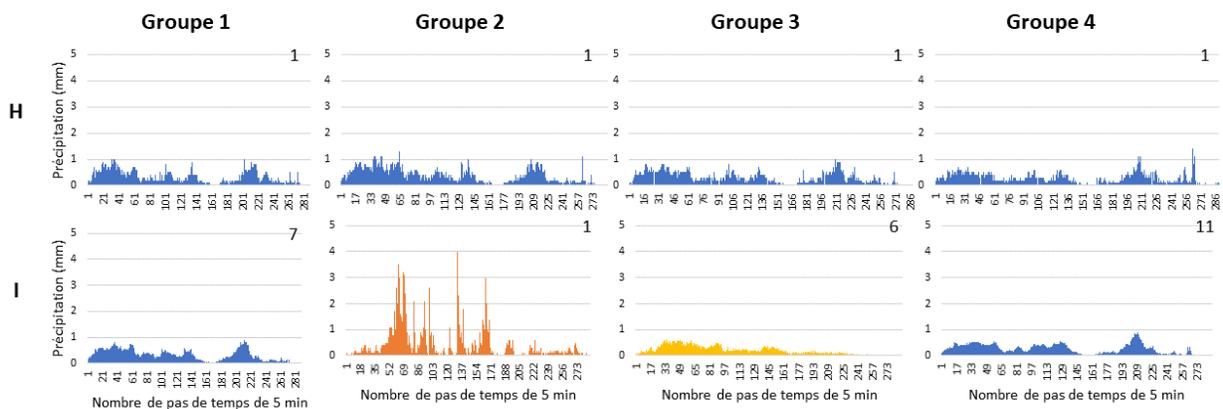
En mauve, le patron temporel correspond à la pluie du 19 octobre 2012. Cette pluie a une période de retour inférieure à 5 ans. Sa hauteur de pluie totale est de 46,4 mm.

Les patrons temporels en orange, vert, jaune et mauve sont classés seuls, car il s'agit d'évènements provenant de systèmes météorologiques de récurrence et de hauteur de pluie totale plus élevées. La différence entre ces patrons et des patrons uniformes est marquée.

Les patrons temporels en bleu et bleu pâle ressemblent à des pluies cycloniques, car elles sont de longue durée, de faible intensité, uniformes et ont lieu majoritairement en automne.

#### 4.2.6.3 Pluies de 24 heures

La Figure 4.36 présente le regroupement par k-moyennes des patrons temporels moyens des pluies de 24 h selon les quatre scénarios.



**Figure 4.36 Regroupement par k-moyennes en patrons temporels moyens d'une durée de 24 heures selon les scénarios H et I**

Les critères d'identification des évènements du scénario H sont mal adaptés aux pluies de 24 h. Le scénario permet d'identifier seulement quatre évènements, ce qui n'est pas suffisant pour effectuer une analyse des patrons temporels.

Les patrons temporels moyens similaires sont identifiés par trois couleurs. En bleu, le patron temporel correspond au système météorologique du 13 août 2014, qui a été capté par 28 pluviomètres. La période de retour des évènements pour ces pluviomètres peut dépasser 100 ans. La hauteur de pluie moyenne varie entre 81,6 et 91,9 mm.

En orange, le patron temporel correspond à l'évènement du 9 septembre 2004, soit au passage de l'ouragan Frances au Québec. La période de retour de l'évènement est supérieure à 100 ans. La hauteur de pluie totale est de 121 mm.

En jaune, le patron temporel correspond à l'évènement du 16 septembre 1999. La période de retour de cet évènement est inférieure à 10 ans. Sa hauteur de pluie totale est de 58,6 mm.

Il est intéressant de noter que les évènements trouvés ont lieu dans les mois d'août et septembre. En effet, les pluies de longue durée sont souvent occasionnées par des mouvements froids ou chauds. Au Québec, ces pluies dites cycloniques sont plus souvent observées en automne (MDDEP & MAMROT, 2014). De plus, ce type de pluie génère de grands volumes de ruissellement, mais n'a généralement pas de pointe de forte intensité. Les évènements trouvés ont des hauteurs d'eau supérieures à 50 mm. En excluant l'évènement relié au passage de l'ouragan Frances, la pointe d'intensité maximale est de 16,8 mm/h.

#### **4.2.7 Sommaire des résultats**

L'analyse des pluies historiques de la Ville de Québec a montré que pour les durées de 15 min à 2 h, le patron le plus fréquent pour les pluies de période de retour inférieure à 2 ans est un patron uniforme avec une hauteur de précipitation inférieure à 15 mm.

Pour la durée de 1 h, les pluies de récurrence supérieure à 2 ans ont majoritairement des patrons temporels ressemblant à une pluie triangulaire ou à une pluie de type SEA. Pour la durée de 2 h, les pluies de récurrence supérieure à 2 ans ont majoritairement des patrons temporels ressemblant à :

- Une pluie de 1 h SEA, suivi d'une pluie uniforme de 1 h;
- Une pluie avec une pointe d'intensité au début de l'évènement, suivie par une pointe de plus faible intensité dans le milieu de l'évènement;
- Une pluie de faible intensité avec deux pointes d'intensité maximale.

Pour la durée de 15 min, les pluies de récurrence supérieure à 2 ans ont une pointe au milieu de la pluie, semblable à une pluie triangulaire. Pour les pluies de 30 min, les évènements de récurrence de plus de 2 ans ont une pointe au début de la pluie ou une pointe au milieu, semblable à une pluie triangulaire.

Pour les durées de 6 h, 12 h et 24 h, le patron le plus fréquent ressemble à une pluie uniforme de faible intensité. Pour les pluies de 6 h, les autres patrons temporels ressortant de l'analyse sont une pluie avec une pointe au milieu de l'évènement, semblable à une pluie triangulaire, et une pluie avec multiples pointes dont la plus intense est au début de la pluie. Les recherches futures pourraient étudier les pluies historiques de d'autres villes en climat continental, froid et humide.

## 5 CONCLUSION

Le suivi hydrologique du stationnement incitatif de Boucherville a été réalisé pour les saisons estivales de 2020 et 2021. Selon les données récoltées, la performance hydrologique combinée des cellules de biorétention et du pavage perméable pour 59 évènements se résume par une réduction du volume de ruissellement moyen de 90,6 %, une réduction moyenne du débit de pointe de 98 % et pour les 17 évènements avec effluents, un décalage moyen du débit de pointe de 6,7 h. Sur les 59 évènements étudiés, deux évènements se distinguent par leur période de récurrence supérieure à 2 ans. Ces deux évènements ont eu lieu le 17 août 2020 et le 29 août 2020 et ont eu des performances de réduction du volume de ruissellement de 54 et 67 %, de réduction du débit de pointe de 96 et 89 % et des décalages du débit de pointe de 0,4 et de 0,5 h.

Du côté du suivi épuratoire, sur 48 évènements étudiés, les ouvrages de contrôle à la source permettent de capter l'entièreté des volumes de ruissellement et des polluants associés dans 44 des cas. Dû à la distance du site, aux retards de livraison durant la pandémie de COVID et aux réalités météorologiques, peu d'échantillons ont été récupérés pour le suivi épuratoire du stationnement incitatif de Boucherville. En moyenne, en incluant les évènements où les volumes de ruissellement sont captés dans leur entièreté, les performances d'enlèvement des MES, de la DCO, du P et du N sont positifs. L'enlèvement moyen des MES, de la DCO, du P et du N est respectivement de 96 %, 79 %, 81 % et 90 %. Par contre, la performance de réduction moyenne de la conductivité électrique est de -14 %. Il est à noter que le stationnement incitatif a été très peu utilisé lors de la campagne d'échantillonnage, dû notamment au télétravail qui prédominait durant la pandémie. Les concentrations en polluants et les taux d'enlèvement calculés ont pu en être affectés.

Le suivi photographique de la végétation poussant dans les alvéoles du pavage perméable alvéolé a démontré que les sites qui performaient le mieux étaient situés entre les entrées des cellules de biorétention, là où les apports d'eau de ruissellement sont présents, sans être trop abondants. Les sites profitaient également de l'ombre et de la fraîcheur créées par les végétaux dans les cellules de biorétention.

Le suivi du taux de survie des végétaux dans les cellules de biorétention a permis de déterminer que les arbres ont un taux de survie de 100 %, peu importe l'espèce. Pour les arbustes, le taux de survie pour l'année 2021 varie entre 54 et 100 %. Pour les vivaces, le taux de survie varie entre 0 et 100 %. Les végétaux ayant le moins bien performé sont le *Saule pourpre Gracilis*,

*Alchemilla mollis* et *Rudbeckia fulgida* var. 'Pot of Gold'. Lors de la conception, une attention particulière devrait être portée aux espèces installées en haut, milieu et bas de talus. Une espèce ayant une faible résistance à la sécheresse a moins de chance de survivre en haut de talus, car le taux d'humidité dans le sol a tendance à y être moindre qu'en bas de talus.

Selon l'analyse des pluies historiques de la ville de Québec, pour les durées de 15 min à 2 h, le patron le plus fréquent pour les pluies de période de retour inférieure à 2 ans est un patron uniforme. De plus, pour les durées allant de 15 min à 24 h, le patron temporel le plus fréquent est également un événement uniforme. Pour les récurrences supérieures à 2 ans, les patrons varient selon la durée de la pluie choisie. Par exemple, pour une durée de 1 h, le patron temporel le plus fréquent ressemble à une pluie triangulaire ou à une pluie de type SEA. Il est intéressant de noter que sur tous les patrons temporels qui ont été trouvés lors de l'analyse, aucun ne ressemble à une pluie de type Chicago. Or, au Tableau 2.7, les pluies de conception utilisées au Canada font grandement référence à la pluie de type Chicago. Il pourrait être intéressant de poursuivre les recherches sur des données dans d'autres villes au Canada et d'adapter les pluies de conception dans la pratique de l'ingénierie aux pluies historiques réelles.

Selon les conclusions tirées, les recommandations suivantes sont proposées pour améliorer la conception d'ouvrages de contrôle à la source des eaux pluviales :

- L'aménagement des cellules de biorétention devrait prévoir un écoulement ininterrompu entre la bordure abaissée et les bassins de sédimentation;
- Selon les conditions climatiques du sud du Québec, les végétaux à proscrire dans les cellules de biorétention avec un apport faible en ruissellement sont *Alchemilla mollis*, *Rudbeckia fulgida* var. 'Pot of Gold' et *Saule pourpre Gracilis*;
- Pour minimiser l'entretien des cellules de biorétention, un espacement suffisant doit être prévu entre les végétaux pour permettre la survie et l'épanouissement des divers végétaux;
- Lors de la conception, il est important d'assurer un apport minimal d'eau aux cellules de biorétention pour la survie des végétaux;
- Un patron temporel uniforme est recommandé pour la conception d'ouvrages de contrôle à la source des eaux pluviales, puisque le but est de gérer les pluies de récurrence fréquentes.

## 6 RÉFÉRENCES

- Adams BJ, Fraser HG, Howard CDD & Hanafy MS (1986) Meteorological Data Analysis For Drainage System Design. *Journal of Environmental Engineering* 112:22.
- Amponsah AO, Daraio JA & Khan AA (2019) Implications of Climatic Variations in Temporal Precipitation Patterns for the Development of Design Storms in Newfoundland and Labrador. *Canadian Journal of Civil Engineering*.
- Ballestro TP, Roseen RM & Houle J (2005) 2005 Data Report. (University of New Hampshire Stormwater Center, Durham), p 16.
- Bleu Laurentides (s.d) Bandes Riveraines au travail : Plantes indigènes et sauvages pour les rives. (CRE Laurentides), p 2.
- Bracken LJ, Cox NJ & Shannon J (2008) The relationship between rainfall inputs and flood generation in south-east Spain. *Hydrological Processes* 22:14.
- Braswell AS, Anderson AR & Hunt WF (2017) Hydrologic and Water Quality Evaluation of a Permeable Pavement and Biofiltration Device in Series. *Water* 10(33):21.
- Braswell AS, Winstonb RJ & Hunt WF (2018) Hydrologic and water quality performance of permeable pavement with internal water storage over a clay soil in Durham, North Carolina. *Journal of Environmental Management* 224:11.
- Brodeur-Doucet C (2018) *Évaluation de la performance de pratiques de gestion optimales installées en série : le cas du marché public de Longueuil*. Maître ès sciences (Université Laval, Québec). 151 p(Consulté le 15 avril 2022)
- Brome-Missisquoi M (2015) Rapport final – essai sur le terrain du comportement des cellules de biorétention. (MRC Brome-Missisquoi), p 110.
- Brown RA & Hunt WF (2011) Underdrain Configuration to Enhance Bioretention Exfiltration to Reduce Pollutant Loads. *Journal of Environmental Engineering* 137(11):10.
- Brown RA & Hunt WF (2012) Improving bioretention/biofiltration performance with restorative maintenance. *Water Science and Technology* 65(2):7.
- Carbone M, Turco M, Brunetti G & Piro P (2015) A Cumulative Rainfall Function for Subhourly Design Storm in Mediterranean Urban Areas. *Advances in Meteorology* 2015:10.
- Caux P-Y, Moore DRJ & MacDonald D (1997) Ambient water quality guidelines (criteria) for turbidity, suspended and benthic sediments, Technical Appendix. (BC Ministry of Environment, Lands and Parks).
- CCME (1999) *Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique : Sédiments en suspension*. Le conseil canadien des ministres de l'environnement, (Consulté le 13 mars 2022)
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2012) MA. 104 – S.S. 2.0 Détermination des solides en suspension totaux : méthode gravimétrique (Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec), p 8.
- City of Calgary (2011) Stormwater Management & Design Manual. (City of Calgary, Calgary).
- City of Toronto (2006) Wet Weather Flow Management Guidelines. (City of Toronto, Toronto).
- City of Vancouver (2018) Engineering Design Manual. (City of Vancouver, Vancouver).

- Clary J, Jones J, Leisenring M, Hobson P & Strecker EW (2020) International Stormwater BMP Database: 2020 Summary Statistics. (The Water Research Foundation, Denver), p 118.
- Computational Hydraulics International (2022) PCSWMM. (CHI, Guelph).
- Cornillon P & Matzner-Løber É (2007) *Régression : Théorie et applications*. Springer-Verlag, Paris
- Credit Valley Conservation (2018) Plant Selection Guideline : Species List for Planting Plans within the Credit River Watershed. (Credit Valley Conservation), p 27.
- Credit Valley Conservation et Toronto and Region Conservation Authority (2010) Low Impact Development Stormwater Management Planning And Design Guide. (CVC, Ontario).
- Davis AP, Shokouhian M, Sharma H & Minami C (2006) Water Quality Improvement through Bioretention Media: Nitrogen and Phosphorus Removal. *Water Environment Research* 78(3):10.
- Davis AP, Traver RG, Huff FA, Lee R, Brown RA & Olszewski JM (2012) Hydrologic Performance of Bioretention Storm-Water Control Measures. *Journal of Hydrologic Engineering* 17(5):11.
- DeBusk KM & Wynn TM (2011) Storm-Water Bioretention for Runoff Quality and Quantity Mitigation. *Journal of Environmental Engineering* 137(9):9.
- Delleur JW (1982) *Urban Stormwater Hydrology*. Indiana
- Department of Environmental Resources (2007) Bioretention Manual. (Environmental Services Division, Maryland), p 206.
- Dietz ME & Clausen JC (2005) A Field Evaluation of Rain Garden Flow and Pollutant Treatment. *Water, Air, & Soil Pollution* 167:16.
- Drake J, Bradford A, Van Seters T & MacMilan G (2012) Evaluation of permeable pavements in cold climates Kortright Centre, Vaughan. (University of Guelph and Toronto and Region Conservation, Toronto), p 92.
- Driscoll ED, Palhegyi GE, Strecker EW & Shelley PE (1989) Analysis of storm event characteristics for selected rainfall gages throughout the United States (Woodward-Clyde Consultants).
- Dunkerley D (2008) Identifying individual rain events from pluviograph records: a review with analysis of data from an Australian dryland site. *Hydrological Processes* 22:13.
- Environnement Canada (2014) Programme de rétablissement du chicot févier (*Gymnocladus dioicus*) au Canada. in *Série de Programmes de rétablissement de la Loi sur les espèces en péril* (Environnement Canada, Ottawa), p 49.
- Environnement et Changement climatique Canada (2019) Ensembles de données climatiques en génie : Données sur l'intensité, la durée et la fréquence des chutes de pluie de courte durée - Québec Jean Lesage INTL. (Gouvernement du Canada).
- Fassman EA & Blackburn S (2010a) Permeable Pavement Performance Over 3 Years of Monitoring. in *Low Impact Development International Conference* (American Society of Civil Engineers, San Francisco), p 14.
- Fassman EA & Blackburn S (2010b) Urban Runoff Mitigation by a Permeable Pavement System over Impermeable Soils. *Journal of Hydrologic Engineering* 15:11.

- FIHOQ et AQPP (2008) Répertoire des végétaux recommandés pour la végétalisation des bandes riveraines du Québec.), p 28.
- Gaál L, Molnar P & Szolgay J (2014) Selection of intense rainfall events based on intensity thresholds and lightning data in Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences* 18:14.
- Geheniau N (2014) *Évaluation expérimentale de la performance d'un jardin de pluie et d'un toit vert en climat froid*. Maitrise Ès Sciences Appliquées (École polytechnique de Montréal, Montréal). 163 p(Consulté le 23 mars 2022)
- Glen C (2020) Salt tolerant plants : Recommended for Pender County Landscapes. (North Carolina State University), p 15.
- Gouvernement du Québec (2014) Le Guide Sylvicole du Québec. (Publications Québec, Québec).
- Groupe-Conseil Génipur (2018) Construction d'un stationnement incitatif à la sortie 18 de l'autoroute 132. (Génipur, Candiac), p 82.
- Guo Y & Adams BJ (1998) Hydrologic analysis of urban catchments with event-based probabilistic models. *Water Resources Research* 34(12):11.
- Gyasi-Agyei Y & Melching CS (2012) Modelling the dependence and internal structure of storm events for continuous rainfall simulation. *Journal of Hydrology* 464-465:13.
- Hatt BE, Fletcher TD & Deletic A (2007) Hydraulic and Pollutant Removal Performance of Stormwater Filters Under Variable Wetting and Drying Regimes. *Water Science and Technology* 56(12):9.
- HRGreen (s.d) Plant Materials & Images. (Iowa Government, Marshalltown), p 3.
- Hsieh C-H & Davis AP (2005) Multiple-event study of bioretention for treatment of urban storm water runoff. *Water Science and Technology* 51(3-4):5.
- Huff FA (1967) Time Distribution Rainfall in Heavy Storms. *Water Resources Research* 3(4):13.
- Hunt WF, Smith JT, Jadlocki SJ, M. HJ & Eubanks R (2008) Pollutant Removal and Peak Flow Mitigation by a Bioretention Cell in Urban Charlotte, N.C. *Journal of Environmental Engineering* 134:6.
- Jaber FH (2015) Bioretention and Permeable Pavement Performance in Clay Soil. in *International Low Impact Development Conference 2015 : It Works in All Climates and Soils* (American Society of Civil Engineers, Houston), p 10.
- Khan UT, Valeo C, Chu A & van Duin B (2012a) Bioretention cell efficacy in cold climates: Part 1 — hydrologic performance. *Canadian Journal of Civil Engineering* 39:12.
- Khan UT, Valeo C, Chu A & van Duin B (2012b) Bioretention cell efficacy in cold climates: Part 2 — water quality performance. *Canadian Journal of Civil Engineering* 39:13.
- Li H, Sharkey M, Hunt WF & Davis AP (2009) Mitigation of Impervious Surface Hydrology Using Bioretention in North Carolina and Maryland. *Journal of Hydrologic Engineering* 14(4):9.
- Li L & Davis AP (2014) Urban Stormwater Runoff Nitrogen Composition and Fate in Bioretention Systems. *Environmental Science and Technology* 48:8.
- Marsalek J & Watt WE (1984) Design storms for urban drainage design. *Canadian Journal of Civil Engineering* 11.

- Marvin JT, Passeport E & Drake J (2020) State-of-the-Art Review of Phosphorus Sorption Amendments in Bioretention Media: A Systematic Literature Review. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment* 6(1):16.
- MDDEFP (2013) Manuel d'instructions à l'usage des observateurs en météorologie. (Direction du suivi de l'état de l'environnement, Québec), p 97.
- MDDEP & MAMROT (2014) Guide de gestion des eaux pluviales. (Gouvernement du Québec, Québec), p 386.
- MELCC (2020) Code de conception d'un système de gestion des eaux pluviales admissible à une déclaration de conformité.).
- Minnesota Pollution Control Agency (2022a) *Guidance for meeting dissolved oxygen or oxygen demand TMDL MS4 permit requirements*. (Consulté le 13 mars 2022)
- Minnesota Pollution Control Agency (2022b) *Total Suspended Solids (TSS) in stormwater*. (Consulté le 13 mars 2022)
- Molina-Sanchis I, Lázaro R, Arnau-Rosalén E & Calvo-Cases A (2016) Rainfall timing and runoff: The influence of the criterion for rain event separation. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 64(3):11.
- Müller A, Österlund H, Marsalek J & Vikland M (2020) The pollution conveyed by urban runoff: A review of sources. *Science of the Total Environment* 709:18.
- Muthanna TM, Viklander M & Thorolfsson ST (2008) Seasonal climatic effects on the hydrology of a rain garden. *Hydrological Processes* 22:10.
- NYC Parks and Recreation (s.d) *Drought-Tolerant Species*. <https://www.nycgovparks.org/greening/greenbelt-native-plant-center/garden-species-lists/garden-drought> (Consulté le 24 janvier 2022)
- Oklahoma State University Department of Plant and Soil Sciences (2022) *Canopeo*. (Consulté le 16 février 2022)
- OMOEE (1994) Water Management. Policies, Guidelines, Provincial Water Quality Objectives of the Ministry of Environment and Energy. (Ontario Ministry of Environment and Energy (OMOEE), Toronto), p 32.
- Paquette A (2016) Augmentation de la canopée et de la résilience de la forêt urbaine de la région métropolitaine de Montréal. (Ville de Montréal), p 12.
- Peterson IJ, Igielski S & Davis AP (2015) Enhanced Denitrification in Bioretention Using Woodchips as an Organic Carbon Source. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment* 1(4):9.
- Pineau B (2019) *Évaluation de la performance de pratiques de gestion optimales implantées en série en climat hivernal au Marché Public de Longueuil*. Maître ès sciences (Université Laval, Québec). 147 p(Consulté le 15 avril 2022)
- Powell DN, Khan AA, Aziz NM & Raiford JP (2007) Dimensionless Rainfall Patterns for South Carolina. *Journal of Hydrologic Engineering* 12(1):3.
- Qiu F, Zhao S, Zhao D, Wang J & Fu K (2019) Enhanced Nutrients Removal in Bioretention Systems Modified with Water Treatment Residual and Internal Water Storage Zone. *Environmental Science: Water Research & Technology* 5(5):12.

- Roseen RM & Stone RM (2013) Evaluation and Optimization of Bioretention Design for Nitrogen and Phosphorus Removal (U.S. Environmental Protection Agency, Seattle), p 161.
- Roy-Poirier A, Champagne P & Fillion Y (2010) Bioretention processes for phosphorus pollution control. *Environmental Reviews* 18:15.
- Selbig WR, Buer N & Danz ME (2019) Stormwater-quality performance of lined permeable pavement systems. *Journal of Environmental Management* 251:13.
- Service météorologique du Canada (2022a) Rapport de données quotidiennes - McTavish. (Gouvernement du Canada).
- Service météorologique du Canada (2022b) Rapport de données quotidiennes - Montreal/St-Hubert. (Gouvernement du Canada).
- Shamsudin S, Dan'azumi S & Aris A (2010) Effect of Storm Separation Time on Rainfall Characteristics-A Case Study of Johor, Malaysia. *European Journal of Scientific Research* 45(2):6.
- Shaver E, Maxted J, Curtis G & Carter D (1995) Watershed protection using an integrated approach. *Stormwater NPDES Related Monitoring Needs*. American Society of Civil Engineers.
- Sheridan R, Maynard B, Harrison BD & Manteuffel C (2010) Ridot salt tolerant tree and shrub guide. (Departments of Landscape Architecture and Plant Sciences, University of Rhode Island, Kingston), p 49.
- Søberg LC, Al-Rubaei AM, Viklander M & Blecken G-T (2020) Phosphorus and TSS Removal by Stormwater Bioretention: Effects of Temperature, Salt, and a Submerged Zone and Their Interactions. *Water, Air, & Soil Pollution* :12.
- Société Québécoise de Phytotechnologie (2018) Les aires de biorétentions. (Société Québécoise de Phytotechnologie), p 48.
- Soverdi (s.d-a) Verdir pour embellir : Gingko Biloba "Princeton Sentry". (Coop de Solidarité Éconord, Montréal), p 1.
- Soverdi (s.d-b) Verdir pour embellir : Gleditsia Triacanthos Inermis. (Coop Solidarité Éconord, Montréal), p 1.
- Soverdi (s.d-c) Verdir pour embellir : Gymnocladus dioicus. (Coop Solidarité éconord, Montréal), p 1.
- Toronto and Region Conservation and University of Toronto (2015) Five year performance evaluation of permeable pavements – Kortright, Vaughan. (Toronto and Region Conservation and University of Toronto, Toronto), p 60.
- Université Cornell (2022) Woody Plants Database. (Woody Plants Database).
- University of Illinois (2022) *Purpleosier Willow*. University of Illinois Extension, [https://web.extension.illinois.edu/shrubselector/detail\\_plant.cfm?PlantID=438](https://web.extension.illinois.edu/shrubselector/detail_plant.cfm?PlantID=438) (Consulté le 24 janvier 2022)
- Ville de Lévis (s.d) Suggestions de vivaces de faible entretien. (Ville de Lévis, Lévis), p 4.
- Ville de Québec (s.d.) *Données pluviométriques et critères de conception*. Ville de Québec, Québec, (Consulté le 25 mai 2022)
- Ville de Toronto (2021) Design Criteria for Sewers and Watermains. (Ville de Toronto, Toronto).

- Winston RJ, Arend K, Dorsey JD & Huff FA (2020) Water quality performance of a permeable pavement and stormwater harvesting treatment train stormwater control measure. *Blue-Green Systems* 2(1):21.
- Winston RJ, Dorsey JD, Smolek AP & Hunt WF (2018) Hydrologic Performance of Four Permeable Pavement Systems Constructed over Low-Permeability Soils in Northeast Ohio. *Journal of Hydrologic Engineering* 23(4):13.
- Wright Water Engineers & Geosyntec Consultants (2007) Frequently Asked Questions Fact Sheet for the International Stormwater BMP Database: Why does the International Stormwater BMP Database Project omit percent removal as a measure of BMP performance? (International Stormwater BMP Database).
- Yang Y-Y & Toor GS (2018) Stormwater runoff driven phosphorus transport in an urban residential catchment: Implications for protecting water quality in urban watersheds. *Scientific reports* 8:10.
- Yu SL, Zhang X, Earles A & Sievers M (1999) Field Testing of Ultra-Urban BMPs. in *29th Annual Water Resources Planning and Management Conference* (American Society of Civil Engineers, Arizona).

## 7 ANNEXE

### Annexe I : Coupes-types des infrastructures de contrôle à la source

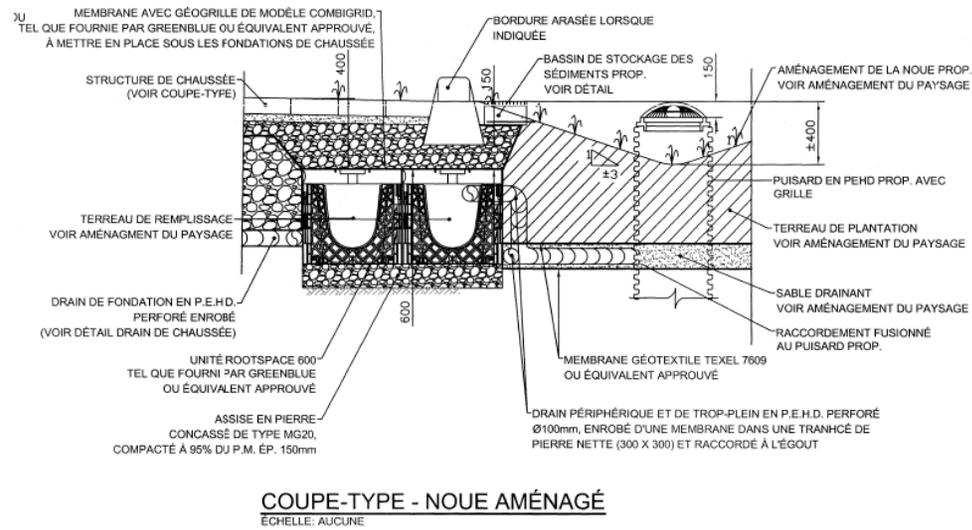


Figure 7.1 Coupe-type d'une cellule de biorétention (tiré du rapport du Groupe-Conseil Génipur 2018)

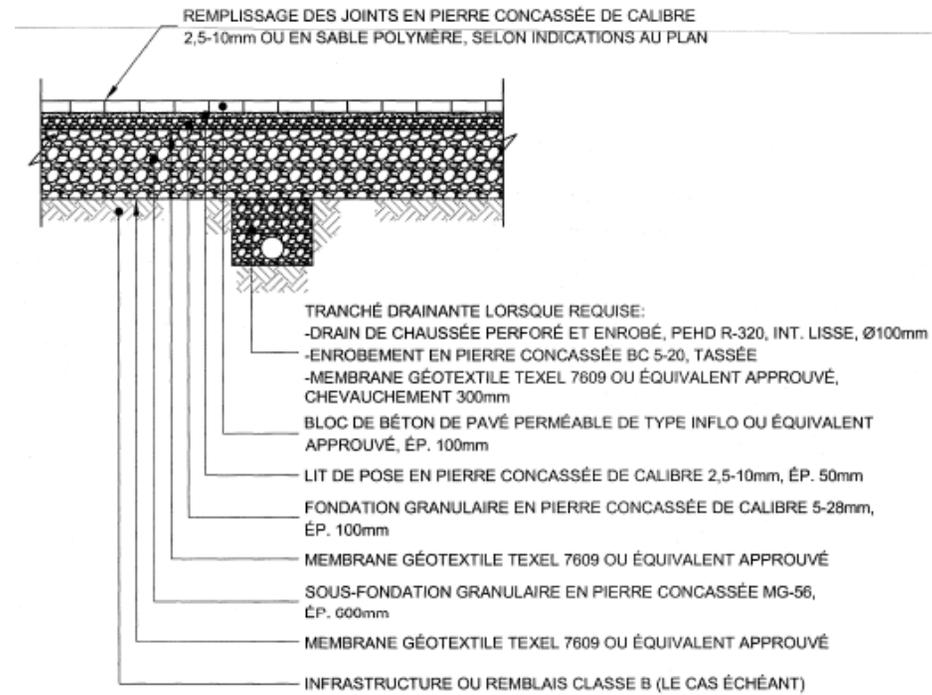


Figure 7.2 Coupe-type du pavage perméable à interbloc (tiré du rapport du Groupe-Conseil Génipur, 2018)

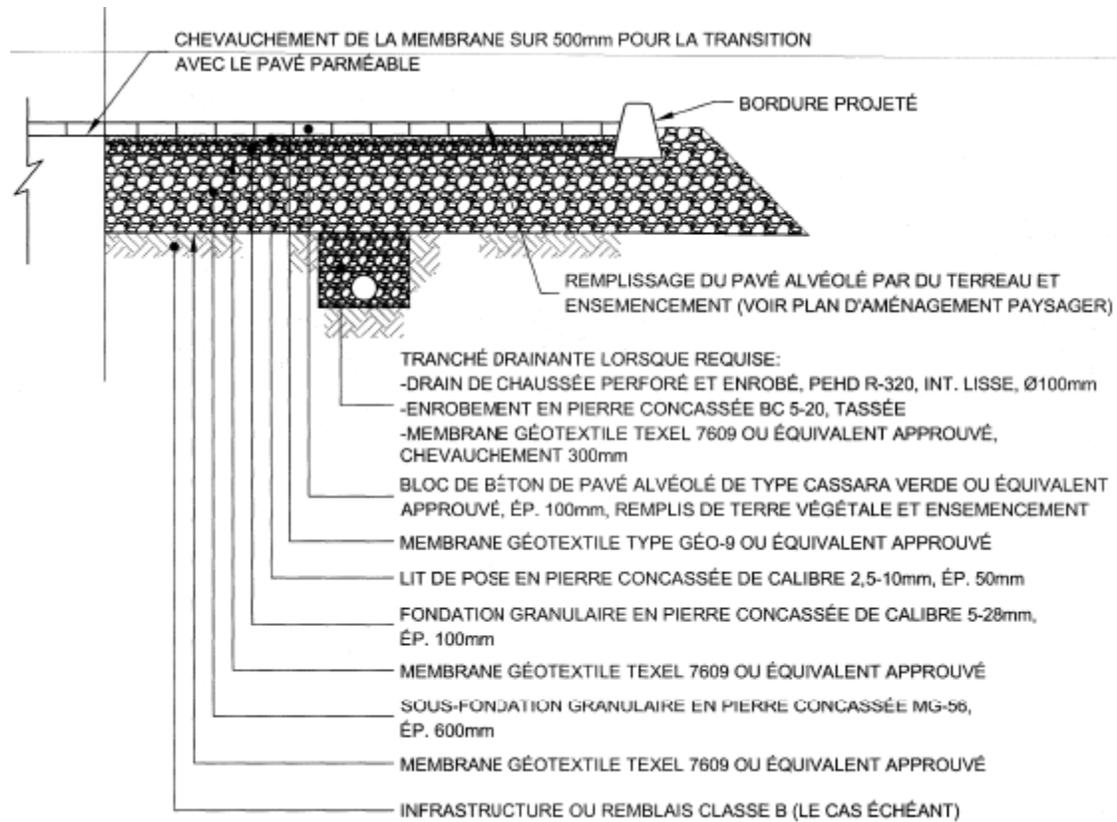


Figure 7.3 Coupe-type du pavage perméable alvéolé (tiré du rapport du Groupe-Conseil Génipur, 2018)

## Annexe II : Caractéristiques des sous-bassins versants et des conduites du modèle PCSWMM du stationnement incitatif de Boucherville, pour le scénario hypothétique où toutes les surfaces sont imperméabilisées

Tableau 7.1 Caractéristiques des sous-bassins du modèle SWMM

Name	Outlet	Area (ha)	Width (m)	Flow Length (m)	Slope (%)	Imperv. (%)	Name	Outlet	Area (ha)	Width (m)	Flow Length (m)	Slope (%)	Imperv. (%)
0	P1	0,0122	40,67	3	33,33	100	39	36	0,0046	30,67	1,5	1,59	100
1	0	0,008	10	8	1,2	100	40	39	0,0109	24,22	4,5	1,59	100
2	0	0,008203	10,25	8,003	1,2	100	41	P9	0,00291	8,31	3,502	0,5	0
5	P1	0,00315	21	1,5	0,79	100	42	P7	0,00492	16,4	3	33,33	100
6	P1	0,00194	12,93	1,5	2,6	100	44	55	0,00137	4,57	2,998	0,5	0
7	P2	0,00252	16,8	1,5	2,45	100	45	58_3	0,00175	5,83	3,002	0,5	0
9	P3	0,0162	54	3	33,33	100	46	P5	0,00137	9,13	1,501	0,78	100
10	9	0,00498	33,2	1,5	3,82	100	47	55	0,00138	4,6	3	0,5	0
11	9	0,00475	31,67	1,5	4,44	100	48	P5	0,001	6,67	1,499	2,64	100
12	11	0,0109	24,22	4,5	4,44	100	49	P4	0,000691	4,61	1,499	0,5	100
13	10	0,0109	24,22	4,5	3,82	100	50	56	0,00118	3,93	3,003	0,5	0
14	P8	0,00357	11,9	3	33,33	100	51	P4	0,00135	9	1,5	0,5	100
15	19	0,00455	30,33	1,5	5,58	100	53	57	0,00563	37,53	1,5	0,5	100
16	19	0,00336	22,4	1,5	1,37	100	55	P5	0,07252	36,26	20	1,61	100
17	16	0,00885	19,67	4,499	1,37	100	56	P4	0,06598	41,24	15,999	0,73	100
18	15	0,00918	20,4	4,5	5,58	100	57	P4	0,033	20,63	15,996	2,48	100
19	P8	0,0141	47	3	33,33	100	63	Infil_ boisé	0,0601	30,05	20	0,5	0
21	P8	0,00279	9,3	3	33,33	100	65	P2	0,0256	19,69	13,002	2,45	100
22	P5	0,00211	7,03	3,001	0,5	0	66	P1	0,0561	37,4	15	1,62	100
23	P5	0,00238	5,95	4	33,33	100	67	P1	0,0439	29,27	14,998	2,56	100
25	P4	0,00232	7,73	3,001	33,33	100	4_3	P11	0,0123	4	30,75	5	100
26	P4	0,0029	9,67	2,999	33,33	100	4_4	P13	0,0129	4	32,25	5	100
29	P6	0,0153	51	3	33,33	100	4_2	P14	0,0102	4	25,5	5	100
30	29	0,00478	31,87	1,5	2,01	100	4_6	P12	0,0105	4	26,25	5	100
31	30	0,0113	25,11	4,5	2,01	100	3_1	P1	0,00248	16,53	1,5	2,55	100
32	29	0,0044	29,33	1,5	0,74	100	3_2	P1	0,00293	19,53	1,5	2,38	100
33	32	0,0121	26,89	4,5	0,74	100	27_1	P4	0,00524	34,93	1,5	1,3	100
34	P7	0,00117	3,9	3	0,5	0	27_2	P5	0,00339	22,6	1,5	1,37	100
35	P7	0,00257	6,43	3,997	33,33	100	24_1	P4	0,00119	3,97	2,997	33,33	100
36	P7	0,0142	47,33	3	33,33	100	24_2	P5	0,00119	3,97	2,997	33,33	100
37	36	0,0038	25,33	1,5	0,95	100	58_2	P6	0,0104	26	4	2,81	100
38	37	0,0101	22,44	4,501	0,95	100	58_3	P6	0,0293	29,3	10	1,95	100
58_4	P6	0,0129	32,25	4	7,39	100	43_1	drain_autou r_site	0,025	166,67	1,5	0,5	100
62_2	P3	0,0193	27,57	7	7,84	100	43_2	drain_autou r_site	0,00722	48,13	1,5	0,5	100
62_3	P3	0,0101	25,25	4	10,76	100	52_3	27_1	0,00574	57,4	1	0,5	0
52_4	27_2	0,00573	57,3	1	0,5	0	28_2	4_2	0,00584	2,25	25,956	0,5	100
28_1	4_4	0,00575	1,74	33,046	0,5	100	52_2	28_1	0,00549	21,96	2,5	0,5	0

**Tableau 6.1 (suite) Caractéristiques des sous-bassins du modèle SWMM**

Name	Outlet	Area (ha)	Width (m)	Flow Length (m)	Slope (%)	Imperv. (%)
52_5	28_2	0,00511	20,44	2,5	0,5	0
59_1	P7	0,0104	29,71	3,501	2,81	100
59_3	P7	0,00842	21,05	4	1,39	100
54_1	67	0,00492	24,6	2	0,5	0
54_2	66	0,00457	22,85	2	0,5	0
64_1	3_1	0,00247	12,35	2	0,5	0
64_2	3_2	0,0038	19	2	0,5	0
59_5	P7	0,00385	9,63	3,998	2,5	100
59_4	P7	0,0281	18,73	15,003	0,79	100
59_6	42	0,0055	12,22	4,501	0,8	100
60_2	P8	0,00363	9,08	3,998	2,83	100
60_4	14	0,00559	13,98	3,999	0,74	100
60_1	P8	0,0286	16,82	17,004	0,85	100
20_4	drain_aut our_site	0,00417	20,85	2	0,5	0
20_6	drain_aut our_site	0,0079	39,5	2	0,5	0
20_5	66	0,00142	7,1	2	0,5	0
20_7	drain_aut our_site	0,00857	42,85	2	0,5	0
20_1	65	0,00134	6,7	2	0,5	0
20_8	drain_aut our_site	0,00351	17,55	2	0,5	0
20_3	62_4	0,00236	11,8	2	0,5	0
20_9	drain_aut our_site	0,00764	38,2	2	0,5	0
4_9	62_2	0,00348	3,48	10	2,51	100
4_8	9	0,00589	4,91	11,996	0,29	100
4_13	62_3	0,00385	3,85	10	2,2	100
4_12	58_3	0,00365	3,65	10	1	100
4_5	29	0,00621	5,18	11,988	0,6	100
4_15	58_2	0,00432	4,32	10	1,06	100
62	19	0,0123	12,3	10	1,2	100
4_14	21	0,00312	5,2	6	1,17	100
4_16	P10	0,0179	11,93	15,004	3,1	100
4_1	35	0,00312	5,2	6	1,31	100
4_17	P9	0,0168	11,2	15	2,29	100
3	67	0,00302	7,55	4	0,5	0
4	67	0,005	33,33	1,5	0,5	100
8	67	0,00351	8,78	3,998	0,5	0
4_11	59_1	0,002902	3,63	7,994	1,94	100
4_7	61_1	0,002447	3,06	7,997	3,26	100
4_10	36	0,005261	6,58	7,995	1,77	100
4_20	59_4	0,002837	4,05	7,005	1,34	100
4_18	19	0,004523	5,65	8,005	2,28	100
4_21	60_1	0,00263	3,76	6,995	2,63	100

**Tableau 7.2 Caractéristiques supplémentaires des sous-bassins du modèle SWMM**

Name	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Zero Imperv (%)	Subarea Routing	Percent Routed (%)	Name	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Zero Imperv (%)	Subarea Routing	Percent Routed (%)
0	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	67	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	4_3	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	4_4	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
5	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	4_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
6	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	4_6	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
7	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	3_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
9	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	3_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
10	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	27_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
11	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	27_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
12	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	24_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
13	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	24_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
14	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	58_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
15	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	58_3	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
16	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	58_4	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
17	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	62_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
18	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	62_3	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
19	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	62_4	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
21	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	61_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
22	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	43_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
23	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	43_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
25	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	52_3	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
26	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	52_4	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
29	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	28_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
30	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	28_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
31	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	52_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
32	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	52_5	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
33	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	59_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
34	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	59_3	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
35	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	54_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
36	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	54_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
37	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	64_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
38	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	64_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
39	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	59_5	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
40	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	59_4	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
41	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	59_6	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
42	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	60_2	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
44	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	60_4	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
45	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	60_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
46	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	20_4	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
47	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	20_6	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
48	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	20_5	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
49	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	20_7	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
50	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	20_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
51	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	20_8	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
53	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	20_3	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
55	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	20_9	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
56	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	4_9	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
57	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100	4_8	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100

**Tableau 6.2 (suite) Caractéristiques supplémentaires des sous-bassins du modèle SWMM**

Name	N Imperv	N Perv	Dstore Imperv (mm)	Dstore Perv (mm)	Zero Imperv (%)	Subarea Routing	Percent Routed (%)
4_15	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
62	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_14	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_16	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_1	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_17	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
3	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
8	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_11	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_7	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_10	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_20	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_18	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_21	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
63	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
65	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
66	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_13	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_12	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100
4_5	0,013	0,24	1,5	5	0	OUTLET	100

**Tableau 7.3 Caractéristiques des conduites du modèle SWMM**

Name	Inlet Node	Outlet Node	Length (m)	Roughness	Inlet Elev. (m)	Outlet Elev. (m)	Cross-Section	Geom1 (m)	Slope (m/m)
C1	P1	P2	29	0,013	9	8,833	CIRCULAR	0,3	0,00576
C2	P2	RP1	17,7	0,013	8,833	8,782	CIRCULAR	0,3	0,00288
C3	P3	RP1	15	0,013	8,778	8,642	CIRCULAR	0,25	0,00907
C4	RP1	RP2	31,8	0,013	8,642	8,515	CIRCULAR	0,375	0,00399
C5	P11	P12	29,3	0,013	10,903	9,022	CIRCULAR	0,25	0,06433
C6	P12	RP2	6,3	0,013	9,022	8,99	CIRCULAR	0,25	0,00508
C7	P13	P14	29,2	0,013	10,903	9,019	CIRCULAR	0,25	0,06466
C8	P14	RP2	5,7	0,013	9,019	8,99	CIRCULAR	0,25	0,00509
C9	P4	P5	27,5	0,013	9,612	9,337	CIRCULAR	0,25	0,01
C10	P5	P6	26,1	0,013	9,337	9,04	CIRCULAR	0,25	0,01138
C11	P6	RP2	24,2	0,013	8,99	8,648	CIRCULAR	0,3	0,01413
C12	RP2	RP3	30,5	0,013	8,515	8,459	CIRCULAR	0,6	0,00184
C13	RP3	RP4	26,8	0,013	8,459	8,41	CIRCULAR	0,6	0,00183
C14	P10	RP4	14,9	0,013	8,451	8,335	CIRCULAR	0,2	0,00779
C15	P9	RP4	6	0,013	8,571	8,535	CIRCULAR	0,2	0,006
C16	RP4	S	13	0,013	8,3	8,271	CIRCULAR	0,6	0,00223
C17	P8	RP3	19,1	0,013	8,584	8,459	CIRCULAR	0,3	0,00654
C18	P7	RP3	20,1	0,013	8,857	8,634	CIRCULAR	0,25	0,0111

### Annexe III : Comparaison graphique du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent mesuré à la sortie des ouvrages

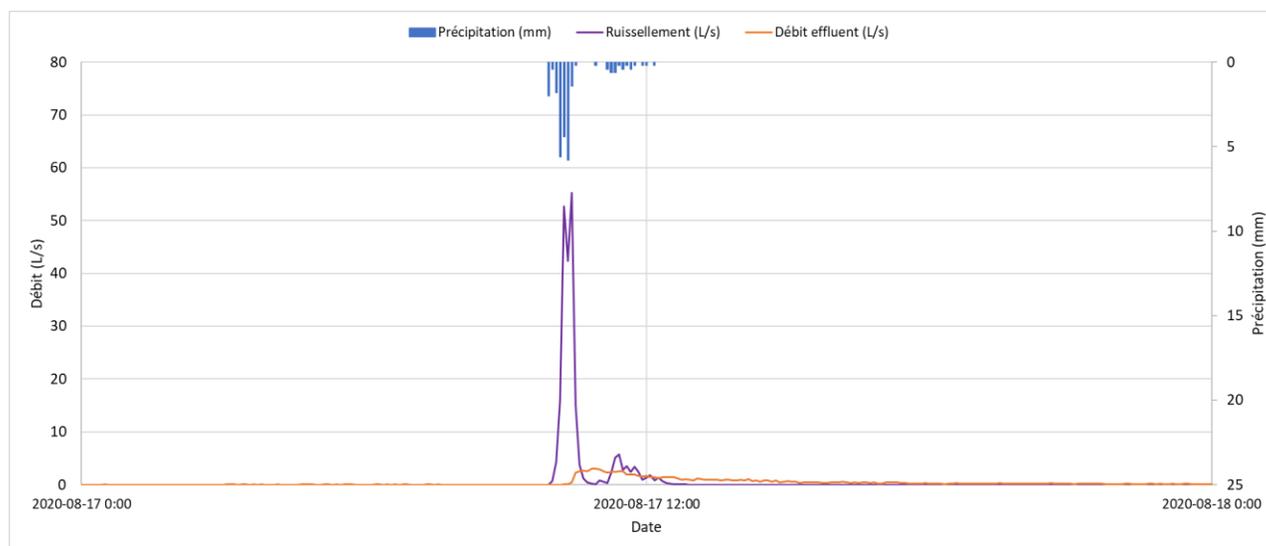
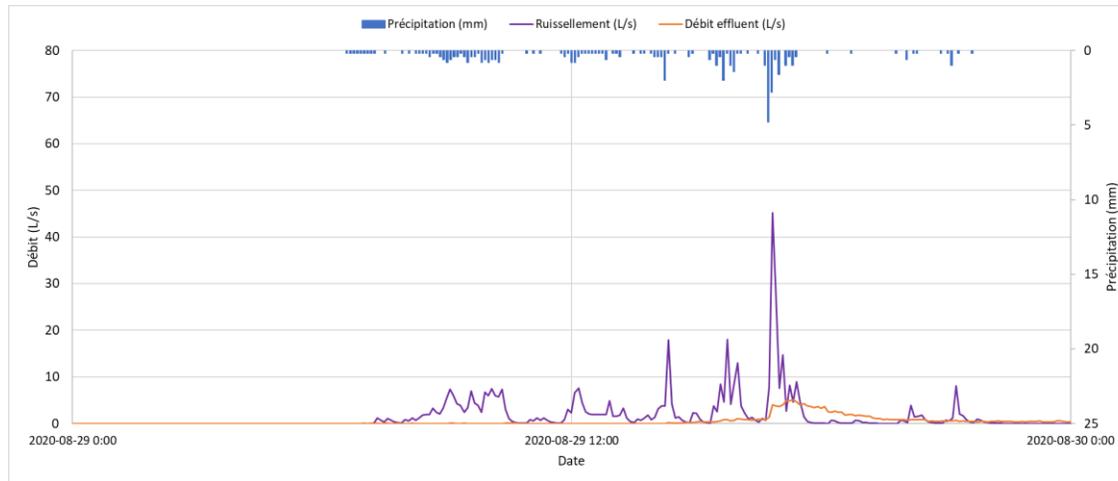
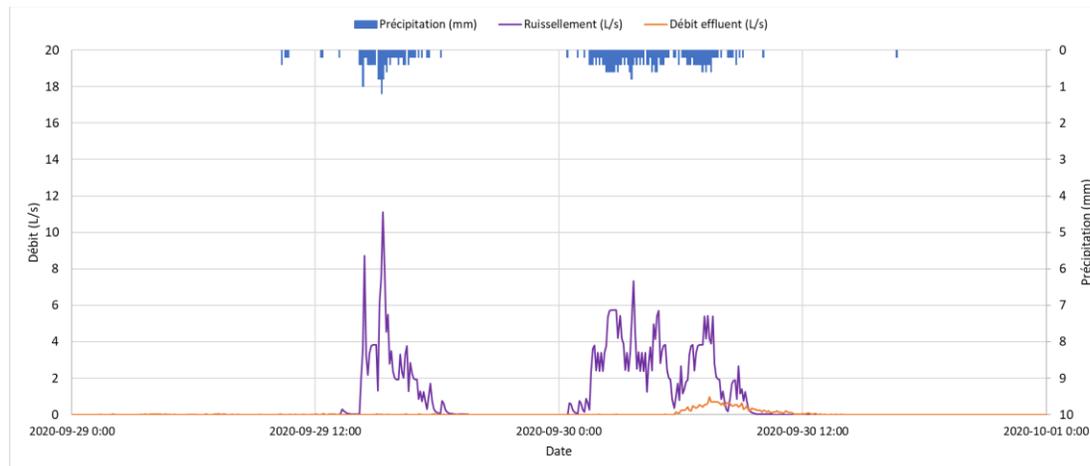


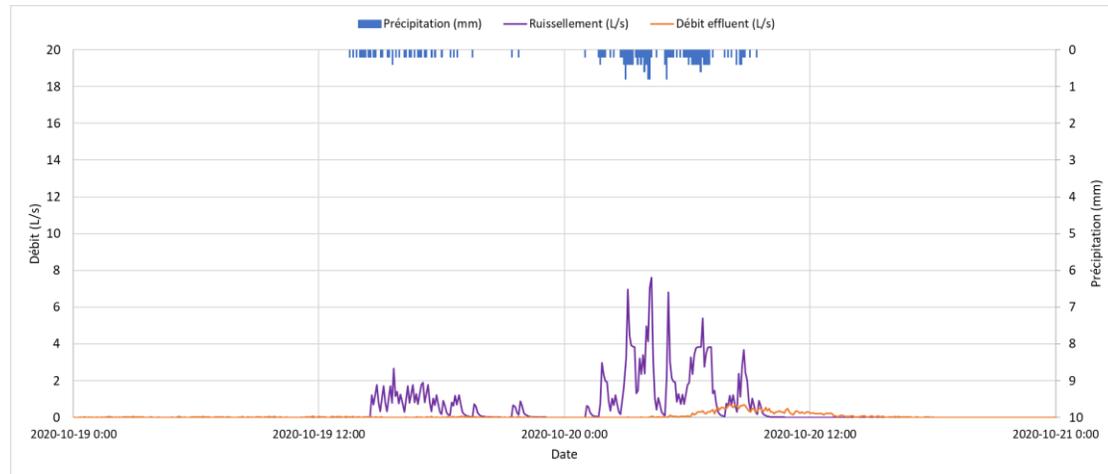
Figure 7.4 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 17 août 2020



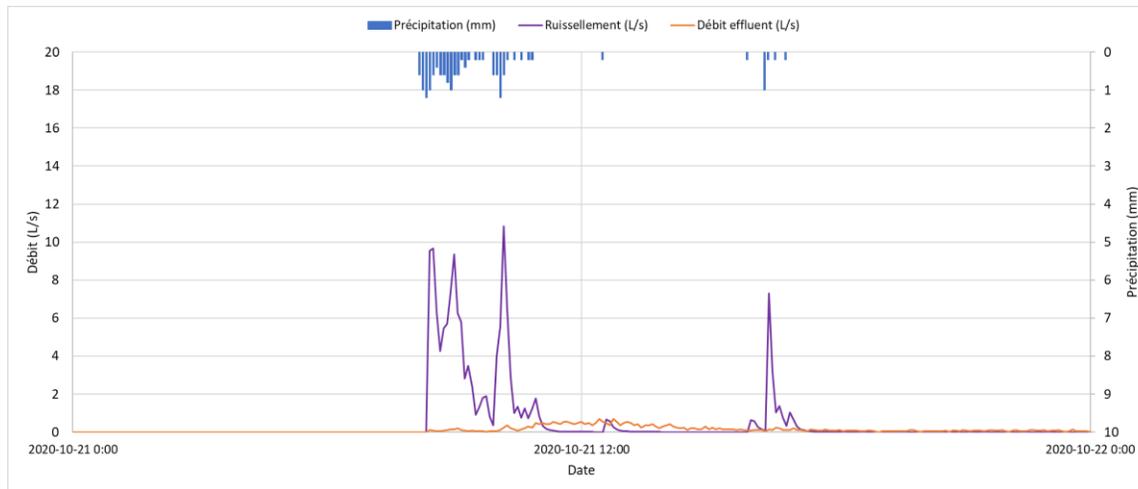
**Figure 7.5 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 29 août 2020**



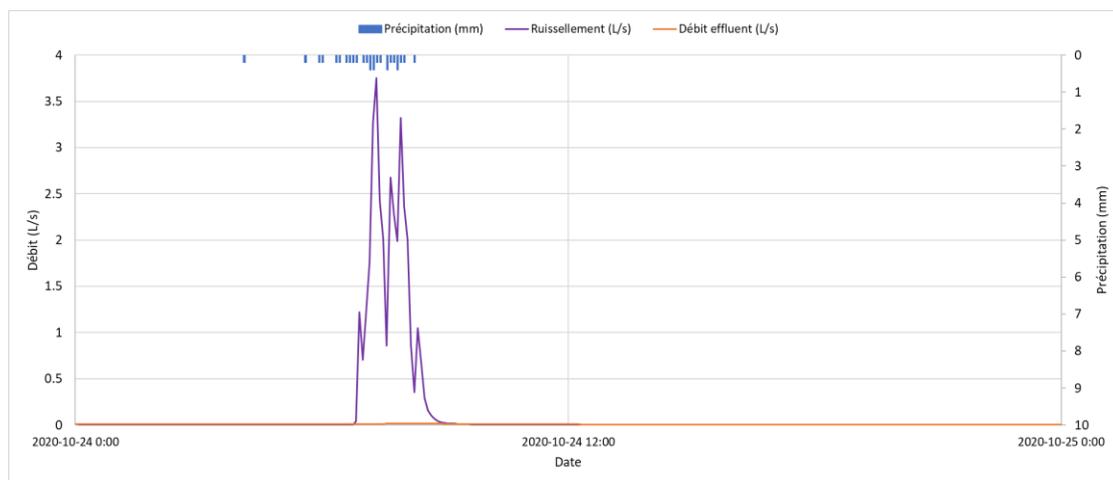
**Figure 7.6 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 29 septembre 2020**



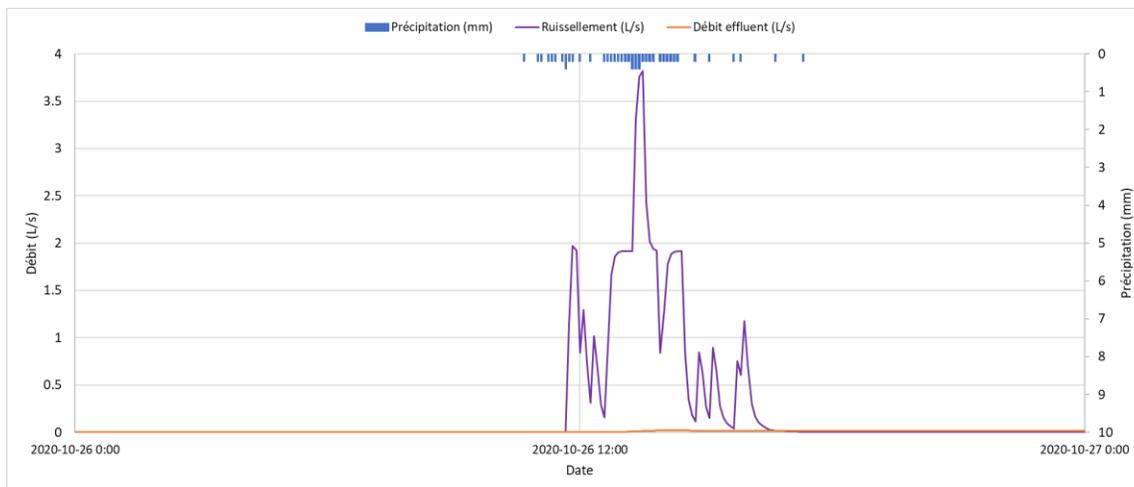
**Figure 7.7 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 19 octobre 2020**



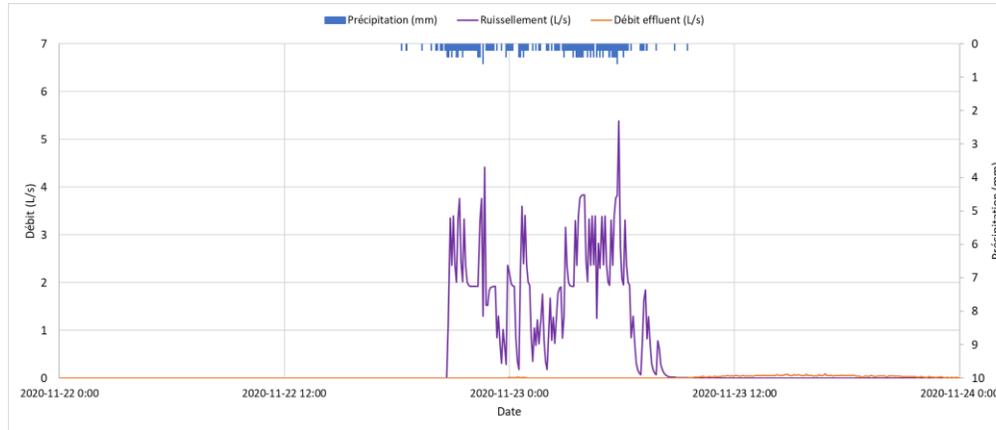
**Figure 7.8 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 21 octobre 2020**



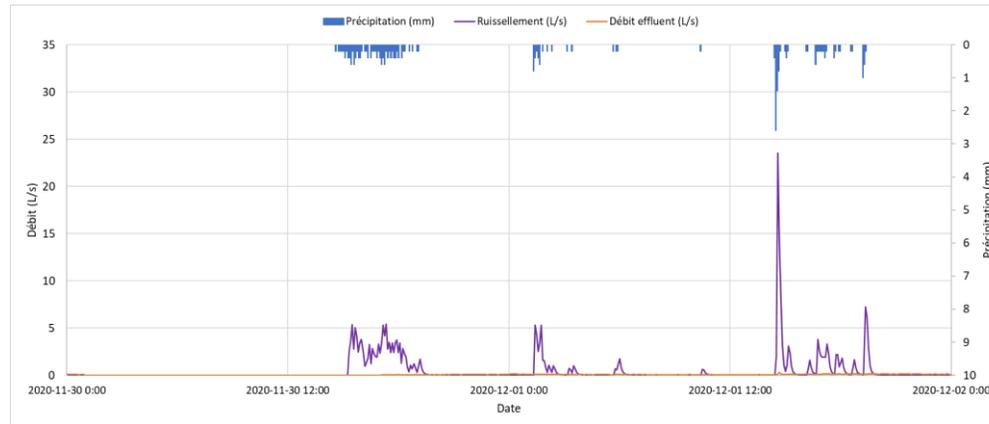
**Figure 7.9** Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 24 octobre 2020



**Figure 7.10** Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 26 octobre 2020



**Figure 7.11 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 22 novembre 2020**



**Figure 7.12 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 30 novembre 2020**

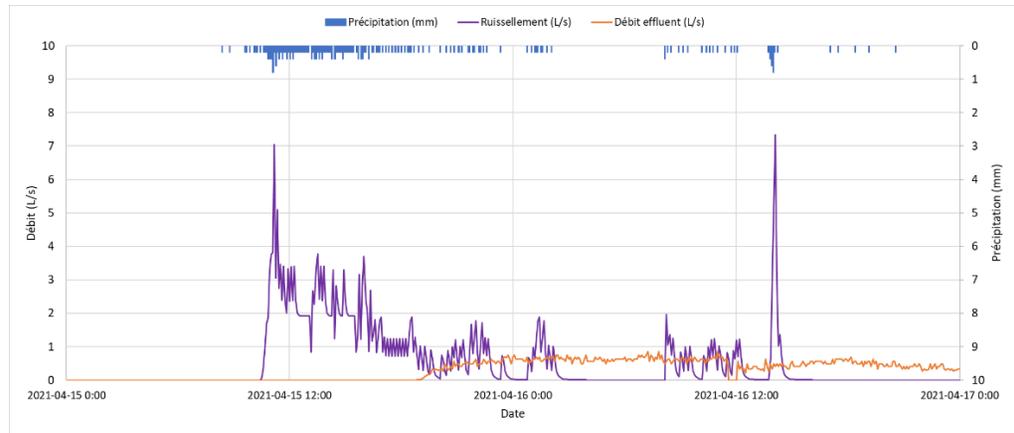


Figure 7.13 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 15 avril 2021

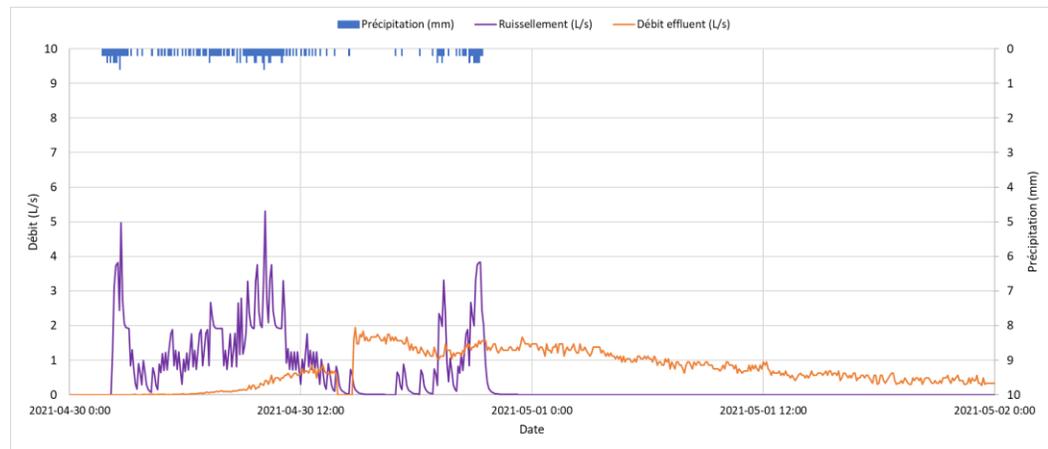
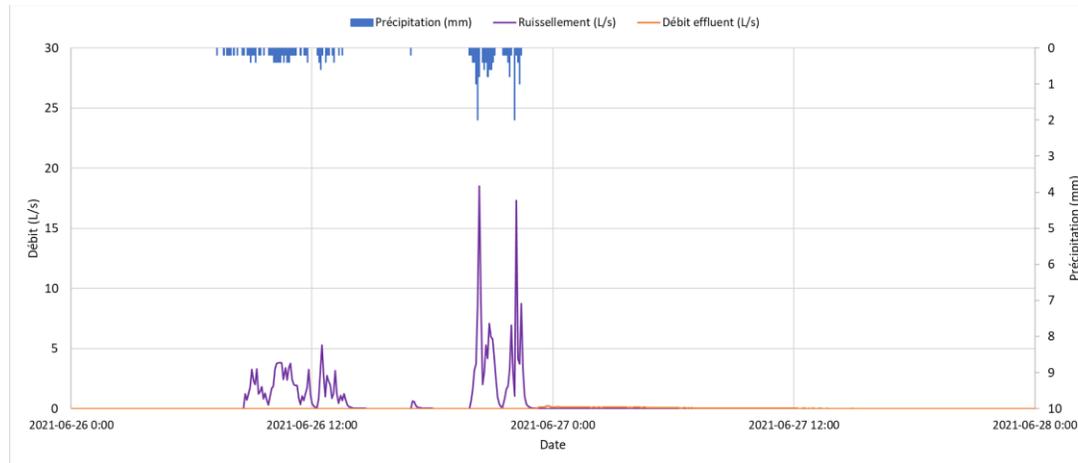
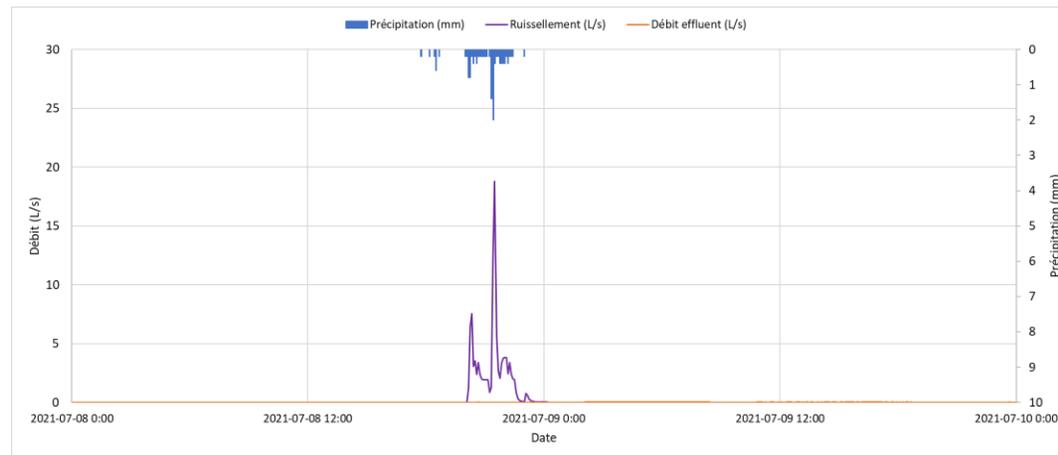


Figure 7.14 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 30 avril 2021



**Figure 7.15 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 26 juin 2021**



**Figure 7.16 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 08 juillet 2021**

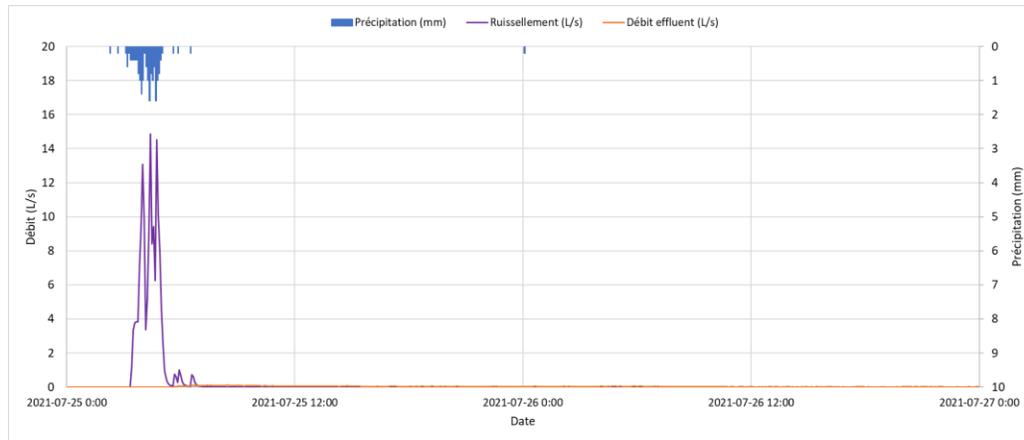


Figure 7.17 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 25 juillet 2021

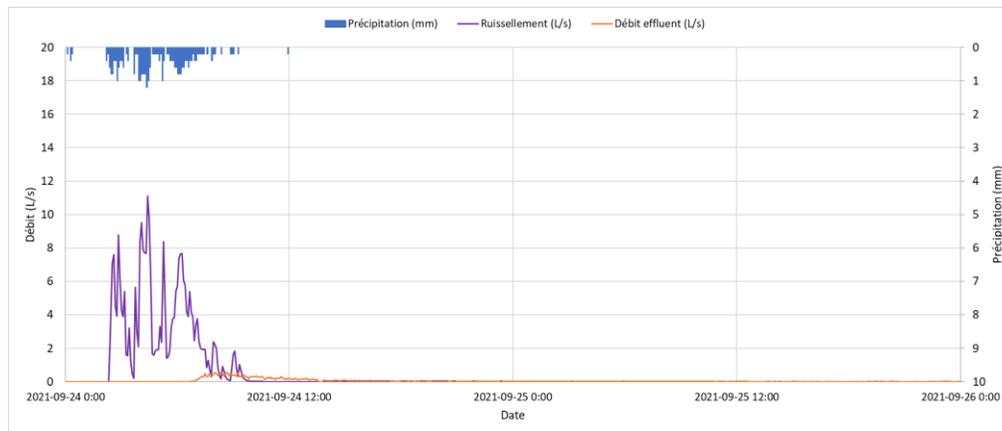
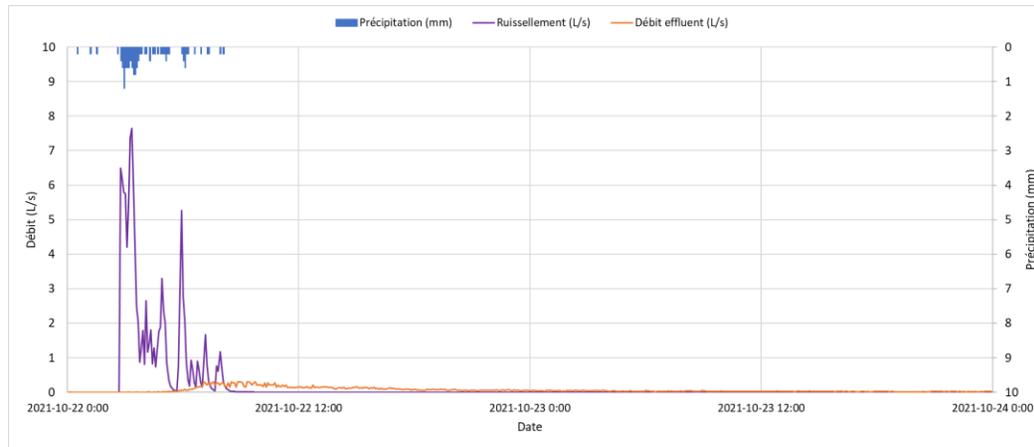
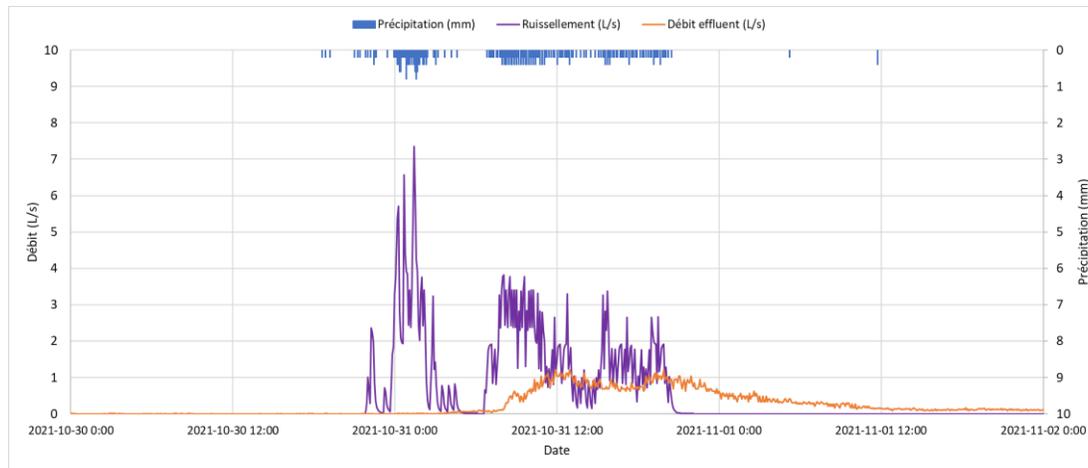


Figure 7.18 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 24 septembre 2021



**Figure 7.19 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 22 octobre 2021**



**Figure 7.20 Comparaison du débit de ruissellement simulé avec le débit effluent des infrastructures pour l'évènement du 30 octobre 2021**

## Annexe IV : Caractéristiques des évènements regroupés par la méthode des k-moyennes

Tableau 7.4 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la période de retour des évènements d'une heure pour les scénarios D à G

Période de retour	D				E				F				G			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 2]	190	13	15	-	16	606	54	30	2363	192	93	26	273	21	40	-
[2, 5]	-	7	3	-	10	-	5	5	-	7	7	15	-	-	4	1
[5, 10]	-	-	-	1	3	-	-	-	-	1	2	5	-	-	1	1
[10, 25]	-	-	-	1	2	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	1
[25, 50]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[50, 100]	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1
[100, ∞]	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1

Tableau 7.5 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la hauteur de pluie totale des évènements d'une heure pour les scénarios D à G

Hauteur de pluie totale (mm)	D				E				F				G			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 5]	107	-	-	-	-	453	-	-	2016	-	-	-	212	-	-	-
[5, 10]	78	1	-	-	-	147	12	9	339	80	41	-	60	3	12	-
[10, 15]	5	6	9	-	5	6	31	16	8	79	42	10	1	14	20	-
[15, 20]	-	9	6	-	12	-	12	8	-	33	15	19	-	4	13	-
[20, 25]	-	4	3	-	10	-	4	2	-	6	2	14	-	-	-	1
[25, 30]	-	-	-	-	2	-	-	-	-	1	1	3	-	-	-	2
[30, 35]	-	-	-	2	2	-	-	-	-	1	1	3	-	-	-	-
[35+]	-	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2

Tableau 7.6 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon le mois d'occurrence des évènements d'une heure pour les scénarios D à G

Mois	D				E				F				G			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
Mai	29	1	2	-	1	88	7	6	425	16	12	5	38	2	6	-
Juin	32	7	2	3	11	117	11	11	487	41	24	14	57	5	17	3
Juillet	45	11	5	1	18	123	18	13	395	53	38	27	103	6	17	2
Août	32	1	6	-	3	120	17	5	342	67	24	5	25	8	5	-
Sept	34	-	3	-	-	81	6	-	358	21	4	-	34	-	-	-
Oct	18	-	-	-	-	77	-	-	356	2	-	-	16	-	-	-

**Tableau 7.7 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la période de retour des évènements de deux heures pour les scénarios D à G**

Période de retour	D				E				F				G			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 2[	5	1	1	1	9	5	-	82	31	265	9	51	52	-	1	3
[2, 5[	-	-	-	-	-	2	-	-	2	-	7	1	-	-	4	2
[5, 10[	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	3	-	-	1	-	-
[10, 25[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[25, 50[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[50, 100[	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	1	-	-
[100, ∞	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tableau 7.8 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la hauteur de pluie totale des évènements de deux heures pour les scénarios D à G**

Hauteur de pluie totale (mm)	D				E				F				G			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 5[	-	-	-	-	-	-	-	17	-	79	-	-	10	-	-	-
[5, 10[	5	-	-	-	-	-	-	50	3	172	-	-	35	-	-	-
[10, 15[	-	-	-	1	-	-	-	11	10	14	1	29	7	-	-	1
[15, 20[	-	-	-	-	7	3	-	3	13	-	3	15	-	-	-	1
[20, 25[	-	1	1	-	2	2	-	1	5	-	6	7	-	-	2	2
[25, 30[	-	-	-	-	-	1	-	-	2	-	2	1	-	-	1	1
[30, 35[	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	5	-	-	1	2	-
[35+	-	-	-	-	-	1	1	-	-	-	3	-	-	1	-	-

**Tableau 7.9 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon le mois d'occurrence des évènements de deux heures pour les scénarios D à G**

Mois	D				E				F				G			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
Mai	2	-	-	1	-	-	-	20	1	60	2	7	20	-	1	1
Juin	-	-	1	-	8	2	2	7	15	30	11	3	3	2	3	-
Juillet	2	-	-	-	1	3	-	21	9	62	3	13	20	-	-	2
Août	-	1	-	-	-	1	-	14	4	25	1	12	3	-	-	-
Sept	-	-	-	-	-	2	-	11	4	39	3	17	3	-	1	2
Oct	1	-	-	-	-	-	-	9	-	49	-	-	3	-	-	-

**Tableau 7.10 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la période de retour des évènements de 15 minutes pour les scénarios A à C**

Période de retour	A				B				C			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 2[	2510	447	136	98	304	1524	74	82	53	448	10	35
[2, 5[	-	1	-	4	1	-	2	1	1	-	2	-
[5, 10[	-	-	-	2	-	-	2	-	-	-	2	-
[10, 25[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[25, 50[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[50, 100[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[100, ∞	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tableau 7.11 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la hauteur de pluie totale des évènements de 15 minutes pour les scénarios A à C**

Hauteur de pluie totale (mm)	A				B				C			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 5[	2510	437	113	23	299	1524	17	59	448	36	-	23
[5, 10[	-	10	23	69	5	-	51	23	-	17	6	12
[10, 15[	-	1	-	10	1	-	8	1	-	1	6	-
[15, 20[	-	-	-	2	-	-	2	-	-	-	2	-
[20, 25[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[25, 30[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[30, 35[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[35+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tableau 7.12 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon le mois d'occurrence des évènements de 15 minutes pour les scénarios A à C**

Mois	A				B				C			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
Mai	352	42	7	7	29	206	6	5	61	5	1	2
Juin	456	73	20	14	50	293	11	15	105	10	2	6
Juillet	518	150	52	43	87	305	35	32	103	17	6	14
Août	545	113	25	25	86	368	17	17	108	9	4	5
Sept	375	62	26	13	47	212	8	12	38	13	1	8
Oct	264	8	6	2	6	140	1	2	33	-	-	-

**Tableau 7.13 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la période de retour des évènements de 30 minutes pour les scénarios A à C**

Période de retour	A				B				C			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 2[	660	38	219	27	99	57	28	411	5	6	126	16
[2, 5[	-	6	-	6	-	2	7	-	3	1	-	-
[5, 10[	-	-	-	3	-	1	-	-	-	-	-	-
[10, 25[	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
[25, 50[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[50, 100[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[100, ∞	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tableau 7.14 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la hauteur de pluie totale des évènements de 30 minutes pour les scénarios A à C**

Hauteur de pluie totale (mm)	A				B				C			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 5[	659	-	99	-	46	4	-	406	-	-	120	1
[5, 10[	1	19	117	10	51	43	11	5	-	3	6	12
[10, 15[	-	23	3	13	2	10	20	-	5	3	-	3
[15, 20[	-	1	-	12	-	3	2	-	1	1	-	-
[20, 25[	-	1	-	2	-	-	2	-	2	-	-	-
[25, 30[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[30, 35[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[35+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tableau 7.15 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon le mois d'occurrence des évènements de 30 minutes pour les scénarios A à C**

Mois	A				B				C			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
Mai	90	2	18	2	2	5	-	43	-	-	10	1
Juin	138	8	46	13	23	15	7	85	-	6	36	4
Juillet	148	17	71	11	35	22	14	107	2	1	38	7
Août	112	16	52	10	28	9	13	70	6	-	21	3
Sept	88	1	25	1	9	9	1	60	-	-	14	1
Oct	84	-	7	-	2	-	-	46	-	-	7	-

**Tableau 7.16 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la période de retour des évènements de six heures pour les scénarios H à K**

Période de retour	H				I				J				K			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 2[	41	5	71	106	1	1	409	112	130	344	50	1	189	12	68	1
[2, 5[	-	15	3	-	23	1	-	5	-	-	28	1	-	26	-	1
[5, 10[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[10, 25[	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2
[25, 50[	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1
[50, 100[	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1
[100, ∞	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1

**Tableau 7.17 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la hauteur de pluie totale des évènements de six heures pour les scénarios H à K**

Hauteur de pluie totale (mm)	H				I				J				K			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 5[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[5, 10[	-	-	-	15	-	-	75	-	-	75	-	-	50	-	-	-
[10, 15[	-	-	-	56	-	-	155	-	1	154	-	-	61	-	-	-
[15, 20[	11	-	-	24	-	-	94	6	43	57	-	-	36	-	12	-
[20, 25[	22	-	27	11	-	-	69	37	52	50	5	-	34	-	33	-
[25, 30[	7	-	27	-	-	1	15	44	30	8	22	1	7	3	21	1
[30, 35[	-	4	16	-	2	-	1	20	3	-	20	-	-	8	2	-
[35+	1	16	4	-	22	6	-	10	1	-	31	6	1	27	-	6

**Tableau 7.18 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon le mois d'occurrence des évènements de six heures pour les scénarios H à K**

Mois	H				I				J				K			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
Mai	25	-	-	20	-	-	84	5	5	84	-	-	48	-	1	-
Juin	13	4	15	21	3	-	99	29	45	69	17	-	38	11	23	-
Juillet	-	16	10	11	20	6	37	19	17	33	26	6	5	26	10	6
Août	-	-	20	9	1	-	48	14	36	27	1	-	18	1	25	-
Sept	2	-	2	21	-	1	69	16	15	58	13	1	32	-	5	1
Oct	1	-	27	24	-	-	72	34	12	73	21	-	48	-	4	-

**Tableau 7.19 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la période de retour des évènements de 12 heures pour les scénarios H à K**

Période de retour	H				I				K			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 2[	19	-	15	2	-	49	98	-	21	-	-	113
[2, 5[	-	-	-	2	-	20	-	-	18	-	-	2
[5, 10[	-	1	-	-	-	1	-	1	1	-	1	-
[10, 25[	-	-	-	-	1	1	-	1	1	1	1	-
[25, 50[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[50, 100[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[100, ∞	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Tableau 7.20 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la hauteur de pluie totale des évènements de 12 heures pour les scénarios H à K**

Hauteur de pluie totale (mm)	H				I				K			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 5[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[5, 10[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[10, 15[	-	-	-	-	-	-	10	-	-	-	-	10
[15, 20[	-	-	2	-	-	-	33	-	-	-	-	25
[20, 25[	-	-	8	-	-	-	28	-	-	-	-	27
[25, 30[	-	-	5	-	-	-	15	-	-	-	-	14
[30, 35[	4	-	-	-	-	12	4	-	2	-	-	13
[35+	15	1	-	4	1	59	8	2	39	1	2	26

**Tableau 7.21 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon le mois d'occurrence des évènements de 12 heures pour les scénarios H à K**

Mois	H				I				K			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
Mai	-	-	-	-	1	1	6	-	-	1	-	7
Juin	-	-	-	-	-	5	14	2	3	-	2	15
Juillet	-	1	-	-	-	6	2	-	6	-	-	-
Août	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	2
Sept	12	-	15	-	-	13	36	-	4	-	-	39
Oct	7	-	-	4	-	46	38	-	28	-	-	52

**Tableau 7.22 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la période de retour des évènements de 24 heures pour les scénarios H à K**

Période de retour	H				I				K			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 2[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-
[2, 5[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	1
[5, 10[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	4
[10, 25[	-	-	-	-	-	1	-	2	-	-	-	6
[25, 50[	1	-	-	1	-	-	3	-	-	-	-	-
[50, 100[	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
[100, ∞	-	1	-	-	-	-	2	1	-	-	-	-

**Tableau 7.23 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon la hauteur de pluie totale des évènements de 24 heures pour les scénarios H à K**

Hauteur de pluie totale (mm)	H				I			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
[0, 5[	-	-	-	-	-	-	-	-
[5, 10[	-	-	-	-	-	-	-	-
[10, 15[	-	-	-	-	-	-	-	-
[15, 20[	-	-	-	-	-	-	-	-
[20, 25[	-	-	-	-	-	-	-	-
[25, 30[	-	-	-	-	-	-	-	-
[30, 35[	-	-	-	-	-	-	-	-
[35+	1	1	1	1	7	1	6	11

**Tableau 7.24 Nombre d'évènements par groupe de k-moyennes selon le mois d'occurrence des évènements de 24 heures pour les scénarios H à K**

Mois	H				I			
	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4	Gr 1	Gr 2	Gr 3	Gr 4
Mai	-	-	-	-	-	-	-	-
Juin	-	-	-	-	-	-	-	-
Juillet	-	-	-	-	-	-	-	-
Août	1	1	1	1	7	-	-	11
Sept	-	-	-	-	-	1	6	-
Oct	-	-	-	-	-	-	-	-