



Évaluation de la performance de pratiques de gestion optimales installées en série : le cas du marché public de Longueuil

Mémoire

Caroline Brodeur-Doucet

Maîtrise en génie des eaux - avec mémoire
Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

Évaluation de la performance de pratiques de gestion optimales
installées en série :

le cas du marché public de Longueuil

Mémoire

Caroline Brodeur-Doucet

Sous la direction de :

Paul Lessard, directeur de recherche
Geneviève Pelletier, codirectrice de recherche

RÉSUMÉ

Cette étude de cas menée au Marché public de Longueuil avait pour objectif d'évaluer la performance hydraulique et l'efficacité épuratoire de PGOs installés en série dans un climat nordique comme au Québec. Pour ce faire, un protocole de suivi quantitatif et qualitatif a été développé pour étudier deux chaînes de traitement: une chaîne constituée d'une tranchée drainante, d'un bassin sec et d'un bassin avec retenue permanente et une seconde constituée de biorétentions et d'un bassin avec retenue permanente.

Le suivi quantitatif des eaux pluviales a démontré l'efficacité des PGOs à retenir les eaux de ruissellement. Les biorétentions permettent de réduire, en moyenne, les volumes et les débits de pointe de 70 % et 94 % respectivement. Les résultats ont également démontré que la tranchée drainante, le bassin sec et le bassin avec retenue permanente permettent, en moyenne, un décalage des débits respectifs de 30 minutes, 10 minutes et d'un peu plus d'une heure. Combinées, les PGOs permettent le décalage des débits de près de deux heures, ce qui est souhaité.

Les campagnes d'échantillonnage ont montré des résultats favorables pour l'enlèvement des matières en suspension et des matières organiques au niveau de la tranchée drainante et des cellules de biorétention. En effet, des taux moyens d'enlèvement de matières en suspension de 79 % et 84 % ont respectivement été obtenus pour ces deux PGOs. Toutefois, pour les cellules de biorétention un relargage de phosphore a, à l'occasion, été observé. Il s'est avéré que le bassin sec relargue également le phosphore, mais aussi des matières en suspension. Par contre, l'ajout du bassin à retenue permanente à l'aval permet de contrôler ce relargage en effectuant un traitement supplémentaire. L'aménagement d'une PGO ayant pour fonction de traiter les eaux est donc un choix judicieux pour pallier le relâchement des contaminants de celle à l'amont. À la lumière des de ces résultats, l'emploi de chaînes de traitement est donc avantageux comparativement à l'utilisation de PGOs seules.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ACRONYMES.....	ix
REMERCIEMENTS	x
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Objectifs et hypothèses de recherche.....	5
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 Effet du développement urbain sur les eaux de ruissellement	7
2.1.1 Quantité des eaux de ruissellement	7
2.1.2 Qualité des eaux de ruissellement.....	8
2.2 Pratiques de gestion optimales des eaux pluviales (PGOs)	14
2.2.1 Présentation des concepts de PGOs.....	14
2.2.2 Performance des PGOs employées seules.....	17
2.2.3 Performance des PGOs installées en série	23
2.3 Suivi du comportement hydraulique et de l'efficacité épuratoire des PGOs	24
2.3.1 Suivi quantitatif	24
2.3.2 Suivi qualitatif	26
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE	28
3.1 Description générale du site à l'étude : marché public de Longueuil	28
3.1.1 Chaîne de traitement : tranchée drainante, bassin sec et bassin avec retenue permanente ..	32
3.1.2 Chaîne de traitement : cellules de biorétention et bassin avec retenue permanente	36
3.3 Suivi quantitatif des eaux pluviales.....	41
3.3.1 Récupération des données de terrain	41
3.3.2 Modélisation SWMM.....	46
3.2 Suivi qualitatif des eaux pluviales	50
3.2.1 Campagnes d'échantillonnage.....	50
3.2.2 Méthode d'échantillonnage	53
3.2.3 Paramètres physico-chimiques à l'étude.....	56
CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	57
4.1 Caractérisation des pluies échantillonnées	57
4.1.1 Validation des données de précipitation	57
4.1.2 Analyse des pluies échantillonnées	60
4.2 Validation des mesures de débits	64
4.2.1 Fonctionnement et correction des mesures de l'enregistreur de débits	65

4.2.2 Résultats de l'analyse des débits enregistrés	66
4.2.3 Correction des mesures de l'enregistreur et estimation des débits.....	72
4.3 Résultats de la modélisation SWMM	73
4.3.1 Description générale du modèle	73
4.3.2 Validation du modèle SWMM	75
4.4 Résultats du suivi quantitatif des PGOs.....	83
4.4.1 Cellules de biorétention	83
4.4.2 Tranchée drainante, bassin sec et bassin avec retenue permanente	86
4.4.3 Performance en conditions hivernales	88
4.5 Résultat du suivi qualitatif des PGOs.....	89
4.5.1 Caractérisation des eaux de ruissellement	89
4.5.2 Efficacité d'enlèvement des contaminants des PGOs	91
4.6 Évolution de la végétation	103
4.7 Faits divers	105
4.7.1 Sensibilisation des commerçants.....	106
4.7.2 Produits utilisés pour l'entretien	107
4.7.3 Activités d'origine anthropique	107
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	114
RÉFÉRENCES	117
ANNEXES	122
Annexe 1 - Sens de l'écoulement sur l'ensemble du marché public.....	122
Annexe 2 - Description des PGOs non impliquées dans les chaînes	125
Annexe 3 - Implantation des arbres dans les cellules de biorétention	129
Annexe 4 - Correction des mesures de l'enregistreur et estimation des débits.....	131
Annexe 5 - Caractéristiques de la surface du sol	134
Annexe 6 – Critères de conception des PGOs	135
Annexe 7 – Effet tampon des cellules de biorétention	138

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Mesures de gestion durable des eaux pluviales (Boucher, 2010).....	4
Tableau 2 – Valeur médiane des contaminants présents dans les eaux de ruissellement (NSQD, 2004 cité dans MDDELCC, 2012).....	12
Tableau 3 - Qualité des eaux de ruissellement d'études menées au Québec.....	13
Tableau 4 - Norme maximale des déversements des eaux pluviales (CMM,2008).....	14
Tableau 5 - Caractéristiques du bassin sec.....	34
Tableau 6 – Caractéristiques des plantes choisies pour les cellules de biorétention.....	39
Tableau 7 - Propriétés physico-chimiques du substrat Natureausol.....	40
Tableau 8 - Représentation des PGOs du marché public dans SWMM.....	49
Tableau 9 – Résumé des points d'échantillonnage.....	52
Tableau 10 –Méthodes d'échantillonnage.....	53
Tableau 11 – Méthode d'échantillonnage (suite).....	54
Tableau 12 - Caractéristiques des événements de pluie échantillonnée.....	60
Tableau 13 – Paramètres de calibration des BR.....	75
Tableau 14 – Résultats de calibration des BR du 18 août 2017.....	76
Tableau 15 – Résultats de validation des BR du 24 juillet 2017.....	77
Tableau 16 - Effet tampon des cellules de biorétention.....	85
Tableau 17 - Décalage des débits des PGOs étudiées.....	86
Tableau 18 – Résultats de la caractérisation des eaux de ruissellement.....	90
Tableau 19 – Caractérisation des eaux de ruissellement du stationnement arrière et des eaux sortant de la tranchée drainante (TD) et du bassin sec (BS).....	93
Tableau 20 – Caractérisation des eaux de ruissellement du stationnement principal et des eaux sortant des cellules de biorétention (BR) et du bassin avec retenue permanente (BRP).....	94
Tableau 21 – Efficacité d'enlèvement des contaminants (%) de la tranchée drainante (TD), des cellules de biorétention (BR) et du bassin sec (BS).....	95
Tableau 22 - Surface de drainage des PGOs.....	124
Tableau 23 – Caractéristiques de la surface du sol.....	134
Tableau 24 - Critères de conception des cellules de biorétention (Vinci Consultants, 2016)....	135
Tableau 25 - Critères de conception de la tranchée drainante.....	136
Tableau 26 Dimensionnement du bassin sec.....	137
Tableau 27 - Dimensionnement du bassin avec retenue d'eau permanente.....	137
Tableau 28 – Volumes et débits de pointe entrant et sortant des BR.....	138

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Contrôles effectués dans la gestion durable des eaux pluviales.....	3
Figure 2 - Comparaison des débits avant et après développement (MDDELCC, 2012).....	7
Figure 3 - Exemple de déversoir en V (Lucke et al., 2014).....	25
Figure 4 - Localisation du marché public de Longueuil.....	29
Figure 5 - Vue aérienne du marché public de Longueuil.....	29
Figure 6 - Localisation des PGOs du marché public.....	30
Figure 7 - Chaînes de traitement étudiées.....	31
Figure 8 – Zones drainées par les PGOs et sens de l’écoulement.....	32
Figure 9 - Coupe de la tranchée drainante (Vinci Consultants).....	33
Figure 10 – Plan du bassin sec (Vinci Consultants).....	34
Figure 11 - Coupe du bassin avec retenue d’eau permanente (Vinci Consultants).....	35
Figure 12 - Cellules de biorétention.....	37
Figure 13 – Configuration des cellules de biorétention (Vinci Consultants).....	38
Figure 14 - Coupe des cellules de biorétention au niveau des bordures arasées (Vinci Consultants)	39
Figure 15 – Localisation de l’enregistreur de débits et du pluviomètre.....	41
Figure 16 – Points de mesure des débits dans le BRP.....	43
Figure 17 - TDR 100 Appareil de mesure de l’humidité du sol.....	44
Figure 18 - Points d’échantillonnage pour la mesure de l’humidité du sol.....	45
Figure 19 - Bilan de l'eau dans SWMM (adapté de EPA, 2015).....	47
Figure 20 – Modèle conceptuel d’une PGO dans SWMM (cellules de biorétention) (EPA, 2015)	47
Figure 21 - Points d’échantillonnage de la première campagne.....	51
Figure 22 - Points d’échantillonnage de la deuxième campagne.....	52
Figure 23 - Comparaison des précipitations journalières du 1 juillet au 31 juillet 2017.....	58
Figure 24 - Comparaison des précipitations aux 5 minutes du 7 au 8 juillet 2017.....	59
Figure 25 - Comparaison de la période de retour des événements échantillonnés lors des campagnes d’échantillonnage.....	62
Figure 26 - Catégorisation des pluies échantillonnées.....	63
Figure 27 – Principe de base du fonctionnement de l’enregistreur de débit.....	65
Figure 28 – Paramètres du calcul de l’aire d’écoulement.....	66
Figure 29 - Vitesses et débits obtenus par l’enregistreur de débit pour l’événement du 3 septembre 2017.....	67
Figure 30 - Hauteur d’eau mesurée et débit obtenus par l’enregistreur de débit pour l’événement du 3 septembre 2017.....	68
Figure 31 – Mesure de débits pour l’événement du 3 septembre 2017.....	69
Figure 32 - Comparaison des méthodes de calcul de débits.....	70
Figure 33 - Validation des débits sortant des BR.....	71
Figure 34 – Points de mesure de débits.....	72
Figure 35 - Calibration des débits sortant des BR du 18 août 2017.....	76
Figure 36 - Validation des débits sortant des BR du 24 juillet 2017.....	78
Figure 37 - Sortie de la TD (Photo prise le 14 avril 2017).....	80
Figure 38 - Sortie de la TD.....	80
Figure 39 - Sortie du BRP.....	82

Figure 40 - Performance hydraulique des BR pour l'événement du 18 août 2018.....	84
Figure 41 - Photos de la sortie et de la surface des BR en conditions hivernales.....	88
Figure 42 - Conduite de sortie de la TD (droite), du BS (milieu) et exutoire du BRP (gauche) ..	89
Figure 43 - Terrain engorgé d'eau près de la tranchée drainante	97
Figure 44 – Prolifération des algues dans le BRP (photo prise le 27 mai 2016)	99
Figure 45 – Accumulation de sédiments à la surface du BS.....	100
Figure 46 - Évolution des végétaux des BR.....	104
Figure 47 - Évolution des végétaux du BRP.....	105
Figure 48 - Écoulement blanchâtre.....	106
Figure 49 – Fissure dans la chaussée du stationnement arrière	108
Figure 50 - Gauche : Sédiments en bordure de la TD; Droite : Accumulation de la neige à la surface de la NE.....	109
Figure 51 - Sédiments à la surface de la TD.....	109
Figure 52 - Débris accumulés suite à la fonte des eaux navales à la sortie du BS et du BRP.....	110
Figure 53 - Réaménagement de la sortie de la TD et du BS.....	111
Figure 54 - Accumulation de sédiments à l'entrée du bassin sec	112
Figure 55 - Évacuation des eaux d'excavation du site en construction vers le BS.....	113
Figure 56 – Zones drainées par les PGOs et sens de l'écoulement	122
Figure 57 – Coupe des noues engazonnées secondaires NE-2, NE-3 (Vinci Consultants)	125
Figure 58 - Coupe de la tranchée drainante à l'entrée du marché en dehors des bordures arasées (Vinci Consultants).....	126
Figure 59 - Coupe du filtre à sable (Vinci Consultants).....	127
Figure 60 - Schéma du réservoir souterrain et ses installations (Pageau Morel et ass. inc)	128
Figure 61 – Coupe des cellules de biorétention au niveau de l'implantation des gros arbres (Vinci Consultants)	129
Figure 62 – Coupe des cellules de biorétention au niveau de l'implantation des petits arbres (Vinci Consultants)	130
Figure 63 - Hauteurs d'eau mesurées par l'enregistreur lors de l'évènement du 24 juillet 2017.	131
Figure 64 – Calcul de débits à partir des hauteurs d'eau corrigées et des vitesses.....	132
Figure 65 – Débits corrigés selon la règle de proportionnalité.....	133
Figure 66 – Performance hydraulique des BR lors de l'évènement du 13 octobre 2016	138
Figure 67 - Performance hydraulique des BR lors de l'évènement du 16 octobre 2016	139
Figure 68 - Performance hydraulique des BR lors de l'évènement du 25 mai 2017	139
Figure 69 - Performance hydraulique des BR lors de l'évènement du 29 mai 2017	140
Figure 70 - Performance hydraulique des BR lors de l'évènement du 5 juin 2017.....	140
Figure 71 - Performance hydraulique des BR lors de l'évènement du 27 juin 2017.....	141
Figure 72 - Performance hydraulique des BR lors de l'évènement du 24 juillet 2017.....	141

LISTE DES ACRONYMES

BR : Cellules de biorétention

BRP : Bassin avec retenue permanente

BS : Bassin sec

DCO : Demande chimique en oxygène

FS : Filtres à sable

P : Phosphore total

PGOs : Pratiques de gestion optimale

MeS: Matières en suspension

MO : Matières organiques

N : Azote total

NE : Noues engazonnées

RI : Réservoir interne

TD : Tranchée drainante

TDE : Tranchée drainante à l'entrée

REMERCIEMENTS

En premier lieu, je désire remercier mon directeur de recherche Paul Lessard ainsi que ma co-directrice Geneviève Pelletier. Leur soutien, leur patience, leur enthousiasme et leurs mots d'encouragement m'ont motivée à persévérer tout au long des derniers mois malgré les difficultés du projet et les durs moments que j'ai vécus.

J'aimerais aussi remercier nos partenaires Vinci Consultants et le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG) qui ont apporté l'aide financière pour ce projet ainsi que le fond Marthe-et-Rober-Ménard pour la bourse d'étude.

Je souhaite également remercier l'équipe de Vinci Consultants qui m'a fourni l'aide technique et scientifique dont j'avais besoin pour assimiler le projet. Merci à Marie Dugué et Pascale Rouillé pour leur intérêt marqué envers le projet. Merci à Samuel Roy pour ton aide précieuse sur le terrain et Philippe Gatien pour les réponses à l'ensemble de mes questions portant sur la modélisation SWMM.

Tout au long de cette dernière année, j'ai eu la chance de côtoyer des gens qui ont permis de faire avancer rapidement le projet. Sonia Grellier, Émilie Leblanc, Louis-Clément Barbeau et Karine Bilodeau, vous avez été d'une aide précieuse lors des analyses de laboratoire et du traitement de données. Merci également à Michel Bisping et Sey Hana Saing pour avoir répondu à mes nombreuses questions et pour votre support.

Je désire ensuite remercier mes amis proches (Jessica, Sandie, Monica, Christine, Jade, Benoît, Simon-Pierre, Karianne, Philippe et Lynn). Vous avez su me motiver et m'écouter quand j'en ai ressenti le besoin. Grâce à vous, j'ai eu la motivation de poursuivre ma maîtrise jusqu'au bout. Finalement, je ne peux pas passer par-dessus ma famille, mon père, ma mère, ma sœur. Merci de m'avoir encouragée et d'avoir été intéressés par mon projet de recherche.

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Avec le développement résidentiel, commercial et industriel qui s'accélère, les espaces verts sont graduellement remplacés par des surfaces imperméables, ce qui altère l'écoulement de l'eau. Sur une surface naturelle, les eaux de pluie ruissellent, s'infiltrent dans le sol, peuvent être interceptées par la végétation, puis s'évaporent pour se retrouver dans l'atmosphère (MDDELCC, 2012). En rendant les surfaces imperméables, l'évaporation ainsi que l'infiltration sont réduites, ce qui conduit à de plus grandes quantités d'eau qui ruissellent (MDDELCC, 2012). Pour assurer la sécurité des citoyens, la plupart des routes ont été conçues de manière à récupérer rapidement les eaux de ruissellement à l'aide de puisards. Ces eaux s'écoulent par la suite vers le réseau d'égout municipal dont l'exutoire est un cours d'eau récepteur. Cette pratique renvoie à une gestion traditionnelle des eaux pluviales. En temps de pluie, dans certaines villes telles que Montréal et Québec, les eaux de ruissellement peuvent se combiner aux eaux usées, ce qui engendre de plus grands volumes d'eau à traiter. Cela a pour conséquence de surcharger le réseau unitaire et ainsi d'augmenter le nombre de surverses dans le cours d'eau récepteur. De plus grands volumes d'eaux non traitées atteignent donc le milieu naturel et altèrent l'environnement.

Plusieurs effets négatifs ont été répertoriés à la suite de l'augmentation des eaux de ruissellement due à l'imperméabilisation des surfaces. Par exemple, lors d'une pluie de forte intensité, l'apport supplémentaire d'eau peut provoquer l'augmentation de la vitesse de l'écoulement au milieu récepteur, ce qui accentue l'érosion naturelle des berges et modifie la morphologie des cours d'eau (MDDELCC, 2012). À cet effet, des débits de pointe deux à cinq fois supérieurs à ceux précédents l'urbanisation ont été rapportés, ce qui n'est pas négligeable (Schueler 1987, cité dans MDDELCC, 2012). À travers le temps, on a également recensé un nombre plus fréquent d'inondations, mais aussi de plus grande envergure (Schueler 1987, cité dans MDDELCC, 2012); à l'inverse, en raison de la baisse d'infiltration des eaux de précipitation dans le sol, le débit de base de certains cours d'eau en est réduit lors de périodes sèches prolongées (Schueler 1987, cité dans MDDELCC, 2012). Cette altération de l'état naturel des sols n'est donc pas sans conséquence à court et à long termes.

L'urbanisation marquée dans les villes n'a pas seulement un impact sur les volumes d'eaux générés par les surfaces imperméables. La qualité des eaux de précipitation se détériore également une fois qu'elles ruissellent. Avant les années 1980, peu d'études abordaient le sujet de la qualité des eaux de ruissellement, car leur contamination était considérée mineure (MDDELCC, 2012). Toutefois, plusieurs études ont démontré que les eaux, en milieu urbain, entraînent certains contaminants vers le milieu récepteur (MDDELCC, 2012). Ce lessivage altère la qualité de ces milieux, ce qui a un impact sur les habitats des organismes, les ressources biologiques et la santé publique (EPA, 1999). Par ailleurs, selon un rapport du National Water Quality Inventory publié en 1996 (EPA, 1999), les eaux de ruissellement constituent l'une des principales sources de contamination des rivières et des lacs. La gestion des eaux pluviales est donc un enjeu important à considérer afin de conserver l'harmonie entre les activités anthropiques et l'environnement.

Pour contrer la gestion traditionnelle des eaux pluviales couramment utilisée en milieu urbain, une nouvelle approche a été mise de l'avant : la gestion durable des eaux pluviales (Boucher, 2010). Cette gestion se préoccupe non seulement de la quantité des eaux de pluie à évacuer, mais aussi de la qualité des eaux de ruissellement, de l'érosion des milieux récepteurs et de la régénération des nappes souterraines (Boucher, 2010). Cette gestion fait appel au concept de pratiques de gestion optimales (PGOs) définies comme étant des «techniques permettant de minimiser les impacts hydrologiques pouvant être associés au développement urbain» (MDDELCC, 2012). Pour les municipalités, ces pratiques offrent entre autres l'avantage d'améliorer la qualité de l'eau, de réduire les risques d'inondations et de refoulement et de réduire l'effet d'îlots de chaleur urbain (Boucher, 2010). Dans le domaine de l'hydraulique urbaine, ces pratiques sont couramment utilisées dans le but de réduire les volumes d'eaux de ruissellement et les débits de pointe en favorisant l'infiltration, mais aussi pour contrôler la qualité des eaux rejetées (MDDELCC, 2012). L'intégration des PGOs sur le territoire permet donc un contrôle et une gestion intégrée des eaux pluviales.

De manière générale, les PGOs sont regroupées en deux catégories : les techniques non structurales et les techniques structurales (MDDELCC, 2012). La première approche met en valeur le contrôle préventif, en prenant en compte l'aménagement du territoire et la réglementation. La seconde implique l'intégration d'ouvrages de contrôle et de traitement

dans les réseaux de drainage : bassin de rétention, marais artificiel, système avec végétation, système avec infiltration, système de filtration et autres techniques (MDDELCC, 2012). Ces ouvrages sont également appelés «infrastructures vertes». Ce sont des installations qui permettent de faire le pont entre l’environnement bâti et l’environnement naturel et qui permettent également d’effectuer différents types de contrôle : à la source, en réseau et à l’aval (Figure 1) (Boucher, 2010).

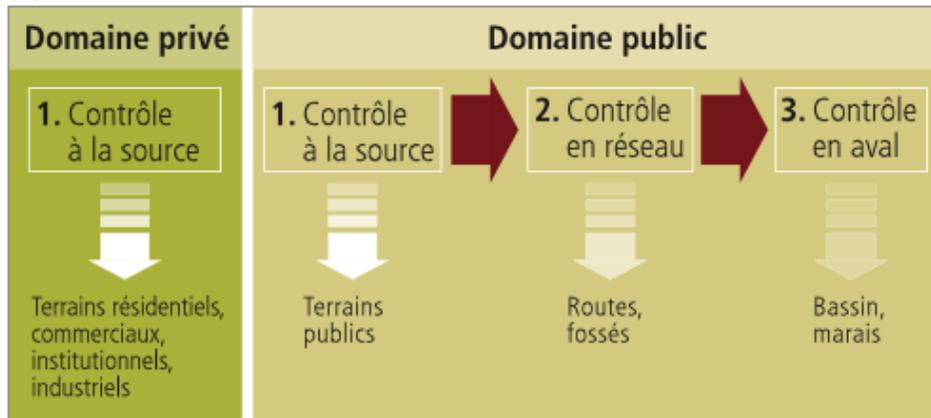


Figure 1 - Contrôles effectués dans la gestion durable des eaux pluviales (tiré de Boucher, 2010)

Le contrôle à la source agit directement sur les eaux de ruissellement générées par les surfaces imperméables. Ces PGOs ont pour objectif de capter les eaux et de favoriser leur infiltration dans le sol. Pour leur part, les contrôles en réseau et en aval s’appliquent pour les eaux qui ne se sont pas infiltrées. Pour faciliter la compréhension, le Tableau 1 présente quelques exemples de PGOs propres à ces trois types de contrôle ainsi que leurs avantages. Ces PGOs seront davantage abordés dans la section 2.2.1 «Présentation des concepts de PGOs».

Tableau 1 - Mesures de gestion durable des eaux pluviales (Boucher, 2010)

Impact	PGOs	Réduction des volumes de ruissellement	Contrôle de la qualité	Contrôle de l'érosion	Recharge de la nappe
Contrôle à la source	Cellule de biorétention	X	X	X	X
	Tranchée drainante		X	X	X
	Pavage perméable	X			X
Contrôle en réseau	Noüe engazonnée	X	X	X	X
Contrôle en aval	Bassin de rétention	X		X	

Pour maximiser la performance, les PGOs peuvent également être aménagées en série, ce qui consiste en un traitement en chaîne. Les eaux de ruissellement passent donc au travers de plusieurs infrastructures avant d'atteindre le milieu récepteur.

Depuis les années 1990, plusieurs recherches ont évalué la performance hydraulique des PGOs ainsi que leur capacité de traitement. Plusieurs organisations américaines se sont regroupées pour rassembler les résultats de plus de 600 études menées aux États-Unis. Ces dernières ciblent, entre autres, les connaissances reliées aux analyses de la performance des PGOs, les outils existants à ce jour pour étudier ces technologies et des guides de suivi (EPA, 1999). Ces études ont majoritairement observé un effet positif quant à l'utilisation de telles infrastructures pour la réduction des volumes de ruissellement et la diminution des contaminants lessivés par les eaux de pluie (EPA, 1999). Ces résultats restent toutefois difficiles à généraliser étant donné que ceux-ci dépendent fortement des événements pluvieux, de l'occupation du territoire et du climat local (Duchesne, 2015). En climat nordique comme au Québec, ce domaine de recherche en est à ses débuts. Quelques études ont porté sur l'efficacité de cellules de biorétention (Dugué, 2010; Geheniau, 2014; MRC Brome-Missisquoi, 2015), d'un bassin de rétention (Carpenter, 2011), d'un toit vert (Geheniau, 2014) ainsi que d'une noue engazonnée (Descôteaux, 2014). Globalement, ces projets de recherche ont noté une amélioration de la qualité des eaux de ruissellement, une

réduction des volumes d'eaux ainsi qu'une diminution des débits de pointe. L'intégration de PGOs offre donc plusieurs avantages pour les municipalités.

Dans la littérature, plusieurs études ont regardé les PGOs individuellement, mais peu ont abordé le concept de traitement en chaîne. Il n'existe donc pas de données dressant le portrait de la performance hydraulique et de traitement de PGOs installées en série. Seules quelques études sont disponibles à travers le monde. Par exemple, sur un campus universitaire au sud de la Chine, une chaîne composée de noues végétalisées, de bandes filtrantes, de cellules de biorétention, de tranchées d'infiltration et d'un marais artificiel a été aménagée en vue d'évaluer sa performance (Jia et al., 2015). En France, des cellules de biorétention récupérant les eaux de ruissellement de bandes filtrantes ont également été évaluées (Flanagan et al., 2017). Finalement, en Caroline du Nord, d'autres cellules de biorétention récupèrent les eaux issues d'un pavé perméable (Brown et al., 2012). Dans l'ensemble, la performance hydraulique était améliorée grâce à l'enchaînement de PGOs. Toutefois, les résultats obtenus lors du suivi qualitatif ont démontré que l'enlèvement de contaminants n'était pas toujours amélioré. Ces études seront davantage détaillées dans le Chapitre 2.s

1.2 Objectifs et hypothèses de recherche

À ce jour, aucun suivi quantitatif et qualitatif de chaînes de traitement n'a été mené au Québec. Les PGOs utilisées seules offrent de bonnes performances en termes de réduction de volume et d'enlèvement de contaminants. Ces performances pourraient être améliorées en introduisant le traitement en série. Suivant ce constat, cette présente recherche a pour objectif d'évaluer globalement la performance de chaînes de traitement aménagées dans un tel climat. Pour ce faire, quatre objectifs spécifiques ont été développés :

1. Développer un protocole d'échantillonnage dans le but d'effectuer un suivi quantitatif et qualitatif des eaux pluviales le long d'une chaîne de traitement;
2. Effectuer le suivi quantitatif et qualitatif des eaux pluviales, des végétaux aménagés sur le site sur 16 mois consécutifs;
3. Estimer l'efficacité épuratoire des PGOs de chaînes de traitement par événement et annuellement; et

4. Proposer des pistes d'amélioration pour la conception, l'implantation, le suivi et l'entretien de telles chaînes.

À la lumière de ces informations, deux hypothèses ont été émises :

1. La chaîne de traitement favorise un meilleur enlèvement de contaminants emportés par les eaux de ruissellement comparativement à une PGO seule; et
2. La réduction des volumes et l'enlèvement de contaminants sont favorisés par l'ajout de PGOs dans la chaîne de traitement.

Pour évaluer la performance de chaînes de traitement sous des conditions climatiques froides, le Chapitre 2 qui suit est consacré à la revue de littérature abordant les concepts importants des eaux de ruissellement et des PGOs. Cette section sera suivie du Chapitre 3 qui est dédié à la méthodologie ayant employée tout au long de ce projet. Par la suite, les résultats de l'étude ainsi que les discussions qui s'en suivent seront présentés au Chapitre 4. Pour finir, le Chapitre 5 fera part des conclusions de cette étude.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de littérature comprend plusieurs volets, soit un sur la qualité des eaux de ruissellement, un sur les pratiques de gestion optimales employées individuellement et en série ainsi qu'une revue sur les méthodes employées pour effectuer un suivi environnemental des infrastructures. Dans cette revue de littérature, beaucoup d'informations sont tirées du Guide de gestion des eaux pluviales du MDDELCC (2012). Cet ouvrage étant un document de référence couramment utilisé au Québec, celui-ci résume donc les différents concepts associés à la gestion des eaux pluviales.

2.1 Effet du développement urbain sur les eaux de ruissellement

2.1.1 Quantité des eaux de ruissellement

Dans les zones urbaines, entre 75 % et 100 % du territoire est couvert par des surfaces imperméables (Federal Interagency Stream Restoration Working Group, 1998, cité dans Boucher, 2010). Ainsi, lors d'une précipitation, les processus d'infiltration sont limités. Les eaux s'accumulent donc à la surface du sol, ruissellent et doivent être dirigées vers les cours d'eau récepteur, notamment pour la sécurité des citoyens. Cette modification de la surface naturelle du sol a plusieurs répercussions. La Figure 2 montre l'effet du développement urbain sur les eaux de ruissellement lors d'une précipitation.

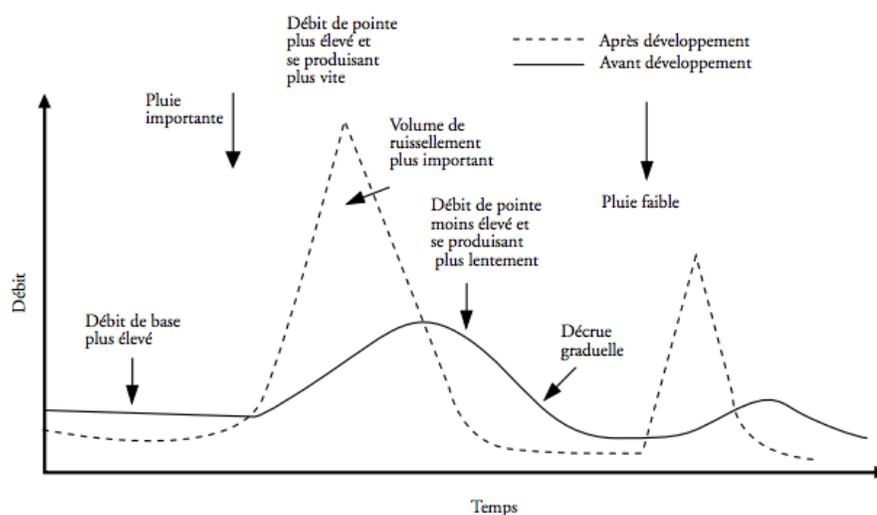


Figure 2 - Comparaison des débits avant et après développement (MDDELCC, 2012)

Que ce soit pour une pluie importante ou une faible pluie, dans les secteurs développés, de grands volumes d'eau sont générés par les surfaces imperméables. Cela a pour conséquence d'observer des débits de pointe plus élevés et atteints plus rapidement contrairement aux secteurs non développés. Cet apport d'eau supplémentaire doit donc être contrôlé pour minimiser les impacts sur l'état des cours d'eau récepteurs.

2.2.2 Qualité des eaux de ruissellement

Paramètres de qualité des eaux

En milieu urbain, plusieurs événements favorisent l'apport de contaminants à la surface des sols : dépôts atmosphériques, déplacement de véhicules, utilisation de produits chimiques, etc. Selon l'énergie de la pluie, ces dépôts peuvent être lessivés, puis entraînés vers le milieu récepteur. En eaux pluviales, les paramètres couramment analysés pour déterminer la qualité des eaux de ruissellement sont les sédiments et matières en suspension, la matière organique, certains nutriments, les microorganismes pathogènes, les huiles et hydrocarbures et les métaux. Les prochaines sections sont donc dédiées à la description de ces paramètres.

Sédiments et matières en suspension

Les sédiments et matières en suspension (MeS) constituent les contaminants les plus communs retrouvés dans les eaux de ruissellement urbain (EPA, 1999). Ceux-ci proviennent notamment de l'érosion de surfaces perméables, du dépôt de particules liées aux activités humaines et/ou du dépôt atmosphérique. Les solides lessivés par l'eau sont catégorisés en trois groupes: les solides dissous, les solides en suspension et les solides sédimentables (Minton, 2005 cité dans MDDELCC, 2012). En milieu urbain, on observe davantage de matières en suspension comparativement aux deux autres catégories (Chocat, 1997). Les MeS représentent également le paramètre le plus important à considérer dans l'évaluation de la qualité de l'eau, car ce contaminant est reconnu pour véhiculer d'autres polluants ayant la capacité de se fixer sur leur surface externe tels que les métaux, la matière organique, le phosphore et les pesticides (Chocat, 1997; Roger et al, 1998 ; EPA, 2011).

Matière organique

La matière organique peut prendre plusieurs formes: microorganismes, matière organique dégradable ou non oxydable (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2016). Pour déterminer la quantité de ces polluants dans les eaux usées et/ou pluviales, des analyses de la demande biochimique en oxygène à 5 jours (DBO5) et de la demande chimique en oxygène (DCO) sont généralement effectuées. Ces deux paramètres ne sont pas des contaminants en soi. Ce sont des mesures permettant de « donner une estimation de la quantité d'oxygène pour dégrader la matière organique présente dans un effluent ou eau usée » (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2016).

L'apport de ces substances dans les eaux de ruissellement induit un risque au niveau de la faune et la flore aquatique. En effet, une teneur élevée dans les eaux de ruissellement entraîne la diminution de la concentration en oxygène dans le cours d'eau récepteur (MDDELCC, 2012).

Métaux

Les métaux sont des constituants naturels de l'environnement. Ceux-ci proviennent notamment de l'altération de la roche mère, de l'érosion de dépôts de surface, des éruptions volcaniques, etc. (Duchemin et Hébert, 2014). À l'état naturel, ils sont généralement trouvés en faible concentration. Toutefois, certaines activités d'origine anthropique génèrent de grandes quantités de métaux, ce qui augmente leurs concentrations dans l'environnement. En trop grande quantité, ils deviennent toxiques (Davis et Birch, 2001). Selon un rapport du *National Urban Runoff Program* des États-Unis (EPA, 1999), les principaux métaux retrouvés dans le ruissellement urbain sont le cuivre, le plomb, le zinc, le chrome, l'arsenic, le cadmium et le nickel.

L'apport de métaux dans l'environnement dépend grandement des caractéristiques du milieu : utilisation des terres, activités industrielles, type de matériaux de construction utilisés, trafic, etc. (Davis et al. 2001). En milieu urbain, les métaux proviennent essentiellement des industries, des matériaux de construction et des automobiles (EPA, 1999; Davis et al., 2001). La structure des bâtiments, les freins d'automobile et la composition des pneus sont des exemples de sources de métaux pouvant se retrouver dans les eaux de ruissellement. Leur quantité accumulée au sol est souvent corrélée avec la densité de

population et l'achalandage des routes (Davis et Birch, 2011). En effet, les automobiles peuvent à la fois entraîner des particules à la surface du sol lors de leur déplacement, mais peuvent également en relâcher suite à l'usure des freins pouvant contenir du fer, du zinc et du plomb (Davis et al., 2001).

Huiles et hydrocarbures

Les huiles et hydrocarbures ne se retrouvent pas à l'état naturel dans l'environnement; ce sont des produits xénobiotiques (Forbes, 1997). Leur persistance et leur toxicité dépendent de la nature de leurs composés (Boudreau, 2015). Dans le milieu récepteur, ces produits altèrent l'apparence du milieu, mais à plus grande quantité peuvent provoquer «la mortalité des organismes exposés, l'augmentation des anomalies de développement, la perturbation des capacités reproductives, le dérèglement des comportements, l'apparition de dommages génétiques et des altérations du système immunitaire » (Boudreau, 2015). Ces produits peuvent également se bioaccumuler et être dangereux pour d'autres êtres vivants tel que l'humain.

Microorganismes

À la surface du sol, des microorganismes peuvent se déposer. Lors de l'analyse de la qualité de l'eau, les microorganismes visés sont principalement les coliformes fécaux et les streptocoques (MDDELCC, 2012). Ceux-ci représentent un indicateur de la présence d'éléments pathogènes et de contamination fécale de l'eau (MDDELCC, 2012). Ces microorganismes proviennent entre autres des déchets humains et/ou d'animaux ou du sol érodé.

Nutriments

En milieu urbain, les nutriments fréquemment retrouvés dans les eaux sont l'azote (N) et le phosphore (P) (EPA,1999). Ces deux paramètres sont des composés présents naturellement dans l'environnement (Hébert et Légaré, 2000). Ceux-ci proviennent principalement des plantes, des animaux et des matières organiques en décomposition et de certaines activités anthropiques (fertilisation des terres, rejet d'eaux usées, etc.). Selon Hébert

et Légaré (2000), aucun critère de toxicité n'a été défini pour ces deux nutriments. Toutefois, une concentration supérieure à 1,0 mg/L d'azote total dans les eaux de surface soulève un problème de surfertilisation. Dans le même ordre d'idée, un apport excessif de phosphore dans les eaux du milieu récepteur favorise la croissance d'algues qui sont les acteurs principaux de l'eutrophisation des cours d'eau. Étant un élément nutritif pour les plantes, de grandes quantités de phosphore peuvent entraîner la prolifération d'algues.

Caractérisation des eaux de ruissellement

La quantité de ces polluants dans les eaux de pluie dépend de plusieurs facteurs, notamment la durée de la période de temps sec entre deux pluies, l'intensité de la pluie, le type d'occupation du territoire, et même la localisation du site. Considérant ces facteurs, différentes valeurs de concentration peuvent donc être observées, ce qui rend difficile la généralisation des résultats. Pour le contrôle de la qualité des eaux de ruissellement, la période de temps sec et l'intensité de la pluie jouent un rôle important. En effet, l'accumulation de polluants à la surface des sols imperméables dépend de la période de temps sec. En ce sens, lorsque l'énergie de la pluie est suffisamment élevée, les contaminants peuvent être plus facilement emportés.

L'un des facteurs les plus importants à prendre en compte est l'occupation du territoire. Quatre types de secteurs sont couramment rapportés dans la littérature : secteur non-développé, résidentiel, commercial ou industriel. Le Tableau 2 dépeint l'état de la qualité des eaux de ruissellement pour différents types de secteurs des États-Unis en rapportant les résultats obtenus d'une analyse des données recueillies entre 1973 et 1983, et ce sur 81 sites.

Tableau 2 – Valeur médiane des contaminants présents dans les eaux de ruissellement (NSQD, 2004 cité dans MDDELCC, 2012)

Polluant	Non développé	Résidentiel	Commercial	Industriel
MES (mg/L)	51	48	43	77
DBO (mg/L)	4,2	9,0	11,9	9,0
DCO (mg/L)	21	55	63	60
Coliformes fécaux (nb/100 mL)	3100	7750	4500	2500
NH3 (mg/L)	0,30	0,31	0,50	0,50
Nitrite – Nitrate (N-NO2 et N-NO3) (mg/L)	0,60	0,60	0,60	0,70
Azote total Kjeldahl (mg/L)	0,60	1,40	1,60	1,40
Phosphore total (mg/L)	0,25	0,30	0,22	0,26
Cd total (µg/L)	0,5	0,5	0,9	2,0
Cu total (µg/L)	5	12	17	22
Pb total (µg/L)	5	12	18	25
Ni total (µg/L)	ND	5	7	16
Zn total (µg/L)	39	73	150	210

ND : Non détecté

Le Tableau 2 montre la grande variabilité des concentrations observées dans les eaux de ruissellement selon le secteur étudié. Il s'avère que les autoroutes représentent le type de secteur où les concentrations des polluants sont les plus élevées, en général, suivi du type de secteur commercial et industriel. Bien que les concentrations des secteurs non développés soient parfois supérieures à celles des autres types de secteurs, ce type d'occupation favorise l'infiltration.

Au Tableau 2, on voit que la qualité des eaux de ruissellement dépend fortement de l'occupation du territoire. Toutefois, la qualité des eaux dépend également de la localisation des sites. À cet effet, le Tableau 3 recense la qualité des eaux de ruissellement d'études ayant eu lieu dans différentes régions soumises aux conditions nordiques comme au Québec. Deux études portent sur les eaux drainées dans un bassin versant et deux autres rapportent la qualité des eaux d'un stationnement.

Tableau 3 - Qualité des eaux de ruissellement d'études menées au Québec

Paramètres	Minimum - Maximum	Moyenne	Référence
MeS (mg/L)	33 - 757	169	Carpenter (2011) ¹
	4 - 160	37,1	Geheniau (2014) ²
	-	7,6	Descôteaux (2014) ³
	32 -1380	-	MRC Brome-Missisquoi (2015) ⁴
P (mg/L)	0,0 - 0,1	0,1	Geheniau (2014)
	-	0,058	Descôteaux (2014)
	0.001-0.057	0.01	MRC Brome-Missisquoi (2015)
N-NH₃ (mg/L)	0,066 - 0,063	0,21	Carpenter (2011)
NTK	0,4 - 2,9	1,3	Geheniau (2014)
	0.07-0.67	0.3	MRC Brome-Missisquoi (2015)
Cu total (mg/L)	<0,02 - 0,06	0,03	Carpenter (2011)
	0,003 - 0,026	0,009	Geheniau (2014)
	2,07 - 32,01	-	MRC Brome-Missisquoi (2015)
Mg total (mg/L)	0,7 - 4,5	2,1	Geheniau (2014)
	0,12 - 0,84	-	MRC Brome-Missisquoi (2015)
Zn (mg/L)	0,02 - 0,15	0,05	Carpenter (2011)
	0,010 - 0,090	0,034	Geheniau (2014)
	0,001 - 0,008	-	MRC Brome-Missisquoi (2015)
Mn total (mg/L)	0,06 - 0,40	0,14	Carpenter (2011)
DCO (mg/L)	7 - 142	57,8	Geheniau (2014)

¹ Eaux de ruissellement provenant d'un quartier résidentiel de Québec

² Eaux de ruissellement du stationnement d'un magasin de Longueuil

³ Eaux de ruissellement d'un bassin versant

⁴ Eaux de ruissellement du stationnement des bureaux administratifs de la MRC Brome-Missisquoi

Le Tableau 3 montre des gammes de concentration qui varient en fonction de la région, mais aussi du type d'occupation du territoire. Cela supporte l'hypothèse que la qualité des eaux de ruissellement dépend de plusieurs facteurs et qu'il est difficile de généraliser les résultats.

Normes de rejet des eaux pluviales

Depuis 2009, l'agglomération de Longueuil a mis en vigueur le règlement 2008-07 sur l'assainissement des eaux du Conseil de la Communauté métropolitaine de Montréal (CMM). Ce « règlement vise la réduction des déversements de contaminants dans les ouvrages d'assainissement afin d'assurer la protection et la pérennité de l'environnement et

des infrastructures d'assainissement » (CMM, 2008). Ce document liste les contaminants à déversement limité et définit les concentrations et les quantités maximales admises lors des surverses des eaux pluviales ou qui atteignent les cours d'eau. Pour les besoins du projet, le Tableau 4 présente la norme établie pour les eaux pluviales des principaux paramètres utilisés pour évaluer la qualité des eaux de ruissellement.

Tableau 4 - Norme maximale des déversements des eaux pluviales (CMM,2008)

Contaminants	Norme maximale
Azote ammoniacal (mg/L)	12 mg/L si $\text{pH} \leq 7,5$; 6 mg/L si $7,5 < \text{pH} \leq 8,0$ 2 mg/L si $8,0 < \text{pH} \leq 8,5$; 0,7 mg/L si $8,5 < \text{pH}$
DCO (mg/L)	60
MeS (mg/L)	30
P total (mg/L)	0,4

2.2 Pratiques de gestion optimales des eaux pluviales (PGOs)

À la section précédente, il a été démontré que la qualité des eaux de ruissellement est altérée en présence d'une surface imperméable. Pour atténuer les conséquences causées par le développement urbain, plusieurs infrastructures peuvent être aménagées dans les municipalités. Les prochaines sections vont aborder ces pratiques en présentant leurs caractéristiques ainsi que leur performance.

2.2.1 Présentation des concepts de PGOs

Pour évaluer la performance de PGOs, il importe de bien comprendre leur conception ainsi que leurs principales fonctions. Les prochaines sections vont d'abord aborder les PGOs présentés au Tableau 1 ainsi que d'autres couramment utilisées.

Cellules de biorétention (BR)

Les BR également appelées « jardins de pluie » constituent une zone végétalisée composée d'un mélange de sol et de plantes propices à la rétention d'eau (MDDELCC, 2012). Ces ouvrages permettent de reproduire les conditions hydrologiques présentes dans la nature en favorisant « l'infiltration, le stockage, la relâche lente des eaux de ruissellement et la recharge de la nappe phréatique » (MDDELCC, 2012). Grâce à des processus physiques,

chimiques et biologiques, ce type de PGOs permet de contrôler et de réduire les contaminants lessivés par les eaux de ruissellement.

Ce type de PGOs est constitué d'au moins deux couches, soit d'une couche végétale et d'un substrat. La couche végétale, constituée de paillis et de plantes, favorise l'enlèvement de contaminants en filtrant l'eau. Pour sa part, le paillis permet de conserver l'humidité du sol, de retarder la pousse de mauvaises herbes et de maintenir la température (Jang et al. 2005), mais favorise également l'enlèvement de certains métaux lourds (cuivre, plomb, zinc) grâce au phénomène de l'adsorption (Jang et al., 2005). De leur côté, les plantes agissent comme un agent de filtration en absorbant les contaminants des eaux de ruissellement (MDDELCC, 2012). Différentes plantes peuvent être utilisées pour favoriser cet enlèvement de contaminants: graminées, roseaux, arbres et pelouse, etc. Pour maximiser l'enlèvement de contaminants, la sélection des plantes est une étape importante dans la conception de cellules de biorétention, car ces dernières doivent répondre à certains critères et être adaptées aux conditions humides et sèches (Read et al. 2009).

Le substrat (ou couche de sol) a pour objectif de fournir l'eau et les nutriments nécessaires à la croissance des plantes. Cette couche permet l'enlèvement de contaminants via la filtration, l'adsorption, l'évapotranspiration par les plantes et grâce à la dégradation biologique (MDDELCC, 2012). En fait, la matière organique du substrat et les plantes sont les principaux acteurs impliqués dans l'enlèvement des nutriments (Glass et Bissouma, 2005).

Lors de la construction des cellules, une troisième couche peut être ajoutée. Celle-ci est constituée d'un matériel drainant permettant l'installation d'une conduite perforée (MDDELCC, 2012). Dans ce cas, les eaux de ruissellement récupérées sont dirigées vers le réseau d'égout pluvial, le milieu récepteur.

Tranchée drainante (TD)

Les TD, également nommées tranchées d'infiltration, sont des dépressions remplies de pierres et de sable formant un réservoir souterrain (MDDELCC, 2012). Lors d'une pluie, l'eau s'infiltré, percole et s'accumule dans ses couches avant d'atteindre une conduite ou la nappe phréatique. Comme l'ensemble des PGOs, les tranchées drainantes sont généralement employées pour réduire les volumes d'eau de ruissellement, mais peuvent également

permettre l'enlèvement de contaminants grâce à des processus physiques tels que filtration et l'adsorption.

Noue engazonnée (NE)

Une NE s'apparente à un fossé de drainage traditionnel de routes, mais avec une largeur de base plus grande, des pentes plus douces et une végétation plus fournie, ce qui permet un meilleur enlèvement des polluants (MDDELCC, 2012). Plusieurs types de noues existent : les noues sèches, les noues avec retenue permanente et les noues avec biorétention (MDDELCC, 2012). Ces technologies sont couramment utilisées pour le transport des eaux pluviales, mais aussi pour diminuer les volumes et vitesses de ruissellement (Stagge et al., 2012; Davis et al., 2012).

Bassin de rétention

Un bassin de rétention constitue une dépression engazonnée ou végétalisée permettant l'accumulation temporaire des eaux de ruissellement (MDDELCC, 2012). Cette PGO est généralement aménagée à la fin d'un réseau (MDDELCC, 2012), car elle permet la rétention et laisse écouler l'eau sur une période plus ou moins longue de sorte à atténuer les débits de pointe générés au cours d'eau.

Il existe plusieurs types de bassin. Les plus communs au Québec sont les bassins secs (BS) et les bassins avec retenue permanente (BRP). La principale distinction entre ces deux ouvrages renvoie au niveau d'eau en temps sec. En l'absence de précipitation, le premier bassin reste sec. Ce type de bassin sert davantage au contrôle des volumes des eaux pluviales qu'au traitement. Un seul processus physique est impliqué dans le traitement des eaux pluviales, soit la décantation. Pour sa part, lors des journées sans pluie, le BRP maintient un niveau d'eau constant. Les processus de traitement des eaux de cet ouvrage sont plus diversifiés : décantation, flottation, sorption au sol, précipitation dans l'eau, transformation par les bactéries et assimilation par les plantes (Minton, 2006 cité dans MDDELCC, 2012).

Baril de pluie

Un moyen efficace pour réduire les eaux de ruissellement provenant des toits est l'utilisation de barils ou de citernes (MDDELCC,2012). Cette technique permet de réduire

les volumes d'eau atteignant le réseau d'égout pluvial de même que les débits de pointe. L'eau s'accumulant dans le réservoir peut être réutilisée pour des usages extérieurs tels que l'entretien des plantes ou pour des usages intérieurs comme l'entretien ménager et l'approvisionnement des toilettes. Il importe toutefois de s'assurer que cette réutilisation soit suffisamment encadrée pour éviter la contamination de l'eau potable (MDDELCC, 2012).

Toit vert (TV)

Une autre solution pour réduire les eaux de ruissellement provenant de la toiture des bâtiments est l'emploi de TV. Cette technologie représente un espace vert créé par différentes couches de substrat permettant la croissance de plantes sur le toit d'un bâtiment (MDDELCC, 2012). Cette technologie offre plusieurs avantages, notamment la « réduction et le retardement dans le temps du ruissellement, l'amélioration de la qualité de l'eau due à la filtration par les plantes et le sol, et même l'amélioration de la qualité de l'air en réduisant le CO₂ » (MDDELCC, 2012).

Pavé perméable (PP)

Le PP est un revêtement composé de blocs extérieurs et d'une couche de matériaux granulaires (MDDELCC, 2012). Ce recouvrement est dit poreux, car il favorise l'infiltration des eaux de ruissellement par le biais d'interstices. Au lieu de ruisseler, les eaux de précipitation percolent dans le sol et contribuent à la recharge de l'aquifère du sol lorsqu'un système de drainage n'est pas mis en place.

2.2.2 Performance des PGOs employées seules

L'efficacité des PGOs a été mise à l'épreuve à maintes reprises. Les paramètres couramment utilisés pour définir leur performance sont : la réduction des volumes de ruissellement, la réduction et le décalage des débits de pointe et l'enlèvement de contaminants. Pour les besoins du projet, les sections ci-dessous font part uniquement des études ayant étudié le comportement des cellules de biorétention, des tranchées drainantes, des noues engazonnées, des bassins de rétention, des toits verts ainsi que du pavé perméable.

Cellules de biorétention

Pour faire valoir l'utilisation des PGOs comparativement aux techniques traditionnelles de drainage, Dugué (2010) a réalisé une analyse économique lors de la conception de BR aménagées dans le stationnement du magasin MEC situé à Longueuil. L'objectif de ce projet consistait à comparer les coûts de conception de techniques de drainage conventionnel avec les coûts de conception des BR. Les résultats obtenus ont montré que le coût de construction pour le drainage conventionnel s'élève à 70 676 \$ comparativement à 26 313 \$, ce qui est une économie de 44 363 \$. Il a donc été démontré que les BR sont une bonne alternative pour réduire les coûts de construction. Lors de cette étude, aucun protocole de suivi expérimental n'a été formellement mis en place sur le terrain. C'est pourquoi Geheniau (2014) a repris les travaux de Dugué (2010) pour approfondir le sujet. Son projet de recherche avait pour objectif de mettre en application les recommandations du suivi expérimental de Dugué (2010). Ainsi, de décembre 2012 à février 2014, des données de précipitation, de débits et de qualité d'eau ont été récupérées sur ce même site. À partir des données de précipitation mesurées sur le terrain, l'estimation des débits entrant dans les PGOs a été effectuée à l'aide de deux méthodes, la méthode rationnelle et la méthode du *Soil Conservation Service Curve Number* (SCS-CN). La performance hydraulique a été déterminée à partir du pourcentage de réduction des volumes. Les résultats ont démontré une efficacité moyenne de réduction des volumes de 81 % l'été et une rétention de 75 % en hiver. Ces résultats sont légèrement inférieurs à ceux obtenus par Debusk et Wynn (2011) lors d'un suivi expérimental d'une aire de stationnement en Virginie. En fait, suite à l'échantillonnage de 28 pluies, ces derniers ont obtenu une réduction moyenne des volumes de 97 %. Ces auteurs ont également évalué l'effet de BR sur les débits de pointe. Ils ont noté une réduction de 99%. Ces deux études n'étant pas situées dans le même climat, il est normal de voir des divergences.

Pour documenter davantage l'impact des PGOs, la MRC Brome-Missisquoi (2015) a également effectué un suivi expérimental sur trois BR aménagées dans le stationnement de ses bureaux administratifs à Cowansville. Ces PGOs ont été mises en place pour drainer, traiter et rediriger les eaux de ruissellement d'une surface imperméable de 0,3 ha. Pour déterminer la performance hydraulique des BR, des mesures de précipitation ont été prises

sur le terrain et ont été intégrées dans un modèle pour effectuer le suivi en continu des eaux de pluie sur une période de près de 2 ans. Les débits entrant et sortant dans les cellules ont été obtenus par modélisation, car aucune mesure n'a été recueillie. Le modèle n'a donc pas été calé sur des mesures de terrain. Les résultats de la simulation ont démontré que la conception des cellules de biorétention permet la rétention et l'infiltration des eaux de ruissellement. Cette étude n'a toutefois pas pris en considération la réduction des volumes et des débits de pointe.

Selon plusieurs études, l'emploi des BR permet également l'enlèvement de contaminants, notamment les MeS, N, P ainsi que plusieurs métaux lourds (Bratières et al., 2008; Glass et Bissouma, 2005; David, 2014). Pour déterminer l'efficacité des BR, Geheniau (2014) a récolté manuellement des échantillons d'eau provenant de deux piézomètres situés à l'amont et à l'aval des BR. Les paramètres étudiés étaient les MeS, P total, TKN, DBO₅, DCO et quelques hydrocarbures. Cet auteur a rapporté une baisse de MeS de près de 75 %, mais aussi un relargage de P total (-65,3 %) et de plusieurs métaux lourds [Cu (-14,1%), Ni (-123,5%), Mg (-114,2%)]. Le relargage de P a également été observé par Hatt et al. (2007) lors de l'application d'une pluie synthétique sur des colonnes reproduisant le comportement de BR. Pour sa part, la MRC Brome-Missisquoi (2015) a obtenu des résultats semblables à ceux de Geheniau (2014) en ce qui concerne l'enlèvement des MeS. Dans leur étude, les BR ont permis d'enlever environ 87 % des MeS présentes dans les eaux de ruissellement. Toutefois, aucun relargage de P n'a été observé. En fait, une diminution de 74 % a été rapportée. Les BR ont cependant tendance à relarguer certains métaux provenant du substrat comme dans l'étude de Geheniau (2014).

Tranchée drainante

À ce jour, peu d'études se sont intéressées à la tranchée drainante, notamment en ce qui concerne de la performance hydraulique et l'efficacité épuratoire. Toutefois, Reddy et al. (2014) ont étudié l'effet de différents matériaux sur l'enlèvement des métaux. Ils ont démontré que le sable est propice à l'enlèvement des métaux lourds, mais que la calcite, la zéolite ainsi que des copeaux de fer offrent un meilleur taux d'enlèvement. Ces auteurs ont également conclu qu'un mélange de matériaux filtrants peut favoriser l'enlèvement de plusieurs métaux en même temps.

En 2015, le Toronto and Region Conservation (2015) a mené une étude ayant pour objectif d'évaluer la performance d'une TD aménagée dans un stationnement situé à Vaughan en Ontario. Ce groupe a mis en place un programme de mesure des précipitations, des débits ainsi que de la qualité des eaux de la TD. En estimant les débits entrant dans la tranchée à partir de mesures réalisées sur un site à proximité et en effectuant des mesures de débits à la sortie de l'installation, ce groupe a démontré que la TD permet, en moyenne, de réduire les volumes de 78 %. Ce même projet a également démontré l'efficacité de la TD à retarder et à atténuer les débits de pointe. Parallèlement, des échantillons d'eau ont été prélevés à l'entrée et à la sortie de la PGO pour mesurer, entre autres, les MeS, P, N et certains métaux. Cette étude a obtenu des taux favorables à l'enlèvement des contaminants, soit une réduction de 98 %, 93 % et de 60 % respectivement pour les MeS, P et N. Une réduction des métaux variant de 11 % à 93 % a également été obtenue. Ce projet constitue la seule étude de référence concernant l'évaluation de la performance des tranchées drainantes au Canada. Toutefois, cette étude montre des résultats favorables à l'utilisation de TD pour réduire les volumes et les contaminants.

Noue engazonnée

Comme mentionné dans la section précédente, les noues engazonnées sont principalement utilisées pour la rétention des eaux de ruissellement. À cet effet, Lucke et al. (2014) ont suivi le comportement de quatre noues engazonnées qui récupèrent les eaux d'un stationnement d'un campus universitaire. Pour ce faire, un réservoir rempli d'eau a été utilisé pour simuler différents types de pluie et mesurer les débits de l'écoulement des eaux des NE à l'aide d'un déversoir en V. Les résultats obtenus lors de l'étude de ces quatre noues ont démontré une réduction moyenne du débit de 52 %. Ainsi, lorsque l'espace est restreint, l'emploi d'une NE reste une alternative intéressante pour ralentir l'écoulement des eaux de ruissellement.

Quelques études ont également montré que les noues engazonnées favorisent l'enlèvement des MeS, de même que celui des nutriments et les métaux (Stagge et al., 2006; Winston et al., 2011). Parmi ces études, Stagge et al. (2006) ont démontré des taux d'enlèvement variant entre 65 % et 71 % pour les MeS et entre 30 % et 60 % pour les métaux

lors de l'étude d'une NE récupérant les eaux d'une autoroute. Pour obtenir ces résultats, ces auteurs ont récupéré des échantillons d'eau lors de 18 précipitations. Lucke et al. (2014) ont rapporté des taux d'enlèvement semblables en ce qui a trait aux MeS. Leurs résultats variaient entre une réduction de 50 % et 80 % lors de l'application d'une pluie synthétique dont les concentrations en MeS, N et P simulaient la qualité des eaux de ruissellement du milieu. Selon cette étude, ces noues ont également permis de réduire de 20 à 23 % le phosphore.

Par contre, Descôteaux (2014) a obtenu des résultats légèrement inférieurs à ceux de Lucke et al. (2014) lors du suivi de la qualité des eaux d'une NE qui récupère les eaux d'un bassin versant de 256 ha situé dans la région de Québec. Pour déterminer la performance de cette PGO, des échantillons des eaux entrant et sortant de la noue ont été prélevés en temps sec et en temps de pluie pour évaluer les MeS et P. En temps de pluie, Descôteaux (2014) a obtenu des taux d'enlèvement variant entre 25 % et 33 % pour les MeS et entre 0% et 37 % pour le P. En temps sec, la noue permet également la réduction des MeS avec une moyenne de 30 %, mais a tendance à relarguer du P, avec un taux moyen de -38 %. Bien que ce type de PGO soit principalement utilisé pour réduire les volumes et les débits, ces études ont démontré son efficacité à réduire les contaminants présents dans les eaux de ruissellement.

Bassin de rétention

Dans la littérature, la performance hydraulique des bassins de rétention a peu été évaluée, c'est plutôt l'efficacité épuratoire qui constitue le critère prépondérant pour évaluer les performances de ce type de PGOs. Carpenter (2010) s'est intéressé au phénomène d'enlèvement des contaminants d'un bassin d'orage drainant les eaux de ruissellement d'un quartier résidentiel de 15,1 ha situé dans la ville de Québec. Son projet consistait à caractériser les eaux de ruissellement à l'entrée et à la sortie du bassin en analysant notamment les MeS, les matières volatiles en suspension (MVeS) ainsi que certains métaux lourds. Les résultats ont démontré un taux moyen d'enlèvement des MeS de 56 %, de 20 % pour le zinc et de 10% pour N. Au cours de ce même projet, l'exutoire a été reconfiguré pour augmenter le temps de rétention de ce même bassin. Cette modification a permis d'améliorer l'efficacité d'enlèvement des contaminants. Des efficacités moyennes de 82 %, 42 % et 84 % ont respectivement été trouvées pour les MeS, le zinc et N. Les résultats obtenus pour les MeS sont légèrement inférieurs à ceux obtenus par Middleton et Barret (2008) suite à la

reconfiguration de la sortie d'un bassin d'orage également aménagé dans un quartier résidentiel. L'analyse de la qualité des eaux de ruissellement prélevées au cours d'une pluie a démontré une réduction de 91 % des MeS.

Toit vert

Plusieurs études ont démontré l'efficacité des toits verts à retenir les eaux de pluie (Liu et Minor, 2005; Getter et al., 2007). Spolek (2008) a étudié un toit vert situé sur un bâtiment du centre-ville de Portland. Le climat de cette région est caractérisé par des précipitations modérées en hiver et de faibles pluies en été. Il s'est avéré qu'en été, le toit vert a permis une réduction des volumes entre 7% et 85 %, avec une moyenne de 42 %. En conditions hivernales, la moyenne obtenue a été de 12 %. Dans le même ordre d'idée, Liu et Minor (2005) ont également observé que les toits verts permettaient un décalage de 20 à 40 minutes des débits de pointe. Ainsi, lorsque l'espace est restreint pour l'aménagement de PGOs, le toit vert peut être une bonne alternative pour limiter le rejet des eaux de ruissellement vers le réseau municipal.

En ce qui a trait à l'efficacité épuratoire des toits verts, ce critère de performance est peu abordé dans la littérature, puisque les eaux ne ruissellent pas à la surface du sol. Ainsi sa qualité n'est pas altérée par le lessivage de contaminants.

Pavé perméable

Depuis quelques années, la performance du pavé perméable a été évaluée à plusieurs reprises. Plusieurs études ont démontré l'efficacité de cette technologie à limiter les impacts des eaux de ruissellement notamment en réduisant les débits de pointe et les volumes de ruissellement (Vaillancourt, 2017; Brattebo & Booth, 2003; Page et al. 2015; Collins et al., 2008). Par exemple, Fassman et Blackourn (2010) ont observé, lors de l'analyse d'une section de PP d'une rue, une réduction des débits de pointe variant entre 20 % et 82 % par rapport à ceux d'une surface asphaltée située à proximité. Au cours de leur étude, ces auteurs ont également observé une corrélation positive entre la durée de la période de temps sec précédent l'événement et le décalage des débits. Vaillancourt (2017) s'est également intéressée l'efficacité de ce type de PGO, en climat froid. Cette étude avait pour objectif d'évaluer l'effet de l'implantation de sites de PP sur un bassin versant urbanisé. Pour ce faire,

Vaillancourt (2017) a mené des tests d'infiltration sur différents sites où du PP a été implanté. L'analyse des données a démontré que la capacité d'infiltration du PP n'est pas influencée par les températures froides de l'hiver. Les résultats obtenus ont également démontré une diminution du volume ruisselé, et un décalage des débits.

Dans la littérature, ce type de PGOs est principalement utilisé pour diminuer les volumes et les débits de pointe. Toutefois, Brattebo et Booth (2003) ont démontré que le PP peut également être utilisé pour le traitement des eaux. Dans cette étude, des échantillons composites des eaux de ruissellement et des eaux infiltrées ont été récupérés pour évaluer les concentrations de cuivre, de zinc et d'huiles de moteur. Selon les résultats obtenus, le PP permet de réduire les concentrations des polluants (zinc, cuivre et huile) en dessous du seuil admissible de toxicité.

2.2.3 Performance des PGOs installées en série

Dans la section précédente, il a été démontré que les PGOs favorisent la réduction des volumes et des débits de ruissellement, mais aussi l'enlèvement des contaminants lessivés. En revanche, l'effet de PGOs installées en série n'a pas été beaucoup étudié. À cet effet, Jia et al. (2015) ont développé une chaîne de traitement permettant le contrôle des eaux de ruissellement d'un campus universitaire situé en Chine. Cette chaîne est composée de trois noues engazonnées, d'une cellule de biorétention et de deux puits d'infiltration. Ces chercheurs ont effectué un suivi quantitatif des noues engazonnées et de la cellule de biorétention. Ces derniers ont observé une réduction moyenne des volumes de ruissellement de 62 % (80 % pour les cellules et 36 % pour les noues) ainsi qu'une diminution de 66 % du débit de pointe (80 % pour les cellules et 44 % pour les noues). Brown et al. (2012) ont obtenu des résultats similaires lors de l'étude d'une chaîne de traitement impliquant du pavé perméable et des cellules de biorétention. Ils ont trouvé que l'aménagement de la chaîne permet une réduction de 69 % des volumes de ruissellement, ce qui représente un gain de rétention de 10 % comparativement à l'utilisation seule de cellules.

Dans leurs travaux, Jia et al. (2015) ont également mis en place un suivi de la qualité des eaux de pluie. Pour ce faire, ces derniers ont récupéré les eaux de ruissellement entrant

dans l'une des NE de la chaîne ainsi que les eaux sortant de la BR pour évaluer la DCO, N, P et les MeS. De manière générale, la chaîne favorise l'enlèvement de contaminants. Plus précisément, des diminutions de la DCO, N, P et des Mes de 19%, 74 %, 95% et de 35 % ont été respectivement obtenus. Cette étude ne relate toutefois pas l'effet de chacune des PGOs dans la chaîne de traitement. De surcroît, lors de l'étude d'un bassin et d'une noue, Bastien et al. (2010) ont même noté une amélioration de l'enlèvement des MeS passant de 65 % à 95 %.

2.3 Suivi du comportement hydraulique et de l'efficacité épuratoire des PGOs

2.3.1 Suivi quantitatif

Instrumentation

Dans la littérature, les suivis hydrauliques des PGOs ont été effectués de plusieurs manières. Certains projets reproduisent les caractéristiques des PGOs en laboratoire et les soumettent à différentes conditions (Hatt et al., 2007; Jang et al. 2005). D'autres ont opté pour un suivi expérimental d'une infrastructure conçue pour récupérer les eaux de ruissellement (Geheniau, 2014; MRC Brome-Missisquoi, 2015; Descôteaux, 2014). Pour les besoins du projet, cette section va aborder uniquement les suivis expérimentaux.

Comme mentionné précédemment, la performance hydraulique des PGOs est évaluée principalement en fonction de la réduction des volumes et des débits. Pour ce faire, des mesures de précipitations et de débits ont couramment été prises. Les méthodes employées dans les études pour estimer les débits varient selon le type de PGOs, mais aussi selon la configuration des lieux. Un enregistreur de débits est couramment utilisé pour le suivi (Carpenter, 2010; Geheniau, 2014). Cet appareil est souvent installé à l'amont des PGOs pour mesurer les débits entrant dans les infrastructures ou à l'aval des PGOs en présence d'écoulement en conduites (Vaillancourt, 2017). Un déversoir en V jumelé avec un capteur bulle à bulle pour mesurer le niveau d'eau est également utilisé dans certains projets (Lucke et al., 2014; Davis et al., 2012; Stagge et al., 2006; Hunt et al. 2008). La Figure 3 montre un exemple.



Figure 3 - Exemple de déversoir en V (Lucke et al., 2014)

Cet appareil est principalement utilisé pour mesurer les débits des PGOs dont l'infiltration n'est pas l'objectif principal. Pour estimer les débits, certains chercheurs optent également pour l'utilisation de modèles. Quelques études de ce type sont présentées à la prochaine section.

Modélisation

Depuis plusieurs années, divers chercheurs ont tenté de démystifier le comportement hydraulique de différentes PGOs en utilisant des modèles. À cet effet, des chercheurs turcs ont construit une technologie appelée *Rainfall-Watershed-Bioretenion* permettant de reproduire le drainage d'un bassin versant de 40 m² soumis à des pluies synthétiques d'intensité variable (Gülbaz & Kazezyılmaz-Alhan, 2017a). Une fois drainées, les eaux s'écoulent dans une conduite connectée à quatre colonnes qui reproduisent les caractéristiques de cellules de biorétention. L'objectif visé de cette étude consistait à développer un modèle hydrologique (HM-RWB) basé sur le modèle des ondes cinématiques (relation précipitation-ruissellement) et la méthode d'infiltration modifiée de Green-Ampt. Ce sont deux méthodes couramment employées pour faire la conversion des précipitations en ruissellement et reproduire le comportement d'infiltration des eaux dans le sol. Plusieurs essais en laboratoire ont été menés pour obtenir des mesures de débits à l'entrée et à la sortie des colonnes et ainsi pouvoir les comparer à ceux estimés par le modèle. Pour ce faire, le système a été soumis à quatre intensités de pluie différentes (16 mm/h, 23 mm/h, 27,5 mm/h, 34 mm/h) dont la durée variait entre 15 min et 30 min. Les résultats du modèle ont été comparés aux données expérimentales en tenant compte des débits de pointe à l'entrée et à la sortie des colonnes. Des erreurs absolues de moins de 3 % et des coefficients de détermination de plus de 0,9 ont été obtenus lors de l'analyse des débits entrant alors que

pour les débits sortant des colonnes, les erreurs absolues sont plus grandes, mais restent inférieures à 10 %. De plus, les coefficients de détermination sont, dans l'ensemble, supérieurs à 0,8. Ces résultats démontrent que la combinaison de ces deux modèles permet de prédire le comportement hydraulique des cellules de biorétention.

Dans une étude subséquente, ces mêmes auteurs ont utilisé leurs données expérimentales pour évaluer la performance du logiciel SWMM à modéliser le comportement hydrologique des cellules de biorétention (Gülbaz & Kazezyılmaz-Alhan, 2017b). Il en ressort que ce SWMM reproduit, de manière générale, le comportement de l'écoulement des colonnes de biorétention, mais que les débits de pointe sont sous-estimés contrairement au modèle HB-RWB qui arrive à les reproduire. Cela se répercute notamment sur les erreurs absolues et les coefficients de détermination qui sont moins favorables. Cette étude a tout de même conclu que SWMM peut être un outil intéressant pour modéliser les PGOs, mais que certaines améliorations doivent y être apportées.

Flanagan et al. (2017) font part des mêmes conclusions en étudiant, à l'aide du modèle SWMM, le comportement hydraulique d'une chaîne de traitement située en bordure d'une autoroute. Ces auteurs ont rapporté que SMWW est un outil utile pour prédire globalement le comportement hydrologique de PGOs, mais que certaines caractéristiques propres aux PGOs, telle que la conductivité hydraulique, doivent être connues pour reproduire adéquatement ce comportement.

2.3.2 Suivi qualitatif

Dans la littérature, le suivi qualitatif des PGOs est principalement réalisé à partir de campagnes d'échantillonnage permettant la récupération d'échantillons des eaux de ruissellement à l'entrée et à la sortie des PGOs d'un site à l'étude (Carpenter, 2010; Geheniau, 2014; Winston et al. 2011).

Pour récolter l'eau, certaines études ont utilisé un échantillonneur automatique (Jia et al., 2015; Hunt et al. 2008). Cet appareil offre l'avantage de récupérer des échantillons d'eau sans devoir se déplacer sur le terrain au moment d'une pluie. Celui-ci peut être programmé

pour débiter l'échantillonnage lorsque certains critères sont respectés, comme l'atteinte d'une hauteur d'eau mesurée de 10 mm.

Autrement, un échantillonnage manuel peut être effectué sur le terrain. Ce type d'échantillonnage a été réalisé dans des études précédente, en temps sec et en temps de pluie (Jia et al. 2015; David et al., 2014; Geheniau, 2014; Carpenter, 2010) ou suivant l'application d'une pluie synthétique à laquelle certains polluants ont été ajoutés pour simuler la contamination des eaux de ruissellement (Nichols & Lucke, 2016; Reddy et al., 2014; Davis et al. 2006).

Que ce soit avec un échantillonneur automatique ou à la main, deux types d'échantillons sont prélevés: des échantillons ponctuels (discrets) et/ou composites (Carpenter, 2010). Ces derniers sont obtenus en récupérant une certaine quantité d'eau selon un pas de temps prédéterminé. La méthode employée pour récupérer les échantillons varie selon l'étude. Par exemple, certaines études fixent un intervalle de temps indépendant de l'intensité et de la durée de la précipitation (Jia et al. 2016) alors que pour d'autres, cet intervalle varie en fonction de la pluie échantillonnée (Carpenter, 2010; Glass & Bissouma, 2005).

Également, pour étudier le comportement des PGOs, certaines études ont opté pour des essais en laboratoire (Freni et al., 2009; Bratieres et al. 2008; Davis et al., 2006). Un modèle réduit est alors construit selon les caractéristiques de chacune des PGOs. Ces essais permettent entre autres d'évaluer l'effet des matériaux composant les PGOs sur l'enlèvement de certains contaminants (Bratieres et al., 2008).

Une fois récupérés, les échantillons sont envoyés au laboratoire pour déterminer les concentrations des polluants. La sélection des contaminants pour évaluer l'efficacité d'enlèvement varie selon l'étude. Toutefois, les contaminants présentés dans la « Caractérisation des eaux de ruissellement » de la section 2.2.2 sont les plus fréquents.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

La méthodologie permettant de répondre aux objectifs de ce projet de recherche est abordée dans cette section. Cette dernière comprend la description du site à l'étude ainsi que les notions entourant le suivi quantitatif et qualitatif des eaux pluviales. La prochaine section est dédiée à la description de l'aménagement extérieur du marché public de Longueuil. Cette description est basée sur les plans de conception de la firme de génie Vinci Consultants. Aucun plan tel que construit n'a été réalisé depuis la construction du marché public de Longueuil en 2014. Ainsi, quelques différences entre les valeurs présentées et celles du terrain peuvent exister.

3.1 Description générale du site à l'étude : marché public de Longueuil

Pour déterminer l'efficacité épuratoire de chaînes de traitement, le site à l'étude est le marché public de Longueuil. Ce marché appartient à la ville de Longueuil, mais est géré par l'association des producteurs maraîchers du Québec qui a collaboré au projet. Celui-ci est situé au 4200 chemin de la Savane dans l'arrondissement de Longueuil à proximité de l'hôtel de ville de Longueuil. La Figure 4 indique la localisation du marché et la Figure 5 montre une vue aérienne.

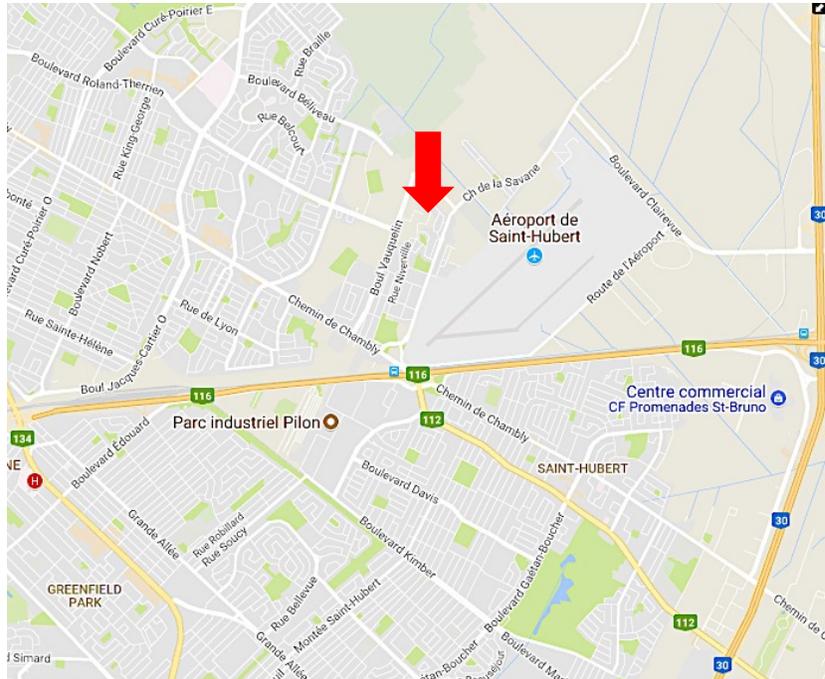


Figure 4 - Localisation du marché public de Longueuil

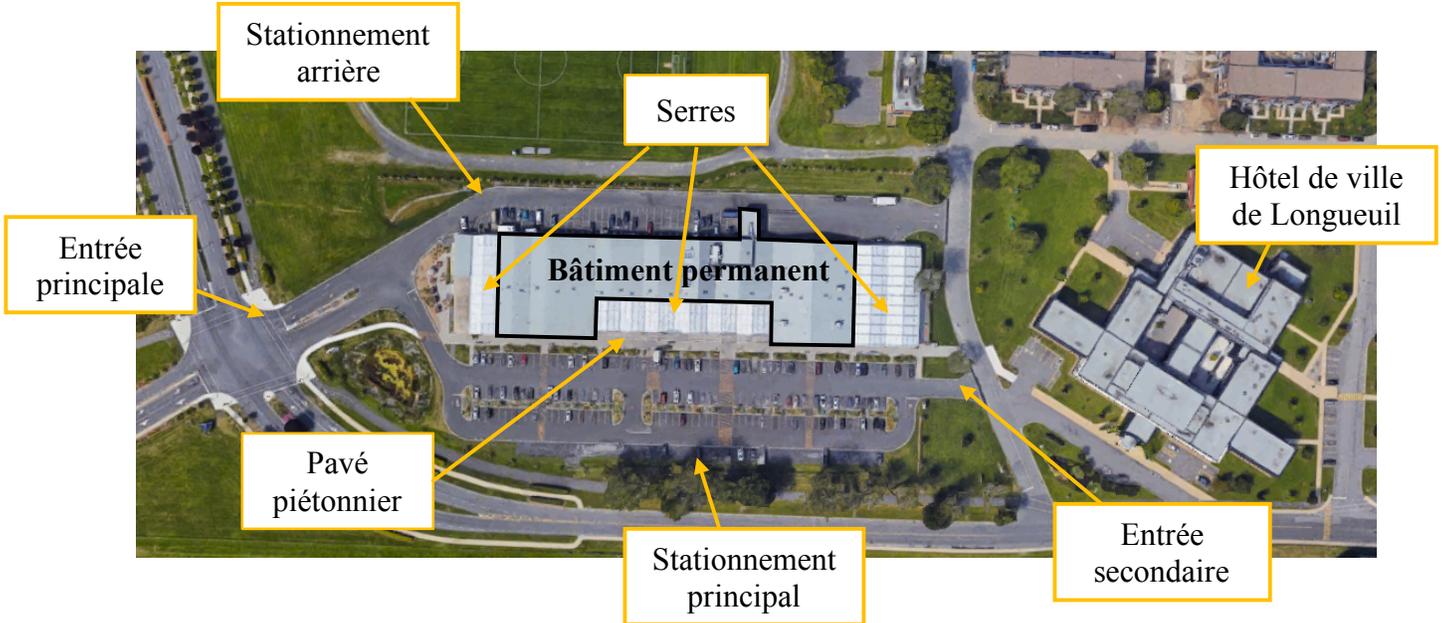
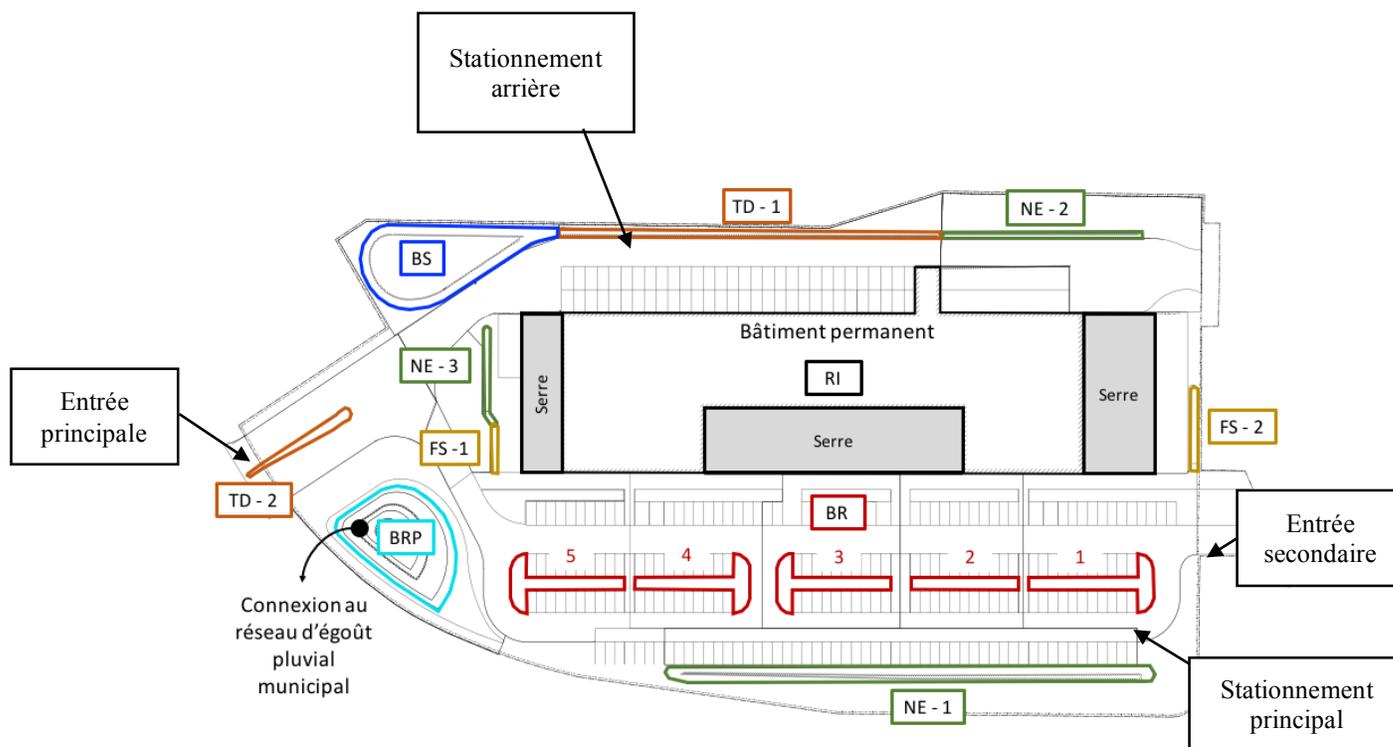


Figure 5 - Vue aérienne du marché public de Longueuil

La superficie totale du marché public est d'environ 2,47 ha. Sur ce site se trouvent un bâtiment permanent ainsi que trois serres avec toiture rétractable. Dans les serres, des

commerces saisonniers prennent place vendant fruits, légumes et fleurs selon le temps de l'année. Dans l'optique d'une gestion durable des eaux pluviales, le terrain a été construit de manière à récupérer et, selon le cas, traiter les eaux de ruissellement grâce à différentes PGOs : noues engazonnées, filtres à sable, cellules de biorétention, tranchées drainantes, bassin sec, bassin avec retenue permanente et réservoir interne (Figure 6).



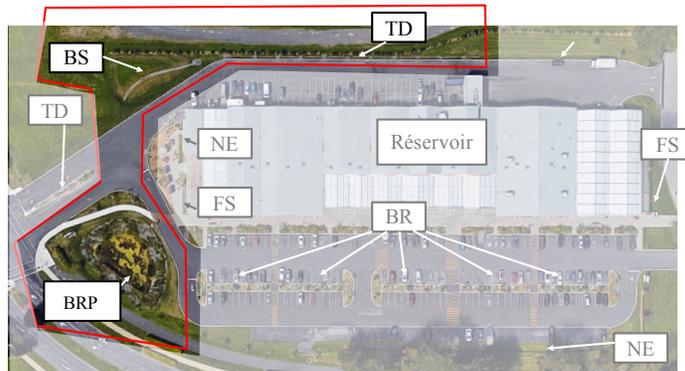
- | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|---|
| TD : Tranchée drainante | BS : Bassin sec | BRP : Bassin avec retenue permanente |
| BR : Cellule de biorétention | NE : Noue engazonnée | FS : Filtre à sable |
| RI : Réservoir interne | | |

Figure 6 - Localisation des PGOs du marché public

Les différentes PGOs aménagées au marché public sont réparties de part et d'autre du bâtiment permanent. En fait, l'aménagement extérieur du marché a été conçu de manière à pouvoir enchaîner consécutivement plusieurs PGOs. Les eaux de pluie passent donc par au moins deux PGOs avant d'atteindre le réseau d'égout pluvial municipal.

Plusieurs chaînes de traitement ont été aménagées sur le terrain du marché public. Pour répondre aux objectifs du projet de recherche, deux chaînes ont été choisies : 1- la chaîne composée de la TD-1 et du BS et du BRP et 2- la chaîne constituée des BR et du BRP (Figure 7)

a) Chaîne de traitement TD-BS-BRP



b) Chaîne de traitement BR-BRP

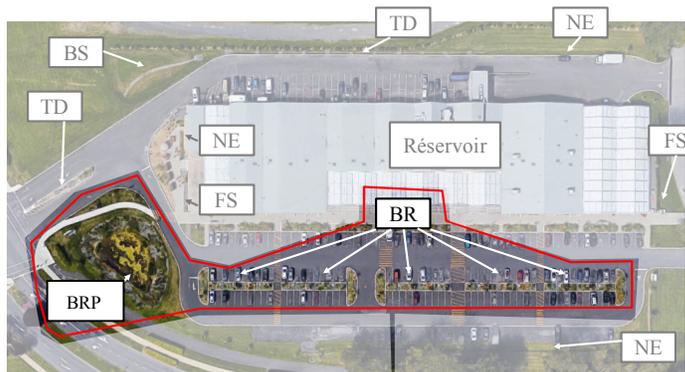


Figure 7 - Chaînes de traitement étudiées

Deux critères ont orienté la sélection de ces chaînes. Dans un premier temps, la série devait inclure au moins une PGO qui favorise l'enlèvement de contaminants, ce qui justifie la sélection de la TD à l'arrière, des BR à l'avant et du BRP comme exutoire. La chaîne de traitement devait également avoir une surface drainante suffisamment grande pour permettre la prise de mesure (Figure 8). Suivant ces critères, la première chaîne est constituée de la TD-1, du BS et du BRP, alors que la deuxième est composée des BR et du BRP. Pour les besoins du projet, seule la description de ces deux chaînes de traitement va être présentée. Pour la description de l'écoulement sur l'ensemble du marché public et des autres PGOs, se référer respectivement aux Annexes 1 et 2.

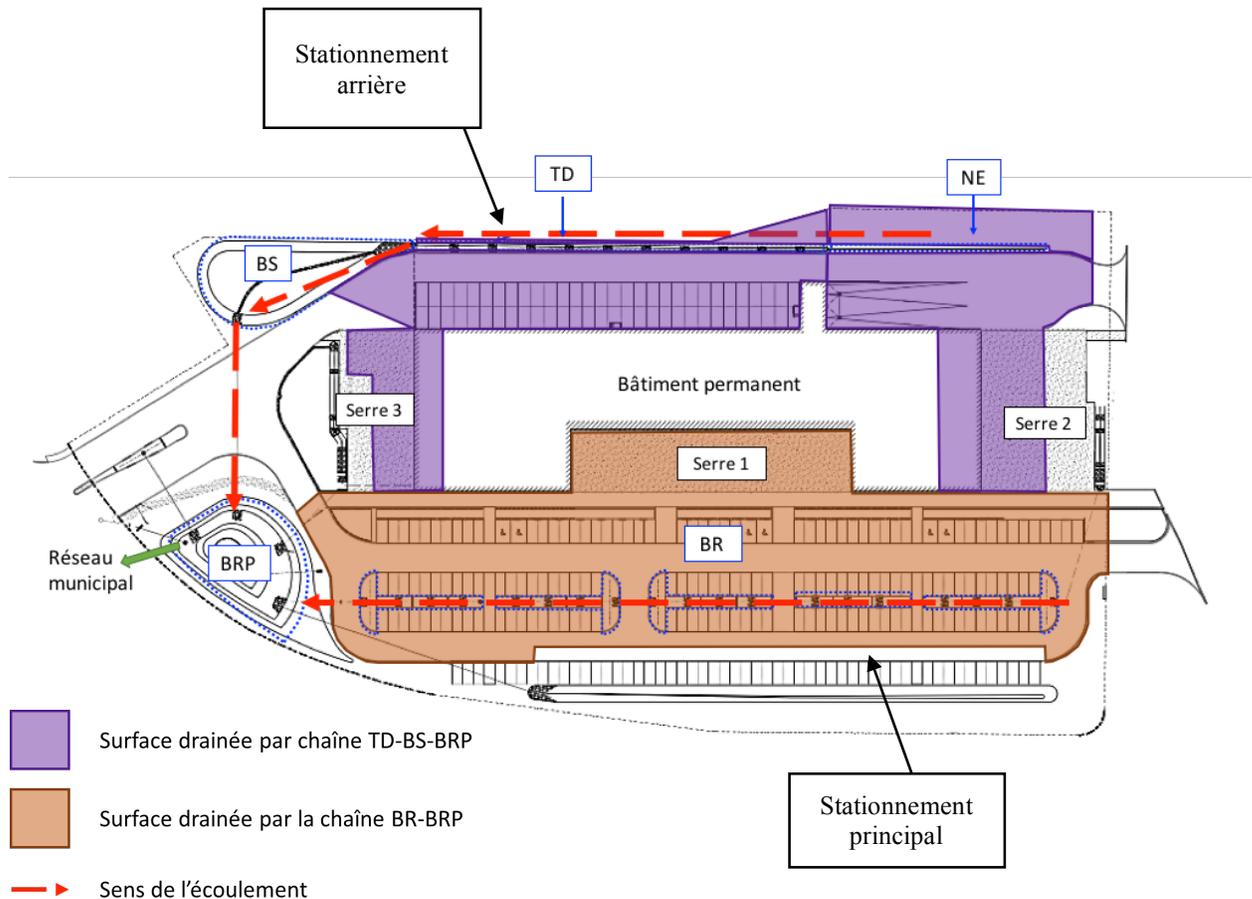


Figure 8 – Zones drainées par les PGOs et sens de l'écoulement

3.1.1 Chaîne de traitement : tranchée drainante, bassin sec et bassin avec retenue permanente

Selon les plans de conception, la chaîne TD-BS-BRP récupère 20 % des eaux tombant sur le toit du bâtiment du marché, 75 % de celles tombant sur la serre 2 et 100 % de celles tombant sur la serre 3. Ces eaux s'écoulent par une gouttière et s'additionnent aux eaux de ruissellement du stationnement arrière qui s'écoulent dans la TD. La NE située à l'amont de la tranchée drainante a été écartée de la chaîne de traitement, car celle-ci a pour rôle de transporter uniquement les eaux vers la TD où le premier traitement des eaux a lieu. Une fois dans la TD, ces eaux s'infiltrent et sont évacuées vers le BS, où les eaux accumulent, puis sont rejetées dans le BRP. Cette chaîne draine donc 29 % de la superficie totale du marché public.

Description des PGOs de la chaîne

La TD située à l'arrière du marché public a une longueur de 101 m et une largeur moyenne de 2,15 m ainsi qu'une profondeur d'au moins de 67,5 cm. Cette PGO n'utilise pas de plantes pour traiter les eaux de ruissellement. L'enlèvement des contaminants est favorisé par des processus physiques tel que l'adsorption.

La TD est constituée de trois couches, soit une couche de paillis de cèdre, une couche de sable drainant et une couche de pierres concassées (Figure 9). Comme pour les BR au niveau de la bordure arasée, le paillis a été remplacé par un chemin de roches.

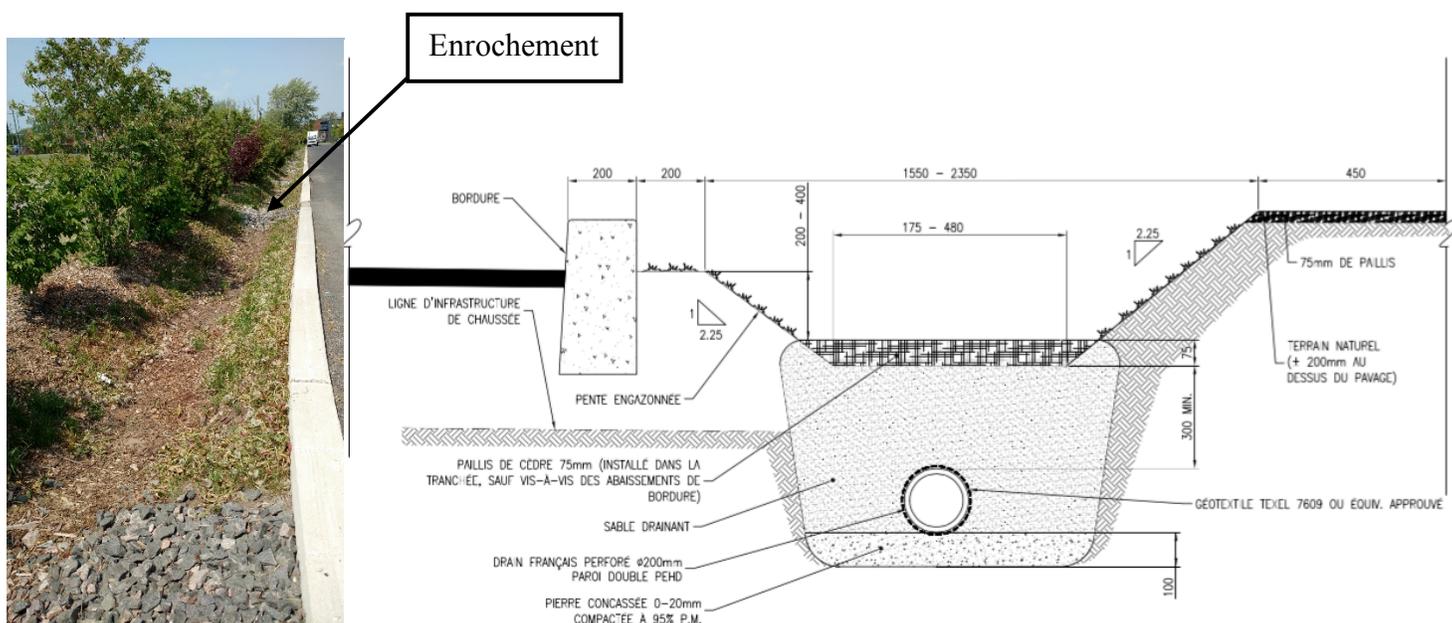


Figure 9 - Coupe de la tranchée drainante (Vinci Consultants)

Au fond de la couche de sable drainant se trouve une conduite perforée de 200 mm de diamètre permettant de capter les eaux de ruissellement et de les envoyer vers le bassin sec décrit dans le prochain paragraphe.

Comme les noues engazonnées, le bassin sec favorise le ralentissement de l'écoulement des eaux de ruissellement et donc la sédimentation des contaminants. En temps de pluie, celui-ci se remplit, puis se vide sur une courte période; celui-ci reste donc sec en

l'absence de précipitation. La Figure 10 illustre le plan du bassin et le Tableau 5 résume ses caractéristiques.

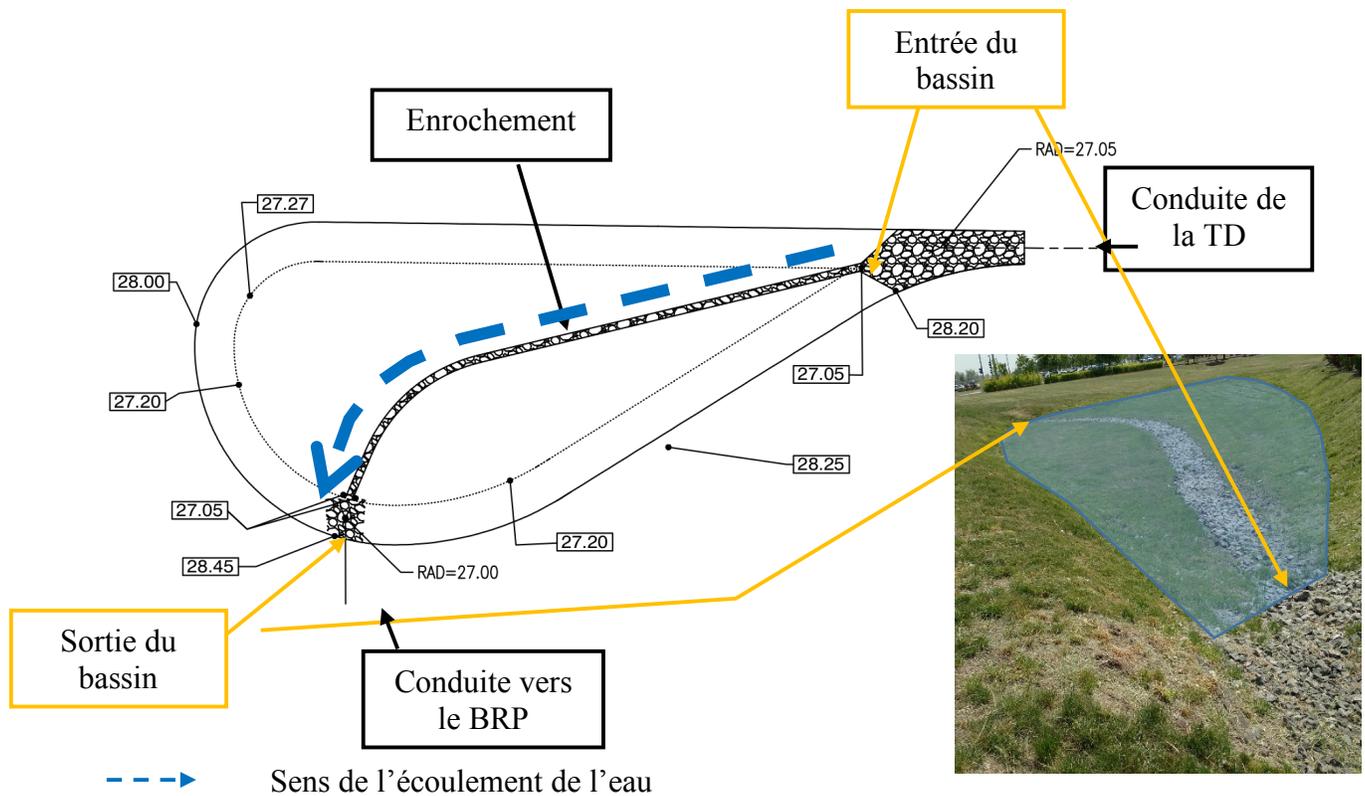


Figure 10 – Plan du bassin sec (Vinci Consultants)

Tableau 5 - Caractéristiques du bassin sec

Caractéristique	Valeur
Superficie	369 m ²
Profondeur	1 m
Niveau d'eau maximal	0,65 m
Pluie de conception	100 ans
Entrée	1 entrée, conduite de 200 mm collectant les eaux de la TD
Sortie	1 sortie, conduite de 250 mm dirigeant les eaux vers le BRP

Au fond du bassin sec, un chemin de roches a également été aménagé permettant de réduire la vitesse d'écoulement et de diriger l'eau vers le BRP.

Comme le bassin sec, le BRP a été conçu selon une pluie de récurrence de 1/100 ans. Ce dernier a été conçu en trois paliers; les deux premiers supportent des plantes de types

prairie humide et aquatique et le troisième palier est constitué du sol naturel. L'ensemble des paramètres de conception est détaillé à la Figure 11.

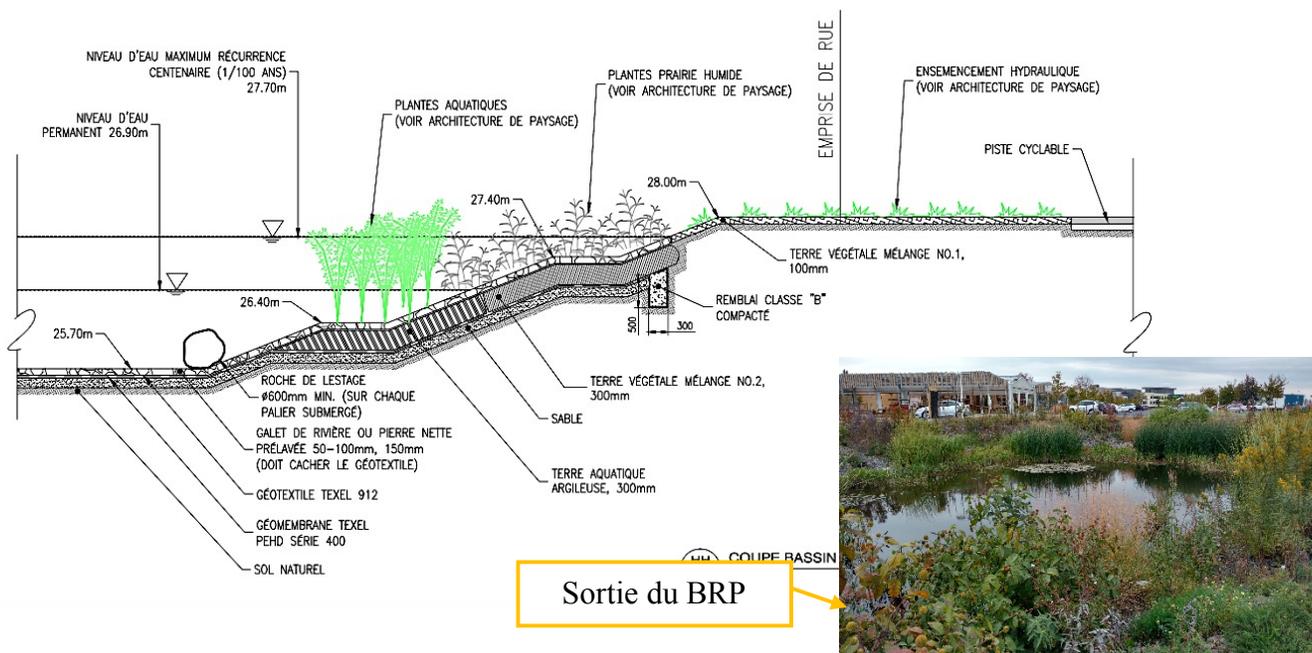


Figure 11 - Coupe du bassin avec retenue d'eau permanente (Vinci Consultants)

Comme le montre la Figure 11, le BRP maintient un niveau d'eau constant de 1,2 m. En temps de pluie, ce niveau peut monter jusqu'à 2 m. Ce bassin a été aménagé pour favoriser l'enlèvement de contaminants via des processus chimiques, physiques et biologiques.

Pour faciliter les processus aérobies, une conduite d'amenée d'air de 12,5 mm de diamètre a été installée au fond du bassin. En 2016, celle-ci a été mise en fonction toute l'année; cependant, en 2017, des problèmes sont survenus, ce qui a provoqué l'arrêt de l'amenée d'air à partir du mois d'avril.

Durant l'été 2016, le BRP a fait face à un problème de prolifération d'algues. Pour résoudre ce problème, du colorant noir ainsi que du sulfate de cuivre (2 kg) ont été dispersés dans l'eau. Au cours de l'été 2017, un second traitement a été effectué dans le bassin et 0,5 kg de sulfate de cuivre a été ajouté à l'eau. Le sulfate de cuivre est un algicide chimique qui

permet d'éliminer rapidement les algues en bloquant le transfert d'énergie à l'intérieur de la plante (MAPAQ, 2007).

3.1.2 Chaîne de traitement : cellules de biorétention et bassin avec retenue permanente

D'après la Figure 8, la chaîne BR-BRP récupère les eaux de ruissellement du stationnement principal, du pavé piétonnier et du toit de la serre 1, ce qui constitue 37 % de la superficie totale du site. Une fois dans ces PGOs, l'eau s'infiltré, puis est évacuée vers le BRP.

Description des PGOs de la chaîne

La conception des BR a été effectuée selon une pluie de récurrence de 50 ans. Les BR ont deux fonctions : traiter l'eau de ruissellement par des processus biologiques et physiques et favoriser le ralentissement de l'écoulement grâce à l'accumulation et l'infiltration de l'eau. Les cellules de biorétention comptent entre six et sept points d'entrée via des bordures arasées. Ces entrées sont caractérisées par un chemin constitué de roches ayant pour objectif de ralentir la vitesse de l'écoulement et ainsi limiter l'érosion du sol (Figure 12). Des murs de soutènement séparent également les BR en trois ou quatre sections dans lesquelles différentes plantes sont aménagées. Au fond des cellules se trouve une conduite de 250 mm de diamètre qui permet l'évacuation des eaux des cinq BR lorsque le sol a atteint son point de saturation. En cas de surcharge de la conduite, les eaux sortent par un puisard installé dans chacune des cellules.

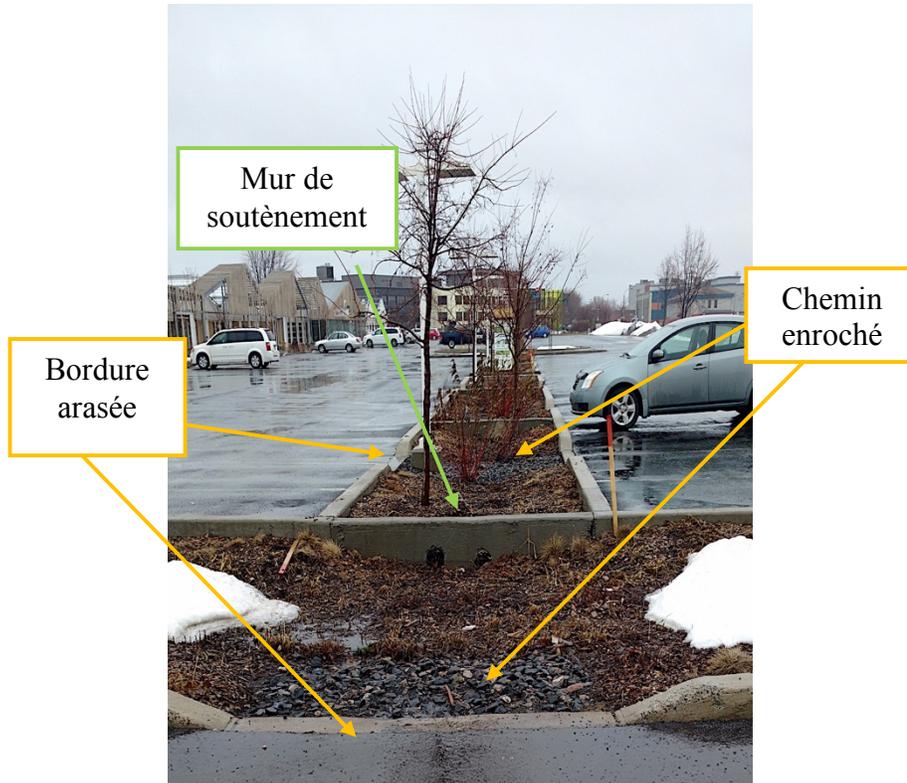
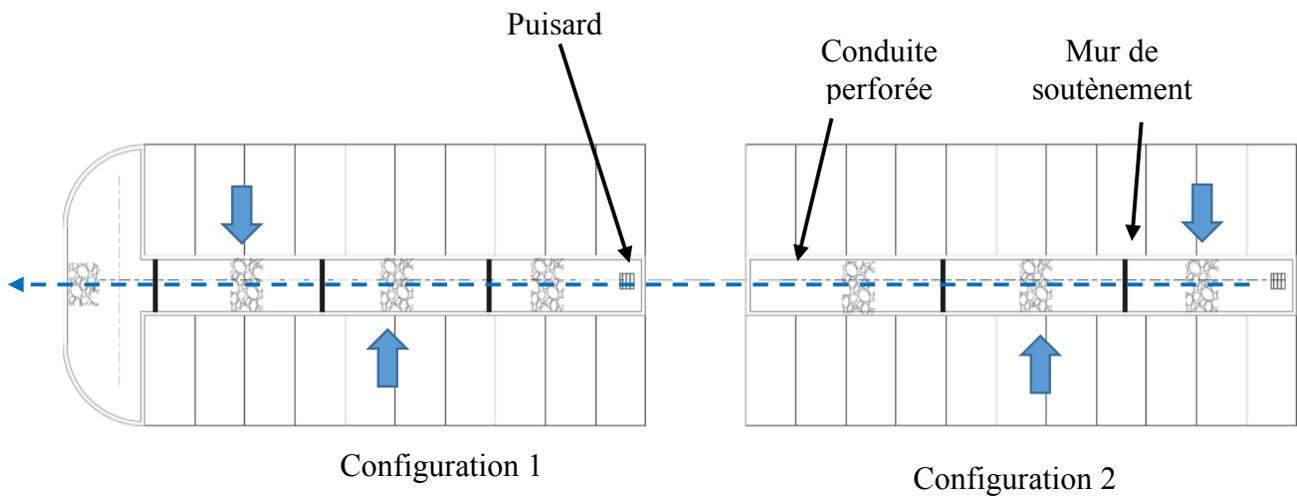


Figure 12 - Cellules de biorétention

Les BR ont été conçues selon deux configurations (Figure 13). Les cellules BR-1, BR-3, BR-4 et BR-5, montrées à la Figure 4, ont été conçues selon la configuration 1 et la cellule BR-2 a été construite à partir de la configuration 2.



➡ Entrée d'eau provenant du stationnement

--- ➡ Sens de l'écoulement de l'eau infiltrée dans la conduite

Figure 13 – Configuration des cellules de biorétention (Vinci Consultants)

La superficie constitue la seule différence qui distingue ces deux configurations; la configuration 1 a une superficie de 110 m² avec sept points d'entrée d'eau alors que la configuration 2 a une superficie de 70 m² avec six points d'entrée.

Toutefois, quelle que soit la configuration, les cellules partagent le même profil de sol, soit une couche de végétaux, du substrat et une couche permettant le drainage des eaux de ruissellement totalisant une profondeur totale de 1,05 m. À cet effet, la Figure 14 illustre le profil au niveau de la bordure arasée. Les coupes présentant le profil du sol sous les arbres sont montrées à l'Annexe 3.

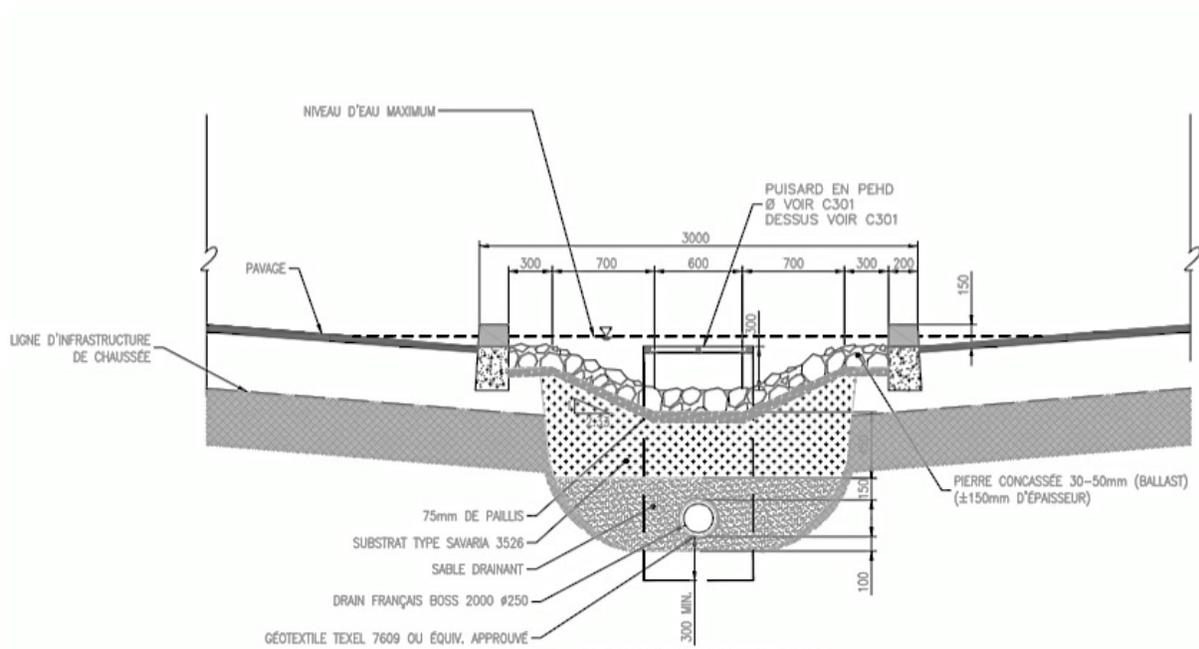


Figure 14 - Coupe des cellules de biorétention au niveau des bordures arasées (Vinci Consultants)

La couche superficielle des cellules de biorétention est composée de paillis et de divers végétaux comprenant un mélange d'arbustes, de plantes herbacées et graminées. Le Tableau 6 liste ces végétaux.

Tableau 6 – Caractéristiques des plantes choisies pour les cellules de biorétention

Famille	Nom des végétaux
Herbacées /Graminées	Agastache fowniculum (indigène) Alchemilla mollis Asclepias tuberosa Hordeum jubatum (indigène) Leymu arenarium (indigène) Panicum virgatum (indigène)
Arbres	Gleditsia tracanthos var. inemis 'Skyline' Quercus rubra (indigène) Syringa reticula 'ivory Silk' Prunus virginia 'Schubert'
Arbustes	Sorbaria sorbifolia 'Sem' Cornus stolonifera (indigène)

Le choix de ces plantes a été basé sur les caractéristiques suivantes:

- elles tolèrent la sécheresse et la chaleur ;
- elles tolèrent les inondations temporaires ;
- elles tolèrent la pollution ;
- elles tolèrent le sel de déglacage ;
- elles supportent le gel ; et
- elles offrent une alternance de floraison.

La seconde couche est constituée du terreau Natureausol de la compagnie Savaria. Cette couche a une épaisseur variant entre 45 cm et 90 cm. Cette terre a été développée principalement pour répondre aux besoins des ouvrages de biorétention. Celle-ci offre tous les nutriments qui favorisent la croissance des plantes. Le Tableau 7 présente les caractéristiques physico-chimiques de ce terreau.

**Tableau 7 - Propriétés physico-chimiques du substrat Natureausol
(Fiche technique Savaria, n.d, p. 53)**

Caractéristique	Valeur
Taux d'infiltration théorique	0.8 cm/h
Perméabilité au chantier	8-16 cm/h
Essai de perméabilité au laboratoire (teneur en eau 26,8%)	13 cm/h
pH	6 - 7.5
Matière organique (Walkley Black)	2 - 5%
C.E.C (Capacité d'échange cationique)	10-20 méq / 100 g de sol
Salinité	< 3,5 mmhos / cm
Tassement	25%
Phosphore (P) Mehlich 3	> 26 ppm
Potassium (K) Mehlich 3	> 126 ppm
Magnésium (Mg) Mehlich 3	> 126 ppm
Calcium (Ca) Mehlich 3	> 500 ppm
Dimension du tamisage	20 mm
Composition : Compost, sable, terre arable, terre noire Intrants recyclés : 40 %	

Sous la deuxième couche se trouve la section permettant le drainage des BR. Comme le montre la Figure 14, celle-ci est constituée de sable drainant d'une épaisseur de 50 cm. Dans cette couche se trouve également la conduite perforée de 250 mm de diamètre qui évacue les eaux vers le BRP décrit dans la chaîne de traitement TD-BS-BRP.

3.3 Suivi quantitatif des eaux pluviales

3.3.1 Récupération des données de terrain

Pour effectuer le suivi quantitatif des eaux pluviales, deux appareils de mesure ont été installés sur le site pour prendre des mesures en continu, soit un pluviomètre à auget basculant et un enregistreur de débits (Figure 15).

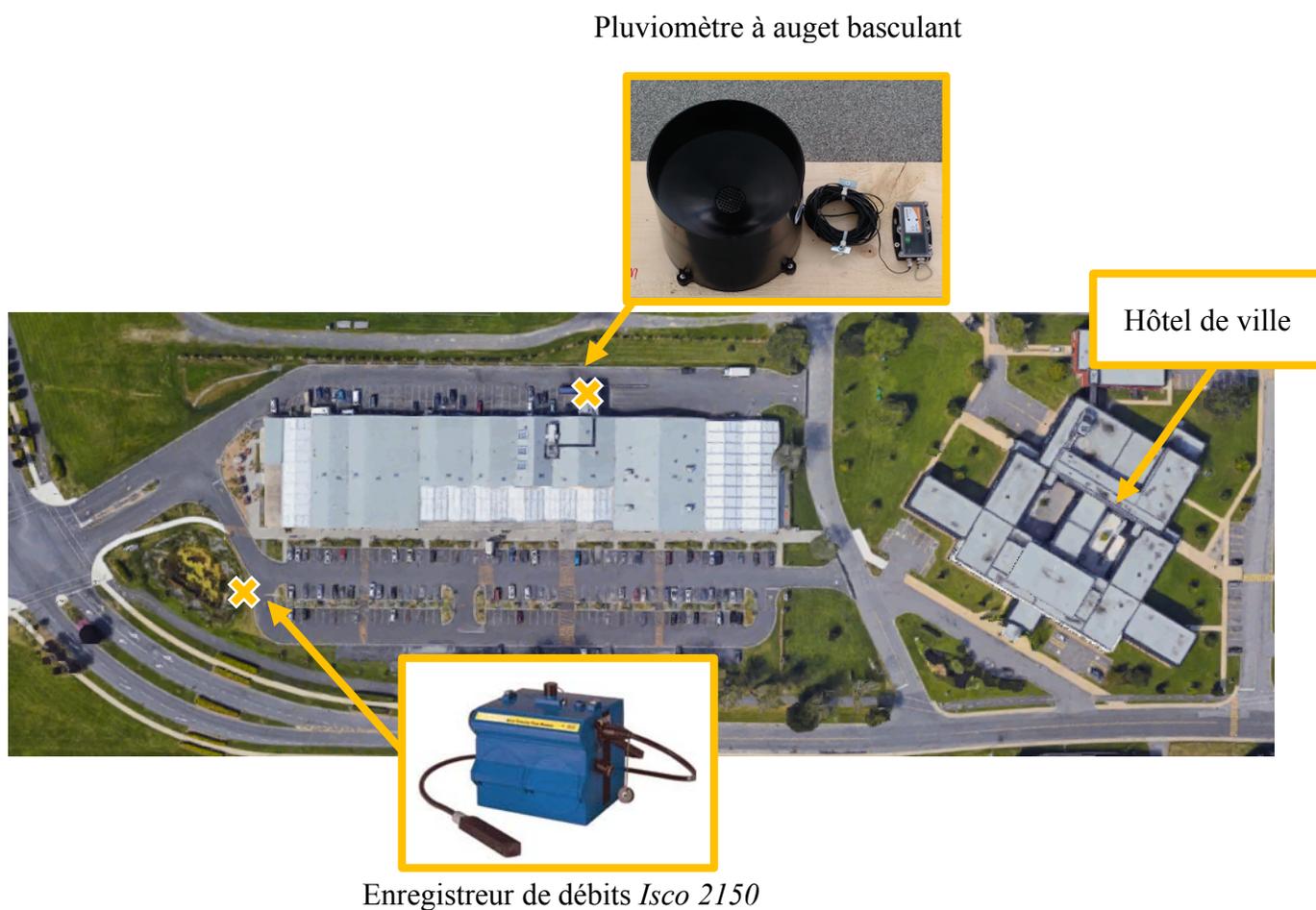


Figure 15 – Localisation de l'enregistreur de débits et du pluviomètre

Le pluviomètre à auget basculant a été fixé sur une planche de bois sur le toit du marché public. L'emplacement de l'appareil a été choisi à partir des caractéristiques suivantes (MDDELCC, 2013) :

- Une section du toit du marché qui est plate (pour mettre l'appareil à niveau);
- Peu d'obstacles à proximité et suffisamment d'espace pour respecter la distance minimale requise entre l'appareil et un obstacle;
- Accès facile.

Le pluviomètre respecte une distance représentant quatre fois la hauteur du pluviomètre avec tout obstacle présent sur le toit (système de ventilation, bordure du toit), ce qui préserve la qualité des données. De plus, à cette hauteur, le vandalisme est limité.

L'appareil a été installé le 19 juillet 2016 et retiré 24 novembre 2016 pour l'hiver, puis réinstallé le 4 avril 2017 jusqu'en novembre 2017. L'appareil a été programmé pour enregistrer en continu les précipitations à une fréquence d'une seconde. Ainsi, lorsque l'un des compartiments de l'auget se remplit, sa bascule crée une impulsion correspondant à 0,254 mm de pluie. L'enregistreur note l'heure correspondant à ces impulsions et ce, à toutes les secondes. Ces données ont, par la suite, été converties en mm d'eau, puis cumulées sur des intervalles de 5 min.

Entre les mois d'octobre 2016 et novembre 2016, un problème technique est survenu : l'enregistreur du pluviomètre a cessé de fonctionner dû à une infiltration d'eau dans le boîtier. Ceci a créé un court-circuit qui a provoqué son arrêt. Ainsi, pour l'année 2016, 26 jours de données sont manquants, soit du 20 octobre 2016 au 2 novembre 2016 et du 9 novembre 2016 au 24 novembre 2016. Le problème a été réglé en appliquant une couche de vernis sur le circuit électrique.

À moins de 200 m du marché public se trouve un second pluviomètre situé sur le toit de l'Hôtel de ville de Longueuil. Cet appareil mesure 0,1 mm d'eau par basculement et est programmé pour enregistrer des données à une fréquence de 5 minutes. La collecte de données ainsi que le suivi sont assurés par la Ville de Longueuil. Une entente a été prise avec cette dernière afin d'obtenir leurs données de précipitation. Celles-ci ont été récupérées pour redondance et validation.

Comme le montre la Figure 15, le débitmètre a été installé dans le regard reliant les BR et le BRP. Ce regard a été choisi car il se situe à la sortie de la conduite des cellules de biorétention et il est facilement accessible pour la récupération des données. Pour minimiser les perturbations dues à l'écoulement, la sonde a été placée dans la conduite amont du regard et face à l'écoulement. L'appareil a été programmé pour enregistrer une mesure de vitesse moyenne et une hauteur d'eau à toutes les 5 minutes. Du 19 septembre 2016 au 5 septembre 2017, l'enregistreur était programmé pour calculer le débit à partir de l'équation de Manning, et ce même en hiver. À partir du 5 septembre 2017 (9 :00 AM), le débit a été estimé en multipliant l'aire d'écoulement par la vitesse.

Étant donné qu'un seul enregistreur était à disposition pour prendre des mesures de débits en continu, d'autres outils ont été utilisés pour estimer les débits sortant des PGOs, soit un déversoir à jaugeage volumétrique ainsi qu'un contenant gradué. Ces outils sont illustrés à la Figure 16.

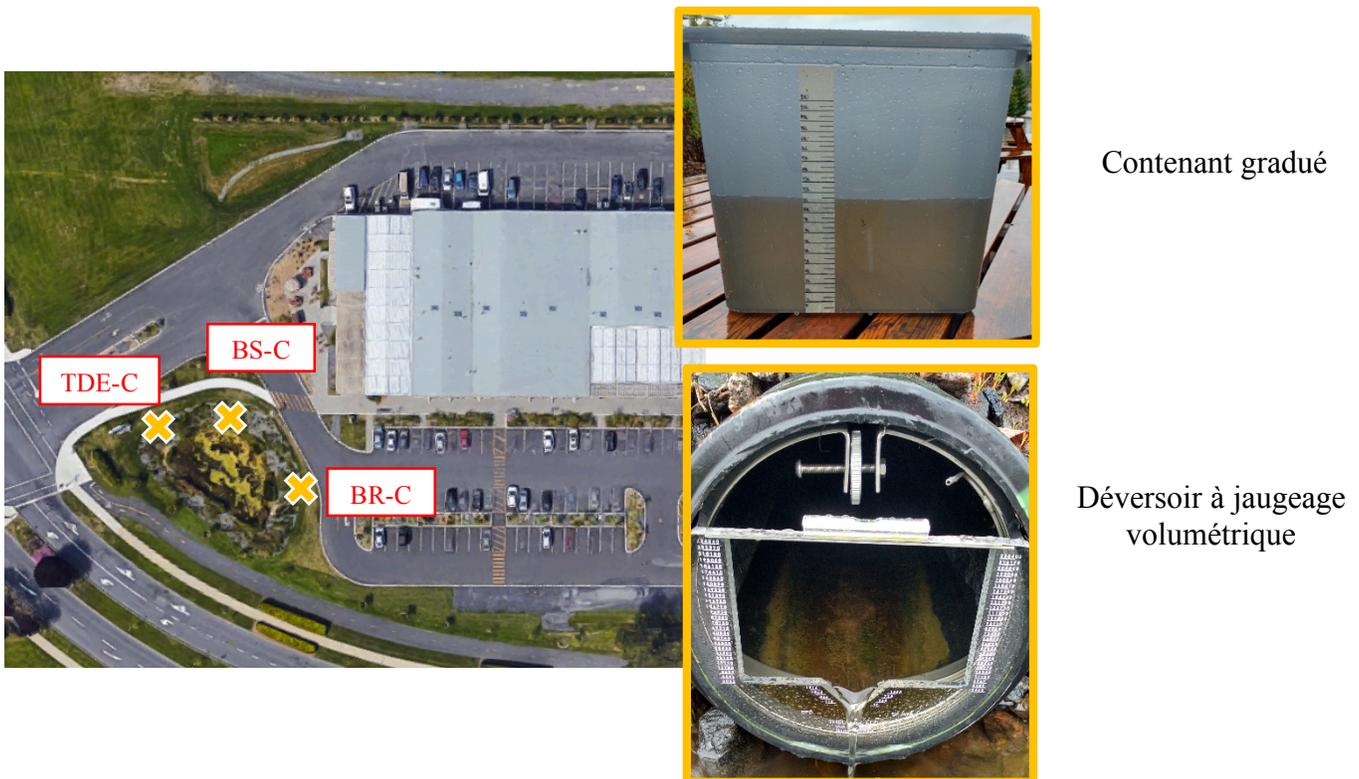


Figure 16 – Points de mesure des débits dans le BRP

Pour les besoins du projet, le contenant a été gradué manuellement afin d'évaluer les débits entrant dans le bassin avec retenue permanente. Le débit a été estimé en remplissant d'eau le contenant selon un intervalle de temps mesuré. Trois conduites ont été ciblées dues à leur localisation qui facilite la prise de mesure : la conduite reliant les BR (BR-C), la conduite du BS (BS-C) et la conduite de la TD à l'entrée du marché (TDE-C).

Pour mesurer les débits sortant des conduites de 250 mm, un déversoir à jaugeage volumétrique a été utilisé comme montré à la Figure 16. Cet appareil ne peut être introduit que dans une conduite de 250 mm, car un anneau fait de caoutchouc imperméable permet de sceller l'appareil sur le pourtour d'une conduite de cette dimension. Suite à son installation, l'eau s'accumule, puis s'écoule via son ouverture. Le déversoir a préalablement été calibré (hauteur d'eau / débit) pour mesurer des débits en gallon US par jour. Une simple mesure de la graduation en fonction du niveau d'eau permet d'obtenir un débit visuellement. Lors d'une pluie, cet appareil peut être facilement déplacé, ce qui permet de prendre des mesures à différents points du site. De plus, celui-ci ne permet que la lecture d'observations ponctuelles. Toutefois, dès son installation, il n'est pas possible d'effectuer d'échantillonnage, étant donné que l'eau doit s'accumuler avant de se déverser, cela peut être propice à la sédimentation, ce qui peut altérer la qualité de l'eau.

Un appareil mesurant l'humidité du sol a également été utilisé, soit le *TDR 100 Soil Moisture Meter* (Figure 17)



Figure 17 - TDR 100 Appareil de mesure de l'humidité du sol

Cet appareil permet de mesurer la teneur en eau volumétrique (%), soit le rapport entre le volume d'eau présent dans le sol et le volume total du sol (Spectrum Technologie, n.d). De manière générale, le principe de cet instrument de mesure consiste à mesurer le temps que prend une onde électromagnétique à parcourir la distance entre deux tiges d'acier inoxydable de 20 cm (Spectrum Technologie, n.d). Cet intervalle de temps dépend de la vitesse de l'onde générée qui est fonction de la permittivité diélectrique du sol. La valeur obtenue à partir de cet appareil est la moyenne de la teneur en eau tout le long des deux tiges. Lorsque le sol est saturé, l'appareil donne le pourcentage d'espace vide du sol.

Deux PGOs ont été ciblées pour la mesure de l'humidité : la TD et les BR (Figure 18). Contrairement aux autres installations, ces PGOs favorisent fortement l'infiltration.

Exemple des points de mesure

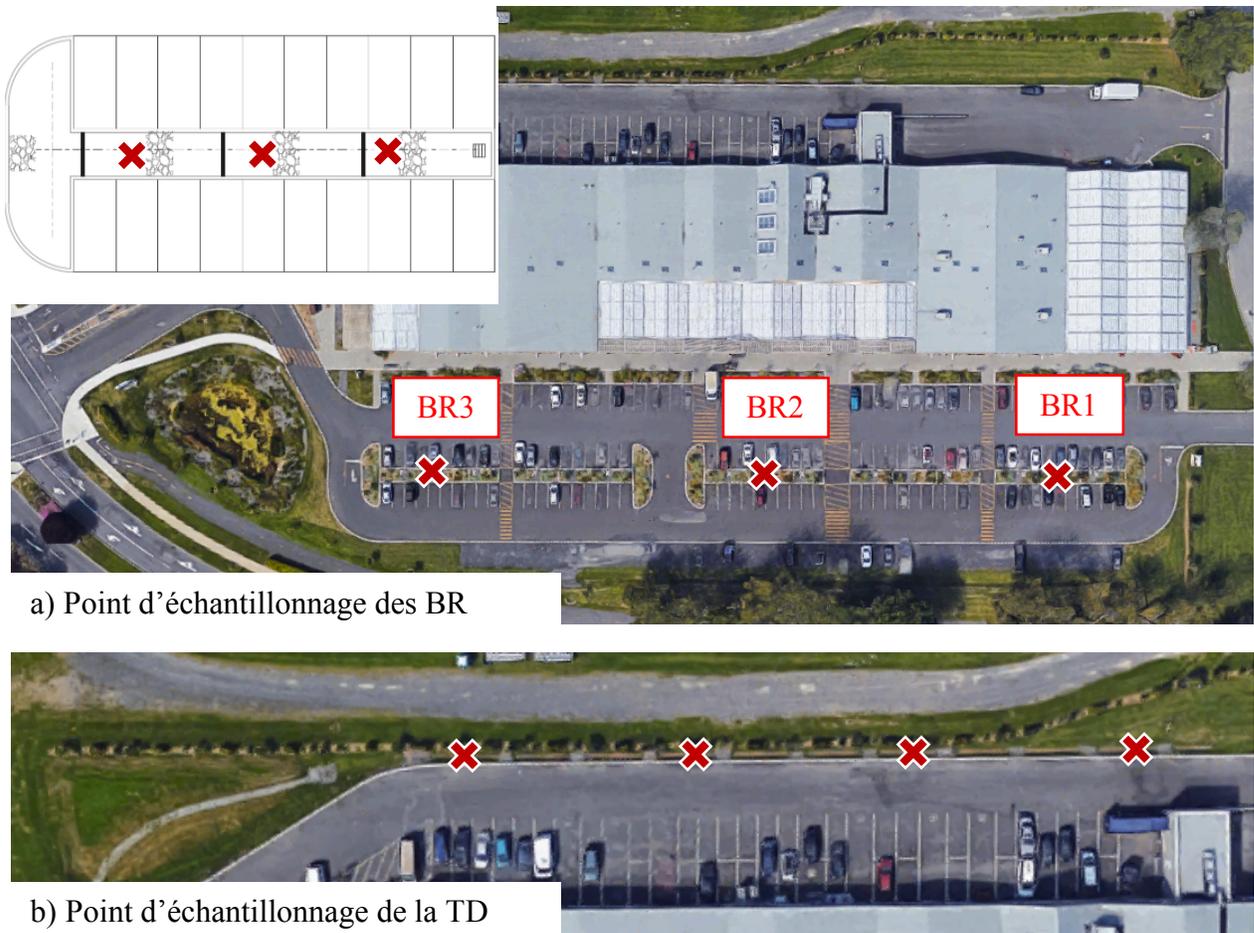


Figure 18 - Points d'échantillonnage pour la mesure de l'humidité du sol

Au niveau des BR, la mesure de l'humidité du sol a été effectuée sur les cellules 1, 3 et 5. Les marqueurs rouges représentent les points de mesure choisis (Figure 18 a). Pour s'assurer de la représentativité des données d'une pluie à une autre, la mesure a été réalisée au centre des BR à environ 15 cm de la section d'enrochement. En ce qui concerne la tranchée drainante, la mesure de l'humidité du sol a été faite sur toute la longueur de la PGO (Figure 18b). Une section sur trois de la tranchée drainante a été choisie. Ces sections ont été définies à partir des bordures arasées. De plus, que ce soit pour les BR ou la TD, l'humidité est mesurée dans deux profils du sol : de 0 à 20 cm et de 20 à 40 cm à partir de la surface du sol. Pour mesurer le deuxième profil, des trous d'environ 20 cm de profondeur ont été faits à l'aide d'une tarière.

3.3.2 Modélisation SWMM

Puisque certaines mesures de débits ne pouvaient pas être réalisées en tout point du site, le logiciel Storm Water Management Model (SWMM) a été utilisé. Le modèle développé à partir des caractéristiques propres au marché public avait pour objectif d'estimer les débits entrant et sortant des PGOs où aucune mesure en continu pu a pu être réalisée, soit les débits de ruissellement, les débits sortant de la TD et les débits entrant et sortant du BRP.

Ce logiciel est couramment employé dans le domaine de l'hydraulique urbaine pour la planification, l'analyse et la conception de réseaux de drainage urbain et de réseaux sanitaires unitaires et/ou séparatifs (EPA, 2015). Celui-ci permet de simuler de manière quantitative, mais aussi qualitative, les eaux de ruissellement d'un bassin versant. Il permet de prendre en compte différents processus hydrologiques (précipitation, évaporation, infiltration, etc.) et caractéristiques physiques (surface perméable/imperméable, pente, etc.) d'un bassin versant pour estimer les débits selon le principe d'un réservoir non linéaire (Figure 19).

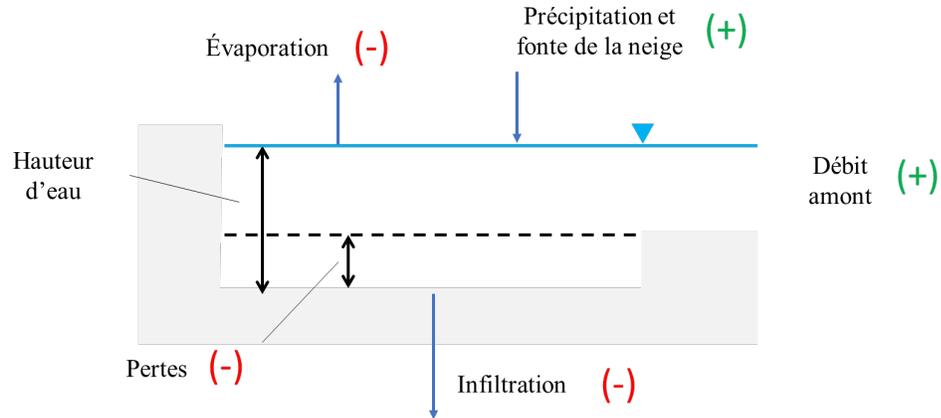


Figure 19 - Bilan de l'eau dans SWMM (adapté de EPA, 2015)

Lors d'une simulation, SWMM compile les différents intrants (+) et extrants (-) d'un même sous-bassin versant et, grâce aux équations de continuité et de Manning, estime le débit de ruissellement (Cahill, 2012). Ce logiciel permet également la modélisation de PGOs dans le modèle. À cet effet, un module nommé « LID » (*Low Impact Development*) a été développé pour faciliter leur intégration. Ce module permet d'intégrer les caractéristiques propres à chaque PGO et ainsi d'en reproduire le comportement hydraulique. Dans SWMM, les PGOs sont soumises aux mêmes conditions hydrologiques que les sous-bassins versants. La Figure 20 illustre schématiquement la représentation dans SWMM des phénomènes hydrologiques présents dans une PGO favorisant l'infiltration des eaux de ruissellement.

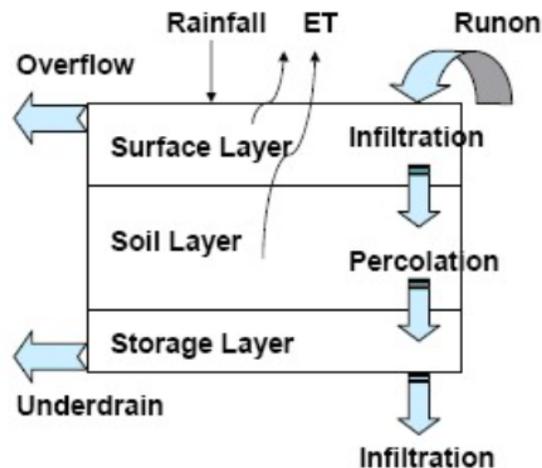


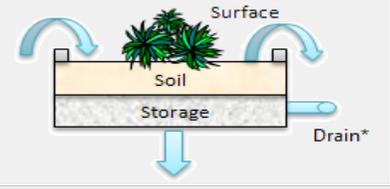
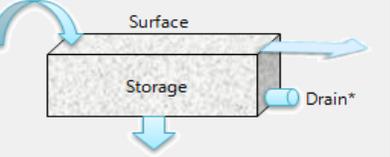
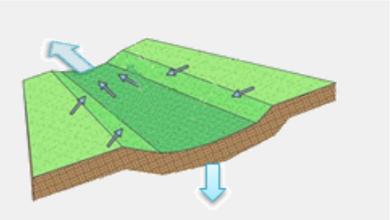
Figure 20 – Modèle conceptuel d'une PGO dans SWMM (cellules de biorétention) (EPA, 2015)

Selon la figure, les eaux de ruissellement générées par les surfaces imperméables sont rejetées dans les PGOs. Lorsque cela est pris en compte, une partie de ces eaux peut s'évaporer et retourner dans l'atmosphère, alors que le reste s'infiltré dans la couche de surface ou ruisselle. Ainsi, une fois infiltrées, les eaux percolent dans la couche de sol jusqu'à la couche de stockage. En présence d'un drain, les eaux ayant percolé sont évacuées vers un réseau en conduites. Sans drain, les eaux s'infiltrent pour réalimenter la nappe phréatique du sol.

Les PGOs sont soumises à d'autres équations notamment pour représenter l'infiltration des eaux. La première équation renvoie au modèle de Green-Ampt qui permet de modéliser l'infiltration de la couche de surface des PGOs (EPA 2015). Le second modèle est la loi de Darcy permettant de simuler le phénomène de percolation dans la couche de sol des PGOs (EPA, 2015).

Dans SWMM, les PGOs peuvent être représentées de différentes façons : sous forme de citerne, avec plusieurs couches verticales ou à partir des caractéristiques de la surface. Pour faciliter la compréhension, le Tableau 8 présente différentes manières permettant de caractériser les PGOs. Pour les besoins du projet, seules les PGOs aménagées au marché public sont représentées.

Tableau 8 - Représentation des PGOs du marché public dans SWMM

PGO	Représentation	Nombre de couches	Présence d'un drain
Cellules de biorétention		3 : Végétation Substrat Sable drainant	Oui
Tranchées drainantes et filtres à sable		1 : Sable drainant	Oui
Noues engazonnées		Aucune	Non

Selon ce tableau, les BR sont représentés par trois couches : une couche de surface constituée de végétaux, une couche de sol et une zone de stockage. Comme mentionné dans la section 2.2.1 « Présentation des concepts de PGO », les TD sont considérées comme étant des réservoirs souterrains de même que les FS. C'est pourquoi une seule couche est requise, soit la zone de stockage. En ce qui a trait aux noues engazonnées, les caractéristiques physiques (pente, longueur) de leur surface sont requises.

Le suivi de la performance hydraulique a été effectué en deux temps : 1) la récupération de mesures de débits, de précipitation et d'humidité du sol; et 2) l'estimation des débits entrant et sortant des PGOs à partir du modèle *Storm Water Management Model* (SMWW).

3.2 Suivi qualitatif des eaux pluviales

La présente section aborde le suivi qualitatif des eaux pluviales, soit la description des campagnes d'échantillonnage, la méthode de collecte ainsi que les analyses menées en laboratoire.

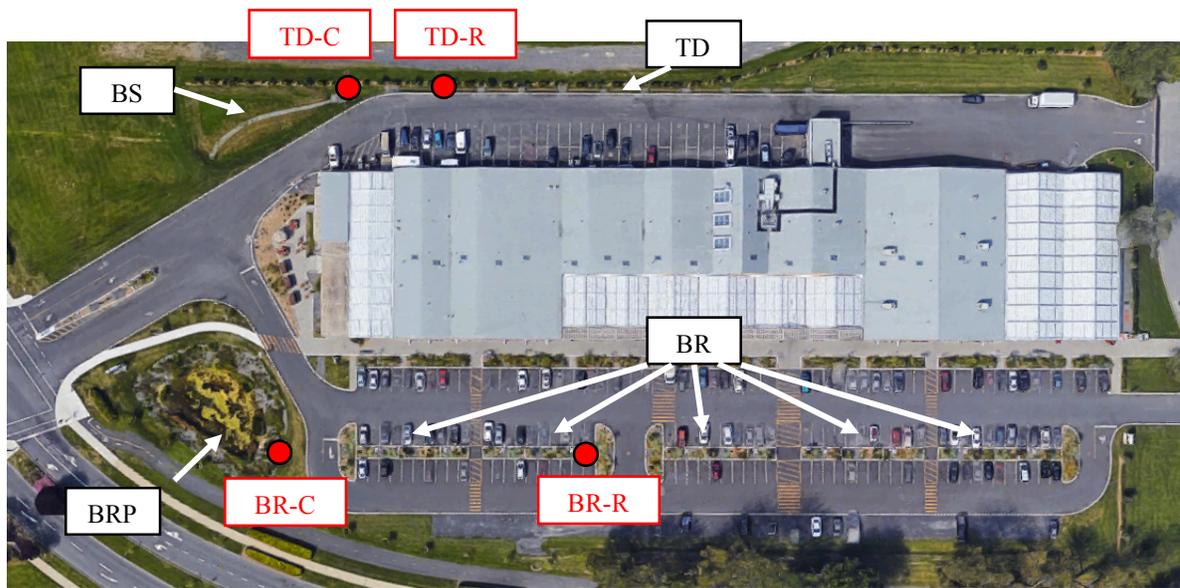
3.2.1 Campagnes d'échantillonnage

Pour évaluer l'efficacité épuratoire des chaînes de traitement, deux campagnes d'échantillonnage ont été menées.

Première campagne d'échantillonnage

La première campagne d'échantillonnage a débuté en juin 2016 et s'est terminée à la fin du mois d'avril 2017. Cette campagne a été mise en place dans le but de développer le protocole d'échantillonnage. Pour mieux comprendre le comportement individuel des PGOs, deux d'entre elles ont été étudiées, soit la TD et les BR. Celles-ci ont été choisies, car elles font partie des différentes chaînes de traitement qui favorisent l'enlèvement de contaminants.

Pour déterminer l'efficacité épuratoire, les eaux de ruissellement du stationnement ainsi que les eaux sortant des PGOs ont été récupérées. La Figure 21 présente les points échantillonnés lors de cette période. Ceux-ci sont de couleur rouge. Pour distinguer les échantillons, la nomenclature employée est la suivante : les deux premières lettres représentent la PGO étudiée; la dernière lettre représente le type d'échantillon, soit R pour les eaux de ruissellement et C pour les eaux récupérées à la sortie de la PGO en conduite. Par exemple, le point TD-C renvoie au point d'échantillonnage de la sortie de la conduite de la TD.



Google, 2017

TD : Tranchée drainante

BRP : Bassin avec retenue permanente

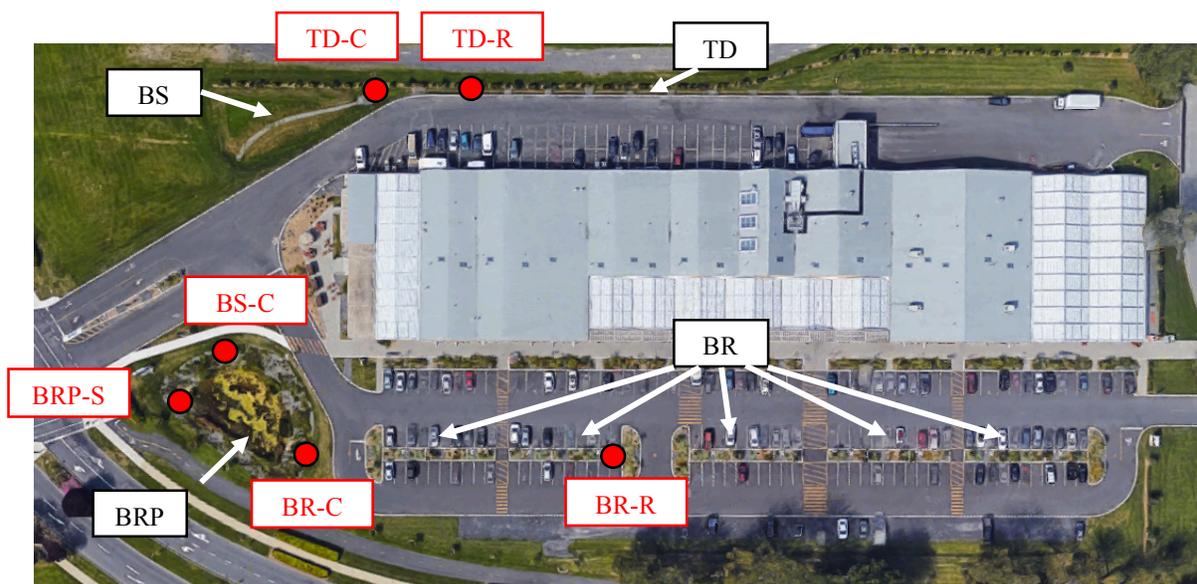
BR : Cellules de biorétention

BS : Bassin sec

Figure 21 - Points d'échantillonnage de la première campagne

Deuxième campagne d'échantillonnage

La deuxième campagne d'échantillonnage a commencé au mois de mai 2017 et s'est terminée au mois de septembre 2017. Au cours de cette période, les trois chaînes de traitement ont été étudiées. Le protocole d'échantillonnage ayant été validé lors de la première campagne, celui-ci a été réutilisé. En tout, six points d'échantillonnage ont été ciblés pour la deuxième campagne : TD-R, TD-D, BR-C et BR-C, BS-C et BRP-S (Figure 22). Pour le point BRP-S, l'indicateur S correspond à la sortie du BRP.



Google, 2017

TD : Tranchée drainante

BRP : Bassin avec retenue permanente

BR : Cellules de biorétention

BS : Bassin sec

Figure 22 - Points d'échantillonnage de la deuxième campagne

Ces points correspondent aux entrées et aux sorties des PGOs impliquées dans les chaînes de traitement. Le point BS-C a été ajouté pour étudier l'effet du bassin de la chaîne TD-BS-BRP. Le point BRP-S représente l'exutoire du bassin avec retenue permanente permettant d'étudier l'efficacité épuratoire des trois chaînes de traitement. Le Tableau 9 résume les points d'échantillonnage de chacune des PGOs des chaînes.

Tableau 9 – Résumé des points d'échantillonnage

PGO	Affluent	Effluent
TD	TD-R	TD-C
BS	TD-C	BS-C
BR	BR-R	BR-C
BRP	BS-C et BR-C	BRP-S

3.2.2 Méthode d'échantillonnage

Les Tableaux 10 et 11 détaillent la méthode d'échantillonnage des différents points étudiés.

Tableau 10 – Méthodes d'échantillonnage

Point	Type d'eau échantillonnée	Technique d'échantillonnage	Photos
TD-R	Eau de ruissellement	Récupération des eaux à l'aide d'une gouttière d'aluminium maintenue sur la bordure arasée	
TD-C	Eau sortant de la tranchée drainante	Récupération directe des eaux avec une bouteille en la plongeant dans l'eau sortant de la conduite	
BS-C	Eau sortant du bassin sec	Récupération directe des eaux avec une bouteille maintenue à la verticale à la sortie d'une conduite	

Tableau 11 – Méthode d'échantillonnage (suite)

Point	Type d'eau échantillonnée	Technique d'échantillonnage	Photos
BR-R	Eau de ruissellement	Récupération des eaux à l'aide d'une gouttière d'aluminium maintenue sur la bordure d'arasement	
BR-C	Eau sortant des cellules de biorétention	Récupération directe des eaux avec une bouteille maintenue à la verticale à la sortie d'une conduite	
BRP-S	Eau sortant du bassin avec retenue permanente	Récupération directe des eaux avec une bouteille maintenue à la verticale dans le puisard faisant office d'exutoire	

Pour faciliter l'échantillonnage, un seul point a été choisi pour récolter l'eau de ruissellement entrant dans la TD et les BR. En ce qui concerne le BR, il a été présumé que les cinq cellules effectuent le même enlèvement de contaminants, ce qui justifie le seul point d'échantillonnage à la sortie de la conduite reliant les cellules.

Les images du radar météo McGill ont permis de déterminer si la pluie prévue était adéquate pour la collecte d'échantillons. Les pluies de longue durée avec intensité modérée et les pluies courtes de forte intensité étaient ciblées. Lors de l'échantillonnage, l'heure du début et de la fin de la pluie ainsi qu'une estimation de l'heure du début du ruissellement ont été prises en note pour le suivi quantitatif des eaux pluviales. L'échantillonnage débutait

lorsque l'eau s'écoulant des bordures arasées pouvait être récupérée par la gouttière. Pour les eaux ayant traversé les PGOs, celles-ci étaient récupérées lorsqu'un écoulement était visible (élévation de la hauteur d'eau au point TD-C et écoulement à l'air libre pour les points BR-C, BS-C, BRP-S).

La méthode d'échantillonnage développée pour le projet de recherche s'est appuyée sur le Guide d'échantillonnage des eaux pluviales de l'EPA (1992). La méthode d'échantillonnage composite a été retenue. Ainsi, plusieurs sous-échantillons individuels ont été récupérés, puis versés dans un même contenant pour constituer un seul échantillon. Plus précisément, une bouteille de 1 L a été remplie suivant un intervalle de temps prédéterminé (1 min, 5 min, 10 min, 15 min) et l'eau récupérée a ensuite été versée dans une chaudière de 25 L. L'intervalle de temps entre chacun des sous-échantillons dépendait de la durée et de l'intensité de la pluie. Selon cette méthode, les six premières heures d'une pluie de longue durée peuvent être échantillonnées, car cela prend ce nombre d'heures pour remplir la chaudière en considérant un intervalle de temps de 15 minutes entre les échantillons. Ainsi, lorsque la pluie s'étale sur plus de six heures, la pluie n'a pas pu être échantillonnée sur toute sa durée.

La fin de l'échantillonnage des eaux de ruissellement était marquée, soit par l'atteinte de la capacité maximale de 25 L du contenant dans le cas des pluies de longue durée, soit par l'arrêt du ruissellement des eaux suivant la pluie. Dans le cas où la capacité maximale du contenant n'était pas atteinte, l'échantillonnage de la pluie prenait fin lorsque les volumes d'eaux récupérés à chaque point d'échantillonnage étaient les mêmes. Autrement dit, l'échantillonnage de la pluie se terminait lorsque le nombre de litres d'eau récupérés était le même pour toutes les chaudières de la même chaîne de traitement.

Une fois l'échantillonnage complété, l'échantillon composite a été mélangé et entre 3 et 4 bouteilles d'un litre ont été remplies de cette eau considérée homogène. Celles-ci ont, par la suite, été conservées à une température de 4°C (EPA, 1992) jusqu'au moment des analyses effectuées dans un délai de 24 h, car aucun agent de conservation n'a été utilisé.

3.2.3 Paramètres physico-chimiques à l'étude

Quatre paramètres de qualité de l'eau ont été étudiés : les MeS, la demande chimique en oxygène, le phosphore total et l'azote total. La détermination de la concentration en MeS s'est effectuée à l'aide de la méthode d'analyse *MA.115-S.S 1.2 - Détermination des solides en suspension totaux et volatils : méthode gravimétrique* (Québec, 2015). Pour la DCO, N et P, les protocoles HACH ont été employés :

- DCO : méthode 8000;
- N : méthode TNT 826;
- P : méthode TNT 843.

Étant donné la nature peu chargée des eaux de ruissellement sur le site d'étude, les tubes « Low range » ont été utilisés. Ce type de tube offre l'avantage d'être sensible aux plus faibles concentrations de contaminants.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les prochaines sections abordent les résultats obtenus grâce à la méthodologie décrite dans le chapitre précédent. Il est question de la caractérisation des pluies échantillonnées, puis de la validation des mesures de débits. Ces parties sont suivies des résultats du suivi quantitatif et qualitatif des PGOs, de l'évolution de la végétation ainsi que de faits divers.

4.1 Caractérisation des pluies échantillonnées

Pour caractériser les pluies, une validation des données de précipitation a tout d'abord été effectuée. La prochaine section aborde cette analyse.

4.1.1 Validation des données de précipitation

Avant d'utiliser les données du pluviomètre du marché pour l'analyse des performances des PGOs, les mesures ont tout d'abord été validées en les comparant avec les données de précipitation du pluviomètre installé sur le toit de l'Hôtel de ville. Pour ce faire, les précipitations ont été cumulées sur une base journalière (Figure 23). Pour faciliter la comparaison, la fréquence d'enregistrement du pluviomètre du marché a été fixée à un pas de temps de 5 min, comme celui de la ville de Longueuil. L'enregistrement de données à cette fréquence s'est effectué sur une durée approximative d'un mois, soit du 4 juillet 2017 au 31 juillet 2017.

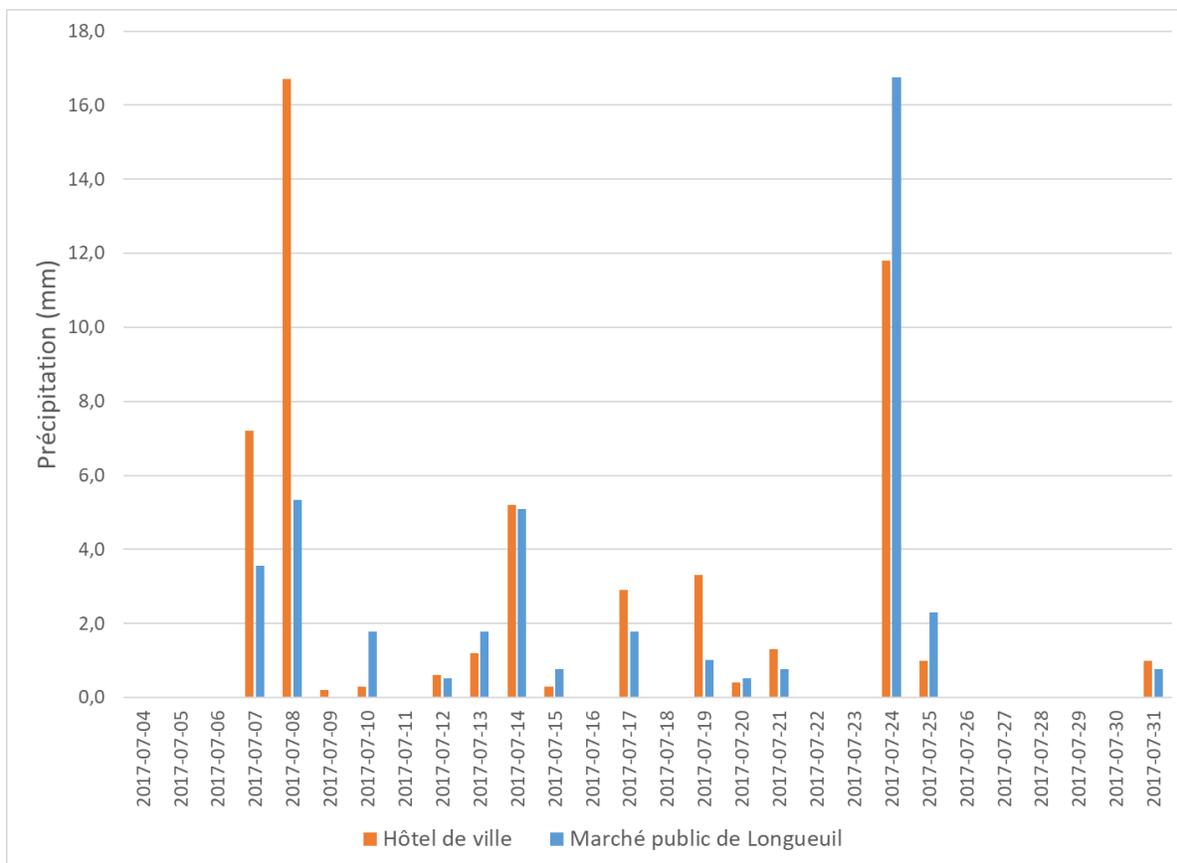


Figure 23 - Comparaison des précipitations journalières du 1 juillet au 31 juillet 2017

La comparaison des pluviomètres ne montre pas de patron précis. Selon l'événement, les précipitations quotidiennes rapportées par le pluviomètre du marché public sont soit supérieures ou inférieures à celles du pluviomètre de l'Hôtel de ville. Malgré la courte distance séparant les deux pluviomètres, il est possible physiquement d'observer quelques différences entre les précipitations quotidiennes. Toutefois, de manière générale, on s'attend à observer des valeurs ayant le même ordre de grandeur. Pour les pluies de moins de 8 mm, les valeurs mesurées par les deux pluviomètres présentent des écarts allant de 0,1 mm à 3,6 mm. Pour les pluies de plus de 8 mm (8 juillet 2017 et 24 juillet 2017), les écarts s'élèvent à 11,4 mm et 5,0 mm. Pour les deux journées présentant les plus grands écarts, les données de précipitation aux 5 minutes ont été rapportées graphiquement. La Figure 24 illustre l'événement de pluie du 7 au 8 juillet 2017. Au niveau du pluviomètre du marché public, les précipitations de ces deux jours totalisent 8,9 mm de pluie et pour celui de l'Hôtel de ville, on obtient 28,7 mm.

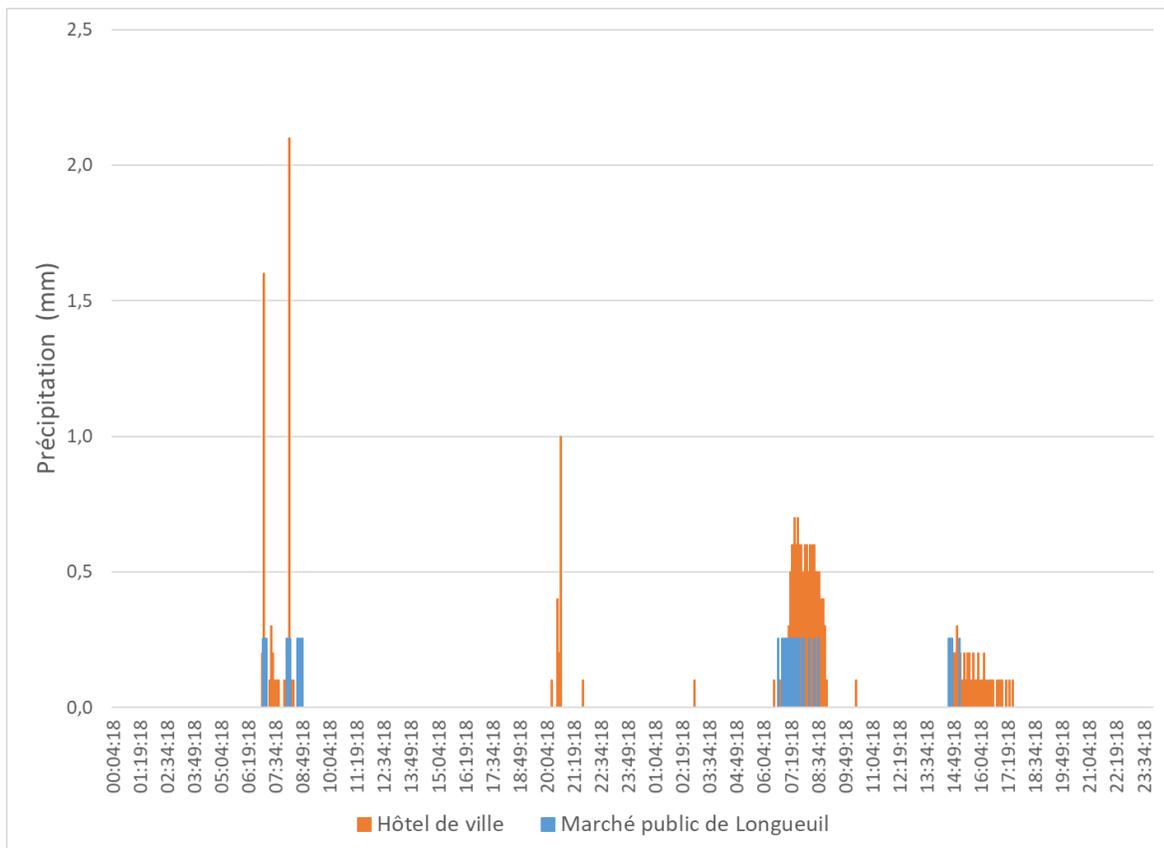


Figure 24 - Comparaison des précipitations aux 5 minutes du 7 au 8 juillet 2017

La Figure 24 montre qu’avec une fréquence d’enregistrement aux 5 minutes, la valeur maximale de précipitation que le pluviomètre du marché public peut enregistrer est de 0,254 mm alors que pour celui de l’Hôtel de ville, les mesures varient de 0,1 mm à 2,0 mm. Cette observation montre qu’une fréquence de 5 minutes n’est pas adéquate pour le pluviomètre du marché public. En effet, lors d’un orage, cet appareil ne peut enregistrer que 0,254 mm de pluie à toutes les 5 minutes comparativement au pluviomètre de l’Hôtel de ville où le nombre de bascules est enregistré puis cumulé. Il est à noter que cette situation est vraie selon les paramètres imposés. Les données de précipitation du pluviomètre du marché du 4 juillet 2017 au 31 juillet 2017 ont donc été invalidées et n’ont pas été utilisées pour le projet. Cette analyse a permis de fixer la fréquence d’enregistrement d’une seconde afin d’obtenir des valeurs de précipitation représentatives des événements. Les données du pluviomètre du marché public ont donc servi lors de l’étude du suivi quantitatif des PGOs lorsque la fréquence

d'enregistrement était de 1 seconde. Pour le mois de juillet 2017, les données du pluviomètre de l'Hôtel de ville ont été utilisées pour le suivi.

4.1.2 Analyse des pluies échantillonnées

Pour la première campagne d'échantillonnage qui concernait les PGOs individuelles, soit du mois de juin 2016 au moins d'avril 2017, 11 pluies ont été échantillonnées pour évaluer qualitativement l'efficacité épuratoire de la TD et des BR. Du mois de mai au mois d'août 2017, sept événements de pluie ont permis la collecte des eaux de ruissellement pour évaluer l'efficacité épuratoire des chaînes de traitement et effectuer leur suivi quantitatif. Le Tableau 12 résume les caractéristiques de l'ensemble de ces pluies. Puisque le pluviomètre a été retiré lors des mois d'hiver pour préserver son état, les pluies d'hiver n'ont pas été mesurées.

Tableau 12 - Caractéristiques des évènements de pluie échantillonnée

	Date	Temps sec antécédent (h)	Durée de l'évènement (h)	Quantité de pluie (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max sur 5 min (mm/h)
Première campagne	28/06/16 ¹	19,5	19,8	5,9	0,3	12,0
	09/07/16 ¹	178,4	9,8	14,8	1,5	6,0
	25/07/16 ¹	35,3	6,2	3,0	0,4	14,4
	16/08/16	54,2	10	85,1	7,6	45,7
	13/10/16 ¹	112,4	5,3	7,1	1,3	9,6
	16/10/16 ¹	115,3	7,1	9,1	1,0	15,6
	01/02/17 ²	-	-	-	-	-
	08/02/17 ²	-	-	-	-	-
	23/02/17 ²	-	-	-	-	-
	01/03/17 ²	-	-	-	-	-
19/04/17	46,1	9,9	20,3	2,0	12,1	
Deuxième campagne	25/05/17	69,75	8,4	15,2	1,8	12,2
	29/05/17	72,7	8,8	9,4	1,1	6,1
	5/06/17	58,8	12,3	23,4	1,9	12,2
	27/06/17	35,1	1,1	23,9	20,5	79,2
	17/07/17 ¹	7,3	2,3	1,7	0,7	10,8
	24/07/17 ¹	65,3	20,3	8,0	0,6	3,8
	18/08/17	69,4	2,8	20,6	5,4	23,4

1 : Données provenant du pluviomètre installé sur le toit de l'Hôtel de ville

2 : Pluie d'hiver, aucune donnée de précipitation

Dans l'ensemble, plus de 24 h séparent les événements de pluie, à l'exception des pluies du 28 juin 2016 et du 17 juillet 2017 où respectivement 19,5 h et 7 h séparent les événements. Cet intervalle de temps correspond à la période de temps sec antécédent et permet de définir l'indépendance des événements entre eux. Lorsqu'une période de plus de six heures sépare deux événements de pluie dans des bassins versants dont le temps de concentration est faible, il peut être considéré que ces derniers sont issus de deux systèmes météorologiques différents (MDDELCC, 2012). Un temps sec de longue durée peut avoir un effet sur la quantité de contaminants lessivés par la pluie puisque ceux-ci s'accumulent sur les surfaces des bassins versants en temps sec.

L'analyse des pluies montre que la durée des événements échantillonnés varie entre une heure et 21 h. Les pluies de moins de 3 h sont considérées comme étant de courte durée et celles de plus de 8 h sont de longue durée. La quantité de pluie mesurée lors de ces événements varie entre 1 mm et 82 mm. La quantité de pluie dépend grandement de la durée. Lorsque moins de 10 mm d'eau est tombée, cela est considéré comme une petite pluie ou une pluie modérée. À l'inverse, une pluie de plus de 10 mm est cataloguée comme une grosse pluie.

Pour obtenir une idée générale de la période de retour des événements, l'intensité moyenne ainsi que la durée de l'événement ont été rapportées graphiquement (Figure 25). Dans ce graphique, les deux courbes représentent des récurrences de 2 et 5 ans des courbes IDF (intensité, durée, fréquence) des précipitations enregistrées à l'aéroport de Saint-Hubert (Environnement Canada, 2014).

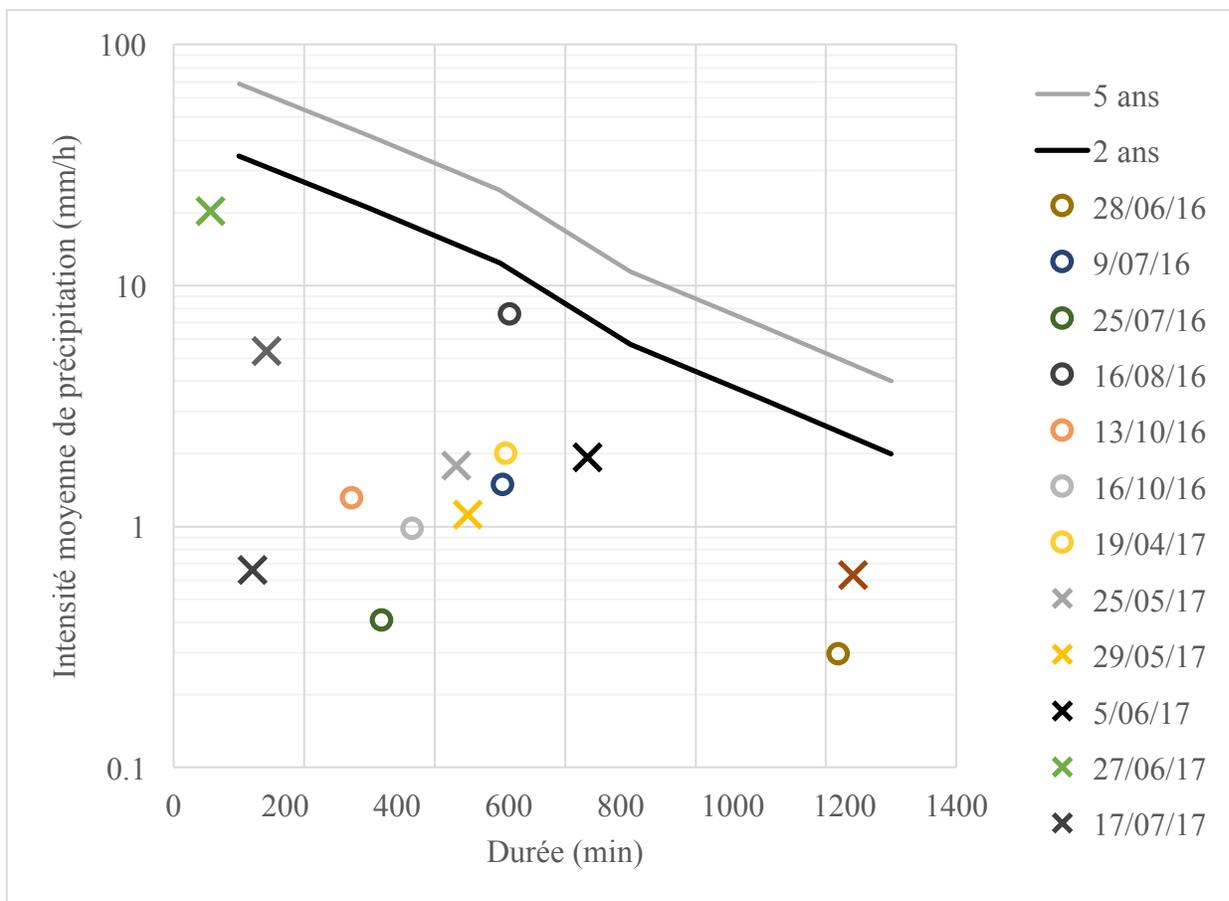


Figure 25 - Comparaison de la période de retour des évènements échantillonnés lors des campagnes d'échantillonnage

Les évènements de pluie échantillonnés lors de la première campagne sont identifiés par les cercles. Pour leur part, les marqueurs X représentent les pluies de la deuxième campagne. En se basant sur l'intensité moyenne, leur comparaison avec les courbes IDF montre que la fréquence d'apparition de ces pluies est, dans l'ensemble, inférieure à 2 ans tel qu'attendu et sont montre une certaine variété.

Pour caractériser les pluies, deux critères ont été choisis, soit la durée de l'évènement et la quantité de pluie tombée. À cet effet, la Figure 26 illustre la manière dont la catégorisation a été effectuée.

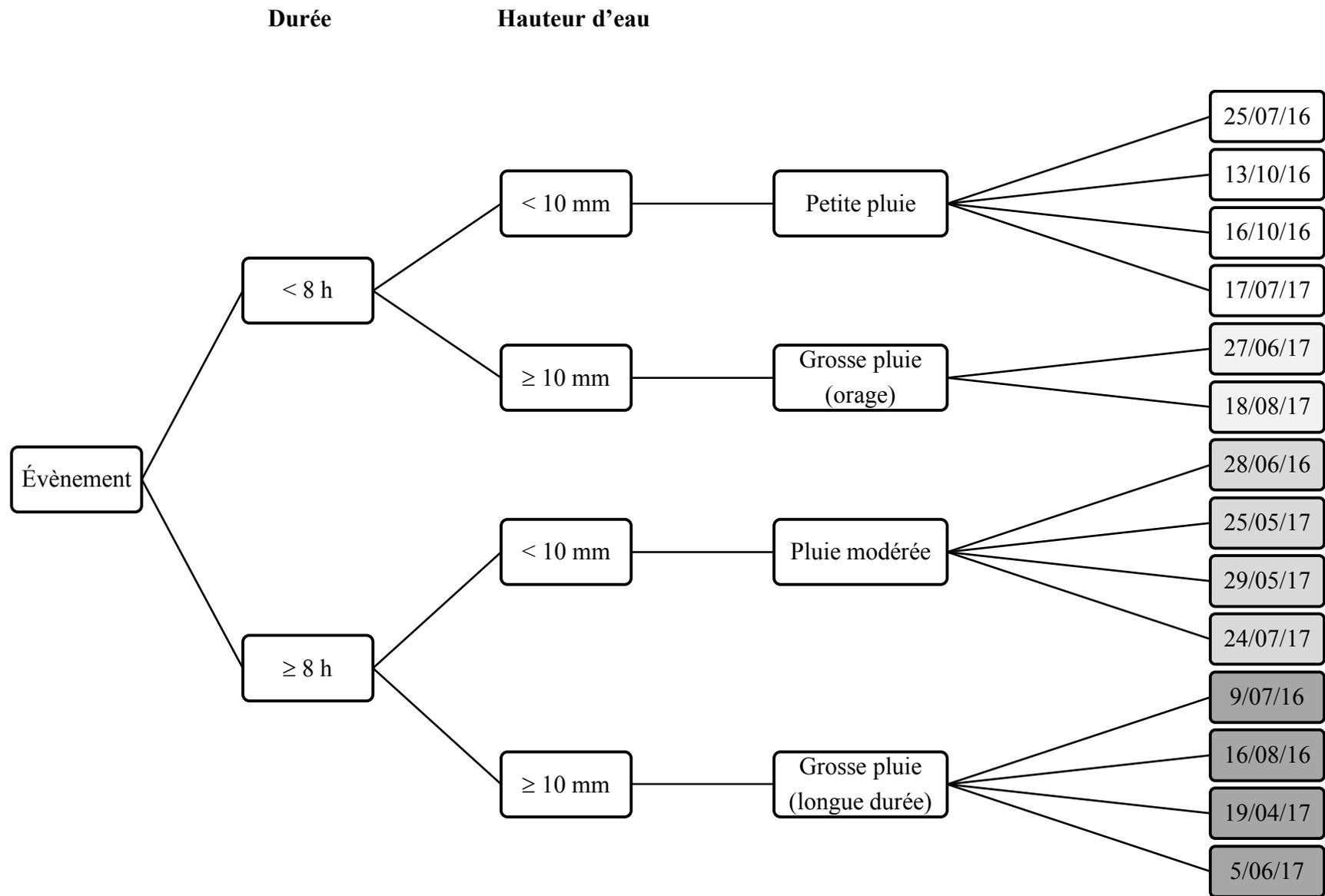


Figure 26 - Catégorisation des pluies échantillonnées

Suivant la Figure 26, les 14 évènements échantillonnés hors période hivernale ont été classifiés en trois groupes : petites pluies, pluies modérées et grosses pluies. Deux types de grosses pluies ont été définis. Les grosses pluies de courte durée sont considérées comme des orages. Elles sont caractérisées par une forte intensité alors que les pluies de longue durée ont une faible intensité moyenne de précipitation. Pour l'ensemble des pluies échantillonnées, quatre précipitations sont de type petite pluie, deux sont des orages, quatre sont des pluies modérées et quatre grosses pluies de longue durée ont été observées.

Les PGOs utilisées seules et en série vont avoir des effets différents selon les types de pluies. Premièrement, étant donné que leur couche de sol doit se saturer avant d'évacuer les eaux, il est attendu que la TD et les BR puissent retenir un plus grand volume d'eau, voire la totalité, en présence de petites pluies. Dans le cas où un écoulement survient à leur sortie, l'aménagement de PGOs à l'aval va permettre de pallier ce rejet et favoriser une rétention supplémentaire pour limiter l'écoulement vers le réseau municipal. Il est donc attendu que les performances hydrauliques soient meilleures en présence d'une petite pluie. Les résultats attendus pour les pluies modérées vont dans le même sens que pour les petites pluies. Puisqu'un plus gros volume d'eau est généré, la capacité de rétention (%) peut être réduite. Pour les grosses pluies de longue durée, les PGOs vont permettre d'atténuer les débits de pointe. Toutefois, la rétention des volumes (%) sera réduite dû aux grands volumes d'eau à gérer. Cependant, la diminution peut être palliée par l'ajout de PGOs à l'aval. En ce qui a trait aux grosses pluies de type orage, de gros volumes vont s'écouler très rapidement vers les PGOs. Si le taux d'infiltration est inférieur à l'intensité de la pluie, cela aura pour effet de saturer rapidement la couche de sol de la TD et des BR. En série, les PGOs à l'aval vont donc pouvoir contrôler cet apport d'eau et augmenter le temps de rétention.

4.2 Validation des mesures de débits

Comme mentionné dans la section 2.3.1 « Suivi quantitatif », un enregistreur de débits a été installé dans la conduite des BR. Les sections suivantes présentent le fonctionnement de cet appareil ainsi que les résultats reliés à l'analyse des débits mesurés.

4.2.1 Fonctionnement et correction des mesures de l'enregistreur de débits

Le principe de base du fonctionnement de l'enregistreur de débits repose sur l'effet Doppler pour estimer une vitesse moyenne de l'écoulement et sur la pression hydrostatique pour mesurer une hauteur d'eau. La Figure 27 illustre ces deux concepts dans une conduite dans laquelle un écoulement est présent.

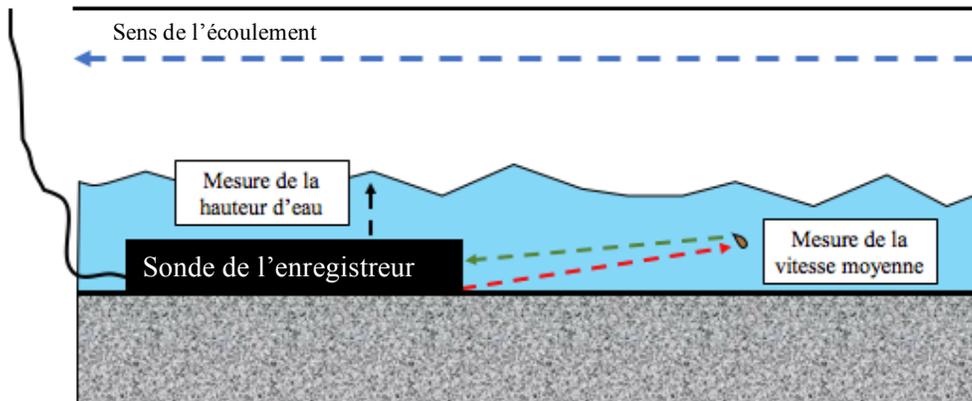


Figure 27 – Principe de base du fonctionnement de l'enregistreur de débit

Ces deux mesures sont converties ensuite par l'enregistreur pour l'obtention d'une mesure de débit. Plusieurs équations peuvent être utilisées pour obtenir ce résultat, par exemple, à partir de l'aire d'écoulement ou selon l'équation de Manning lorsque les conditions du terrain s'y prêtent. Pour les besoins du projet, le calcul de débit à partir de l'aire d'écoulement est expliqué. Selon cette méthode, les débits sont obtenus en multipliant l'aire de l'écoulement de la conduite avec la vitesse moyenne. Pour sa part, l'aire d'écoulement est calculée à partir de la hauteur d'eau mesurée dans la conduite (Éq. 1).

$$A = \frac{D^2}{8} (\theta - \sin\theta), \quad \text{Éq. 1}$$

avec $\theta = 2 \arccos\left(1 - \frac{2h}{D}\right)$

où A est l'aire de la section d'écoulement (m^2), D est le diamètre de la conduite (0,250 m) et h est la hauteur d'eau mesurée dans la conduite (m). Pour faciliter la compréhension, la Figure 28 identifie chacun de ces paramètres.

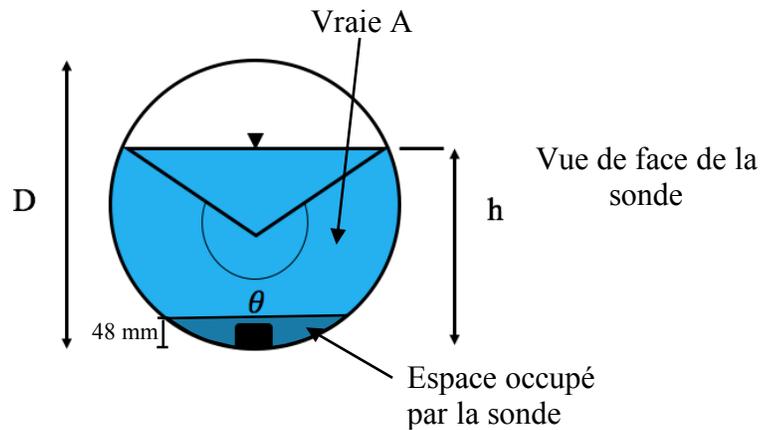


Figure 28 – Paramètres du calcul de l'aire d'écoulement

Lors de la mise en place de la sonde en début de projet, une hauteur d'eau de 48 mm a été mesurée au-dessus de la sonde, alors qu'aucun écoulement n'était observé. La présence de cette lame d'eau dans la conduite peut être expliquée par l'effet de la pente nulle de la conduite reliant les BR. Les eaux peuvent s'accumuler dans la conduite, cette hauteur variant dans le temps. Cette mesure est également influencée par la hauteur physique de la sonde installée au fond de la conduite causant ainsi un obstacle à l'écoulement. Une correction a donc dû être effectuée pour représenter l'écoulement réel des eaux sortant de la conduite en soustrayant l'aire correspondant à une hauteur de 48 mm comme le montre la Figure 28. De ce fait, il a été décidé que les débits dont la hauteur d'eau mesuré est de moins de 48 mm soient égales à 0 L/min.

4.2.2 Résultats de l'analyse des débits enregistrés

N'ayant pas effectué de test de calibration en laboratoire, les mesures prises par l'enregistreur de débits ont, dans un premier temps, été analysées pour s'assurer de leur validité. Pour ce faire, les données récupérées lors de l'événement du 3 septembre 2017 où 30,7 mm de pluie sont tombés ont été utilisées. La Figure 29 rapporte les débits et les vitesses obtenus lors de cette journée.

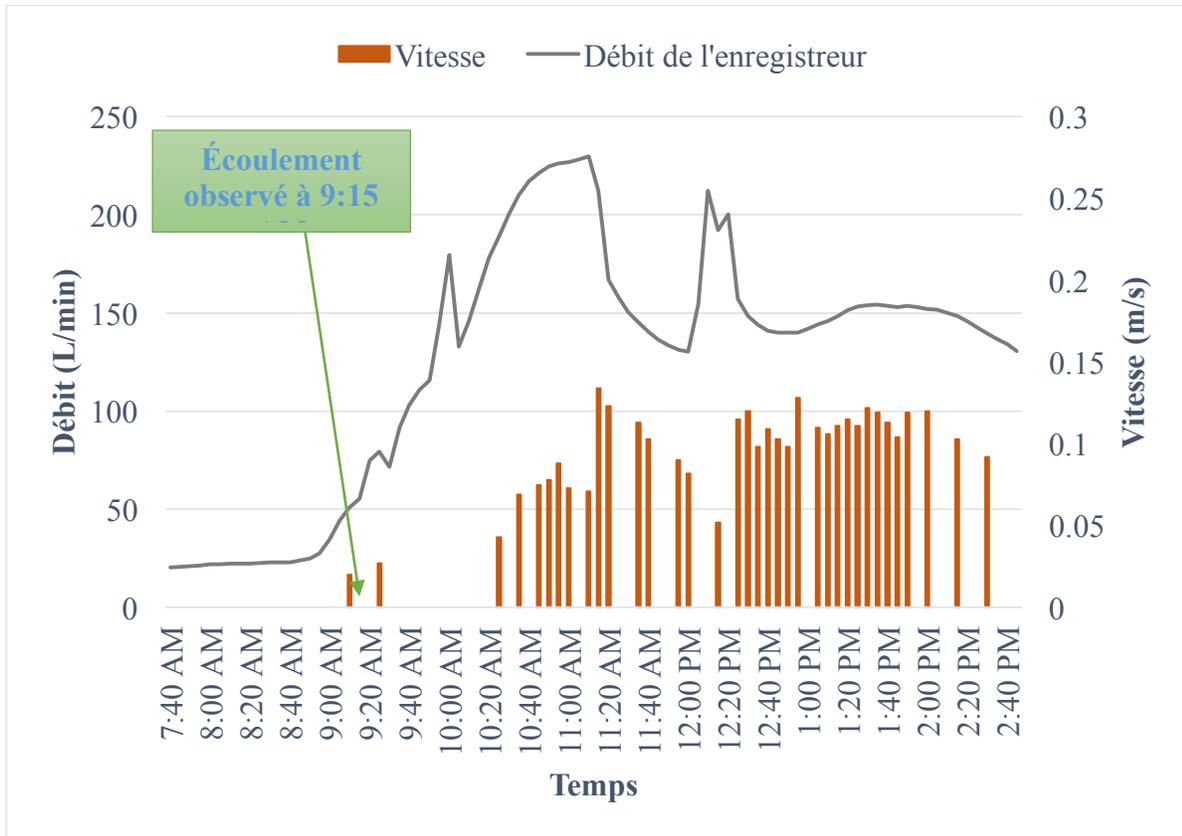


Figure 29 - Vitesses et débits obtenus par l'enregistreur de débit pour l'événement du 3 septembre 2017

La courbe grise représente les débits convertis par l'enregistreur à partir de l'équation de Manning et les bandes orangées correspondent aux vitesses lues par la sonde. Dans ce graphique, on remarque que la lecture des vitesses ne se fait pas en continue. En fait, à plusieurs reprises, l'appareil enregistre une vitesse de zéro alors qu'un écoulement à la sortie des BR a été observé. Par exemple, aucune vitesse n'a été détectée entre 9:30 et 10:30 du matin bien qu'il y eût un écoulement à partir de 9h15. Ces lectures nulles pourraient être expliquées, en partie, par la présence de débris s'étant déposés, bloquant ainsi l'émission et la réception des ondes. Toutefois, puisqu'aucun débris n'a été observé à la sortie de la conduite, cette hypothèse n'explique pas l'ensemble des lectures nulles. Ainsi, on suppose une défectuosité de la sonde à mesurer en tout temps la vitesse moyenne de l'écoulement.

En ce qui concerne les débits, l'analyse de la courbe grise montre que l'enregistreur mesure en tout temps des valeurs, malgré l'obtention occasionnelle de vitesses nulles. Par exemple, à la Figure 29, aucun écoulement à la sortie de la conduite n'a été observé avant 9:15 AM, alors que

l'enregistreur estime un débit de base d'environ 25 L/min. Ce débit est expliqué par le fait que la conduite est constamment remplie d'eau. En fait, lorsqu'il y a un écoulement, mais qu'aucune vitesse n'est détectée, l'enregistreur estime les débits à partir de la lecture des hauteurs d'eau en utilisant l'équation de Manning. Pour appuyer ce fait, la Figure 30 illustre la relation entre les débits enregistrés et les hauteurs d'eau mesurées.

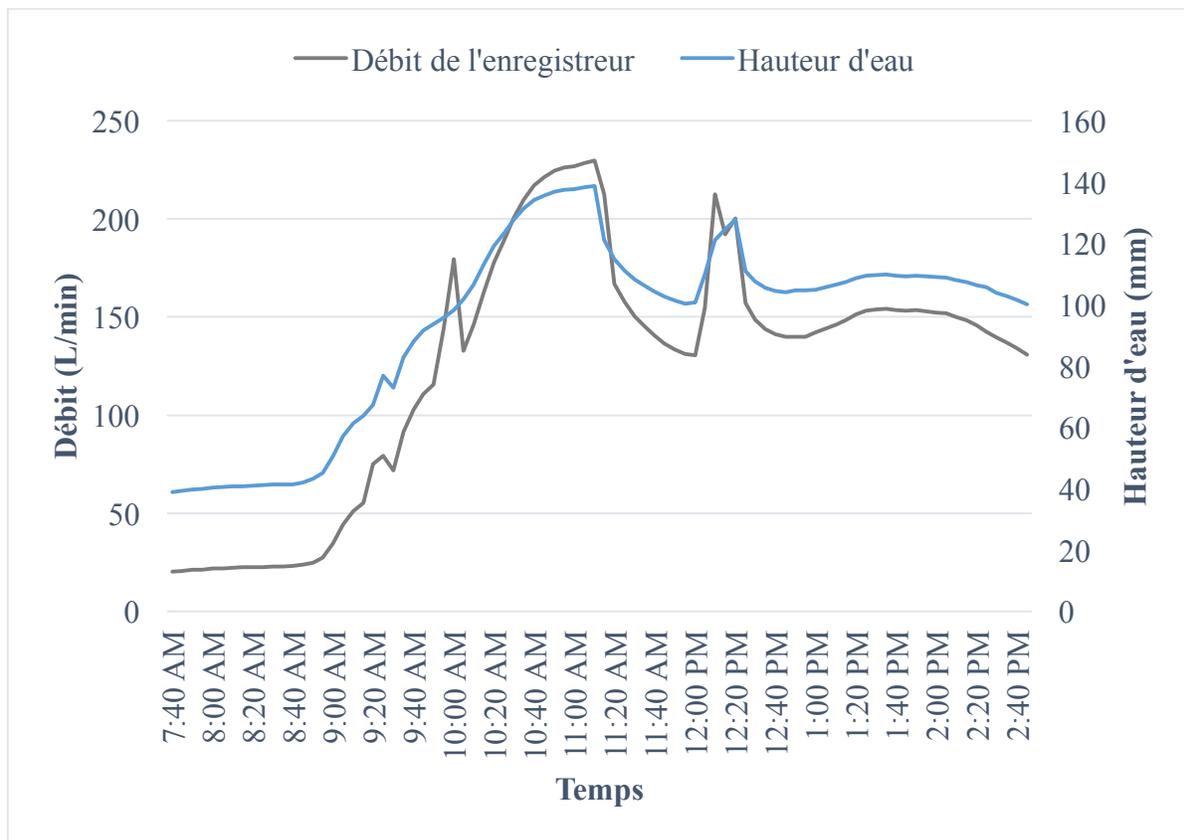


Figure 30 - Hauteur d'eau mesurée et débit obtenus par l'enregistreur de débit pour l'événement du 3 septembre 2017

Dans ce graphique, le débit suit la même tendance que la mesure de hauteur d'eau. Ainsi, pour les pas de temps où la vitesse enregistrée est nulle, l'enregistreur calcule un débit proportionnel à la hauteur d'eau mesurée et la dernière mesure de vitesse enregistrée. Un ajustement des hauteurs d'eau a donc dû être effectué. Celui-ci est expliqué dans la section 4.2.3 subséquente intitulée « Correction des mesures de l'enregistreur et estimation des débits ».

Pour ce même événement, des mesures de débit ont également été prises manuellement à l'aide de la méthode volumétrique et du déversoir à jaugeage volumétrique. Pour ce faire, un

volume d'eau a été prélevé à la sortie de la conduite des BR selon un intervalle de temps prédéterminé à partir du filet d'eau créé par le déversoir. Une fois le temps écoulé, une seconde mesure de débit a directement été prise avec ce même appareil. Pour faciliter la compréhension, la Figure 31 illustre les étapes suivies.



Figure 31 – Mesure de débits pour l'événement du 3 septembre 2017

L'utilisation de ces deux méthodes permet d'avoir deux mesures de débits pour un même temps (exemple : 11h15). Ces débits ont ensuite été comparées avec ceux estimés par l'enregistreur (Figure 32).

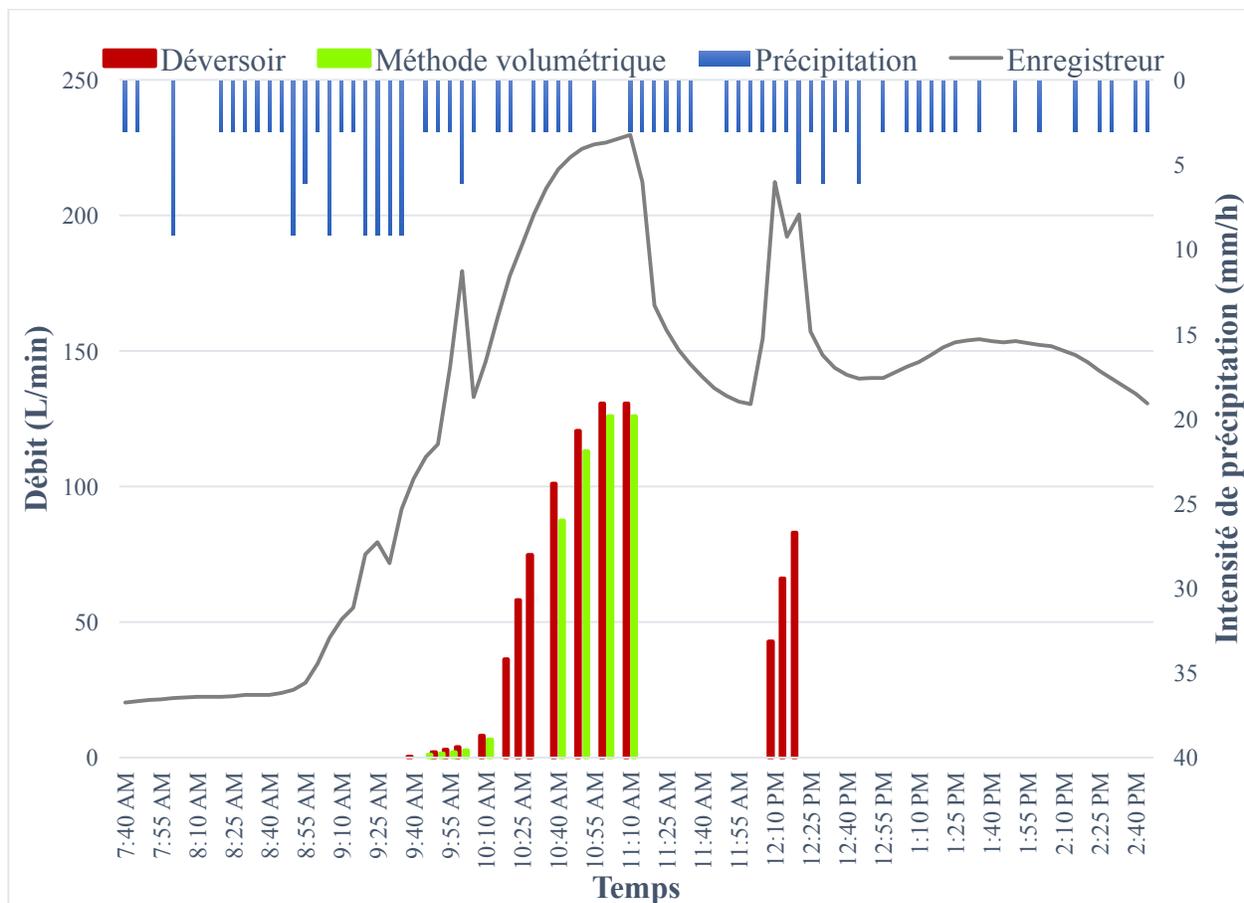


Figure 32 - Comparaison des méthodes de calcul de débits

La courbe grise représente les débits estimés par l'enregistreur à partir de l'équation de Manning alors que les bandes verte et rouge correspondent respectivement aux débits mesurés de manière ponctuelle grâce à la méthode volumétrique et par le déversoir à jaugeage volumétrique. On observe, dans un premier temps à la Figure 32, que les débits provenant des mesures prises selon la méthode volumétrique donnent des valeurs similaires à celles du déversoir à jaugeage volumétrique. Bien que la validation du déversoir à jaugeage volumétrique ne fût pas recherchée, cette comparaison montre tout de même que cet appareil permet de mesurer des débits étant représentatifs du comportement hydraulique des BR. Dans un deuxième temps, la comparaison des données montre que les débits mesurés par l'enregistreur sont en tout temps supérieurs aux données mesurées manuellement. Ainsi, les données de débits calculés par l'enregistreur ne sont pas valides et ne peuvent pas être utilisées telles quelles. De plus, considérant la pente nulle de la conduite des BR, l'utilisation de l'équation de Manning (Équ. 2) n'est pas appropriée pour le calcul des débits.

$$V = \frac{k}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Où V est la vitesse moyenne de l'écoulement (m/s), k est une constante de conversion (1 pour le système international), n est le coefficient de rugosité de Manning, R_h est le rayon hydraulique (m) et S la pente de la ligne d'énergie (m/m).

En fait, la pente de la conduite étant nulle, la ligne d'énergie est donc égale zéro, ce qui rend impossible le calcul de la vitesse. Ainsi, pour obtenir des valeurs de débits, l'aire d'écoulement obtenue à partir des lectures de hauteurs d'eau de l'enregistreur a été multipliée par les mesures de vitesses moyennes de ce même appareil. La Figure 33 illustre les débits ainsi calculés ainsi que les mesures prises manuellement.

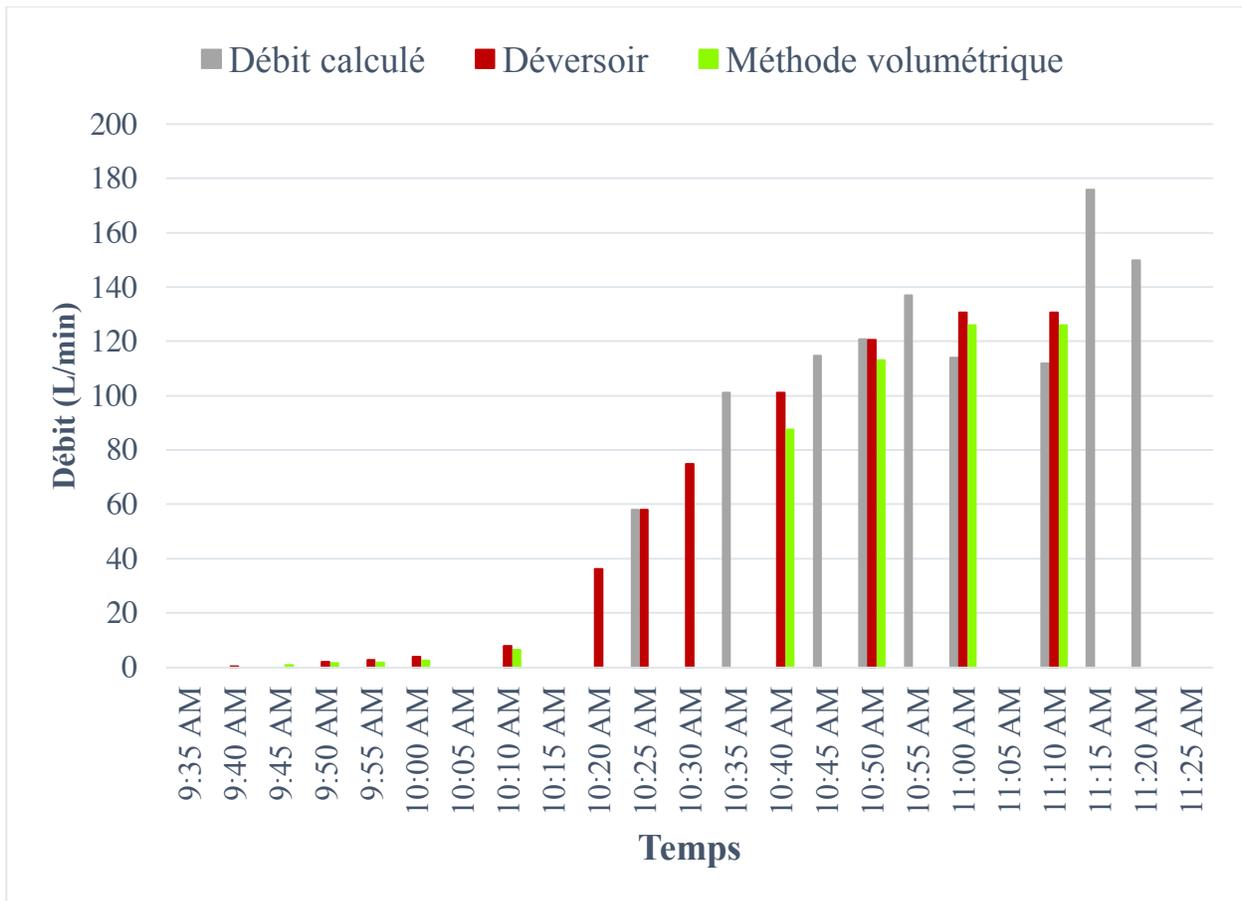


Figure 33 - Validation des débits sortant des BR

À la Figure 33, un petit écart entre les débits calculés à partir des lectures de hauteurs d'eau (aire d'écoulement) et des vitesses de l'enregistreur et ceux pris manuellement peut être observé. Cet écart est attendu puisqu'une distance de 15 m ainsi qu'un regard séparent les points de mesure (Figure 34).



Figure 34 – Points de mesure de débits

La diminution des débits à la sortie des BR est causée par les pertes de charge dues à la paroi de la conduite. Ces pertes de charge par frottement font diminuer les vitesses puisque les deux points de mesure sont à la même élévation et que l'écoulement est à surface libre. Ainsi, pour une même surface d'écoulement, puisque la vitesse diminue, le débit diminue également. À la lumière de ces informations, les débits calculés à partir des hauteurs d'eau et des vitesses de l'enregistreur ont été validés et ont été utilisés pour le projet étant donné que le petit écart observé est expliqué par un phénomène physique.

4.2.3 Correction des mesures de l'enregistreur et estimation des débits

Comme l'ont montré les sections précédentes, les données brutes des débits mesurés par l'enregistreur ne représentent pas le comportement hydraulique réel des BR. Une première correction doit tout d'abord être apportée pour corriger à la baisse les hauteurs d'eau mesurées en remplaçant toutes les hauteurs d'eau inférieures ou égales à 48 mm par 0 mm, ce qui correspond à des débits nuls. Dans le cas où une hauteur d'eau de plus de 48 mm a été mesurée, mais qu'aucun débit à la sortie des BR n'a été observé, la correction a été basée sur la moyenne des valeurs de

hauteur d'eau associées au débit de base mesuré par l'enregistreur avant l'événement étudié. Ainsi, pour chaque événement, les étapes ci-dessous ont été suivies pour effectuer la correction:

1. Déterminer la hauteur d'eau correspondant au débit de base mesuré par l'enregistreur (48 mm ou moyenne des débits de base précédent la pluie) et la soustraire des autres mesures du même événement. Lors de cette étape, les hauteurs d'eau négatives doivent également être remplacées par 0 mm;
2. Calculer les débits en multipliant l'aire de l'écoulement (trouvée à partir des hauteurs d'eau corrigées) avec les mesures de vitesse de l'enregistreur;
3. Compléter la courbe de débits en effectuant une règle de trois entre les hauteurs d'eau corrigées et les débits calculés à partir d'une lecture de vitesse positive pour estimer les débits des vitesses manquantes ou nulles.

Pour mieux comprendre, l'Annexe 4 explique en détail la démarche à suivre. Il est à noter que les débits corrigés donnent une approximation de ceux pouvant être observés sur le terrain. En fait, il est difficile de mesurer de petits débits dans un emplacement n'ayant pas été prévu à cet effet. De plus, étant donné que la méthode de correction employée se base principalement sur les hauteurs d'eau corrigées, il se peut que les débits calculés surestiment les débits sortant des BR. Il serait donc pertinent d'effectuer d'autres campagnes de mesure pour valider la méthode employée.

4.3 Résultats de la modélisation SWMM

Pour évaluer la performance des PGOs, SWMM a été utilisé. Cette section-ci est donc consacrée à la description générale du modèle ainsi qu'aux résultats découlant de la validation du modèle.

4.3.1 Description générale du modèle

Le modèle SWMM a été conçu de manière à représenter l'écoulement des eaux de pluie tel qu'il a été observé sur le terrain de sorte à estimer les débits qui ne peuvent pas être mesurés. Par exemple, les eaux de pluie qui ruissellent sur la toiture rétractable des serres ont été dirigées vers le pavé piétonnier qui lui-même rejette ses eaux vers le stationnement principal. Pour représenter l'ensemble du comportement hydraulique, le marché public a été divisé en 68 sous-bassins. Ceux-ci ont été délimités selon la nature de la surface (surfaces asphaltées et végétalisées,

la toiture du bâtiment principal et des serres, le pavé piétonnier, etc.) et la pente de la surface. Suivant cette catégorisation, la superficie imperméable de ces bassins est de 100 % ou 0%. Pour développer le modèle SWMM, les différents intrants permettant de caractériser les bassins ont essentiellement été tirés des plans de conception de la firme de génie Vince Consultants. Les critères de conception du modèle ne provenant pas des plans ont été trouvés à partir de guides de référence (EPA, 2015; MDDELCC, 2012; Annexe 5). Le modèle Green-Ampt a été utilisé pour estimer l'infiltration des eaux de ruissellement dans les PGOs ainsi que l'option « Dynamic wave » pour représenter l'écoulement de surface. Afin d'obtenir une estimation des débits entrant et sortant des PGOs, les données de précipitation des campagnes d'échantillonnage ont été intégrées au modèle selon un intervalle de temps de cinq minutes.

Pour représenter les PGOs dans le modèle, le module LID a été utilisé. Les critères de conception des infrastructures aménagées au marché public ont été obtenus à partir des plans de conception présentés dans la section 3.1 «Description du site à l'étude». Un rapport transmis à la Direction de l'épuration des eaux usées de la Ville de Montréal (Vinci Consultants, 2016) a également été utilisé comme référence. L'Annexe 6 présente les critères de conception des PGOs mises en place dans les chaînes de traitement étudiées.

Quelques modifications ont été apportées au modèle à la suite des observations effectuées sur le terrain. Tout d'abord, les filtres à sable aménagés de part et d'autre du marché ont été retirés, car aucun écoulement n'a été noté lors des visites de terrain en temps de pluie. Dans cette optique, les sous-bassins dont les eaux se rejettent dans ces deux PGOs n'ont donc pas été considérés. Également, le réservoir souterrain destiné à l'entretien du marché n'a pas été modélisé. N'ayant pas suffisamment d'informations sur son usage, le fonctionnement de son trop-plein et le niveau d'eau initial, les eaux ruisselant sur le toit du bâtiment n'ont pas été prises en compte. Dans le modèle, cela a pour effet de légèrement sous-estimer les débits entrant dans le BRP. Toutefois, considérant la surface drainée, cela ne représente qu'un faible volume d'eau.

Avant de déterminer la performance hydraulique des PGOs, une calibration du modèle SWMM a été effectuée en comparant les mesures prises sur le terrain lors des campagnes d'échantillonnage avec les débits estimés par le logiciel. Cette analyse est présentée à la prochaine section.

4.3.2 Validation du modèle SWMM

Calibration des cellules de biorétention

Étant donné l'acquisition de données en continu à la sortie des BR, une première validation du modèle SWMM a été réalisée en effectuant une calibration entre les débits mesurés et simulés sortant de cette PGO. Un calage manuel visant à reproduire le volume mesuré a été réalisé en ajustant trois paramètres : la conductivité hydraulique du substrat, le degré de saturation initial et le coefficient de drain. Le choix de ces paramètres a été basé sur l'effet qu'ils produisent sur l'hydrogramme (Tableau 13). La pluie du 18 août 2017 a servi pour une première calibration. Comme indiqué dans la section 4.1 «Caractérisation des pluies échantillonnées», cette pluie a été définie comme étant un orage où une hauteur de 20,6 mm d'eau est tombée en 2 heures. Les valeurs des paramètres de calibration sont également présentées au Tableau 13.

Tableau 13 – Paramètres de calibration des BR

Paramètres de calibration	Valeur	Effet sur la courbe de débit
Conductivité hydraulique du substrat	400 mm/h	Effet sur la pente ascendante de l'hydrogramme et sur le débit de pointe
Teneur initiale en eau	20 %	Effet sur le début de l'écoulement et les volumes
Coefficient de drain	1,6	Effet sur la pente descendante de l'hydrogramme

Les résultats de la calibration de la pluie du 18 août 2017 sont illustrés à la Figure 35.

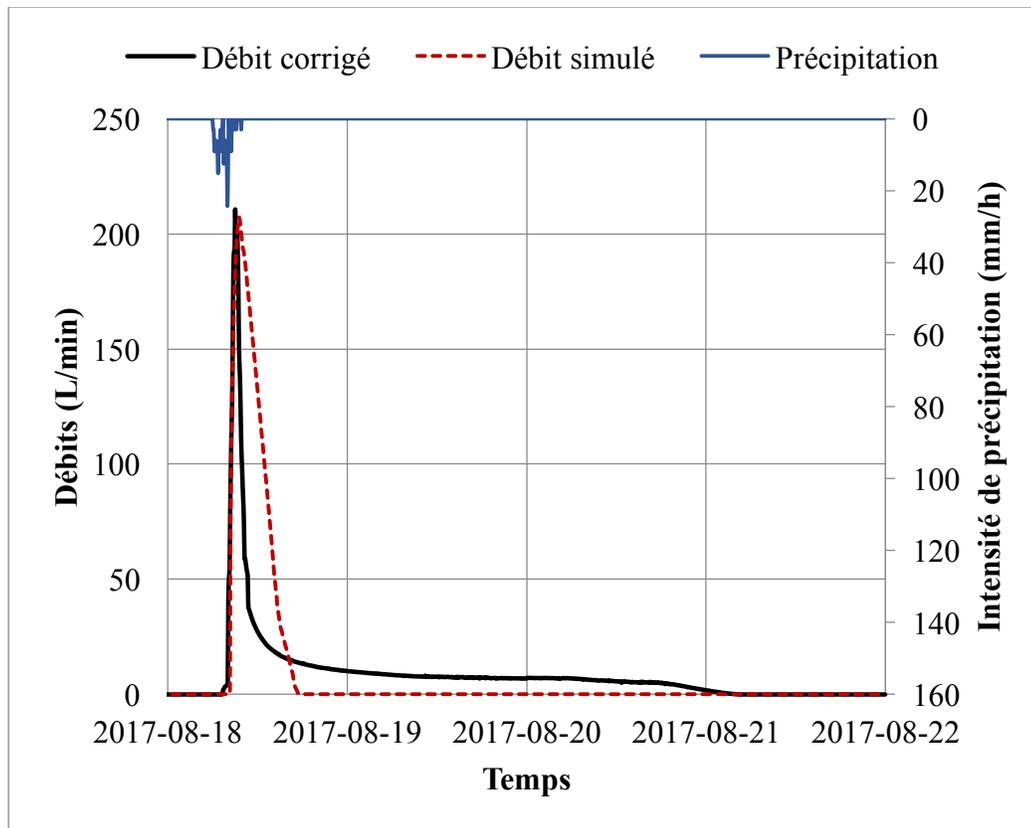


Figure 35 - Calibration des débits sortant des BR du 18 août 2017

La courbe noire représente les débits corrigés de l'enregistreur et la courbe pointillée rouge renvoie aux débits estimés par le modèle SWMM. Pour calibrer le modèle SWMM, quatre critères ont été utilisés : le décalage entre les débits mesurés et simulés (début des débits et débits de pointe), les débits de pointe et les volumes. La calibration a été effectuée qualitativement. Aucun indicateur statistique n'a été utilisé pour la comparaison des courbes. Les résultats de la pluie du 18 août 2017 sont présentés au Tableau 14.

Tableau 14 – Résultats de calibration des BR du 18 août 2017

Critères de calibration	Débits corrigés	Débits simulés	Résultats obtenus
Décalage entre le début des débits	-	-	Intervalle de temps : 1h10
Décalage des débits de pointe	-	-	Intervalle de temps : 15 min
Débits de pointe (L/min)	221	208	Rapport : 1,01
Volumes (m ³)	52	55	Rapport : 0,95

A priori, ces résultats sont satisfaisants. Trois critères sur quatre sont jugés acceptables, soit le décalage des débits de pointe et les rapports des débits de pointe ainsi que des volumes. Un décalage entre les débits de pointe de 15 min a été obtenu ainsi que des rapports de débits et des volumes de près de 1 ont été obtenus, ce qui est désiré. Seul le décalage entre le début des débits est légèrement élevé avec un intervalle de temps de 1h10. Toutefois, pour obtenir des débits de pointe et des volumes similaires, les pertes par dépression des aires de stationnement ont dû être ajustées à 10 mm, ce qui est une valeur très élevée par rapport à celles de la littérature. De plus, la courbe des débits simulés ne représente pas entièrement le comportement hydraulique des BR. En fait, sous des conditions orageuses, l'hydrogramme des débits mesurés est caractérisé par une montée rapide, puis une descente lente où l'évacuation des eaux de ruissellement s'échelonne sur près de trois jours. Or, l'hydrogramme des débits simulés reproduit bien la montée rapide, mais n'arrive pas à représenter adéquatement l'évacuation lente des eaux de ruissellement.

Les paramètres de calibration présentés au Tableau 13 ont également été repris pour l'estimation des débits sortant des BR de la pluie du 24 juillet 2017 où une hauteur de 8 mm de pluie est tombée en près de 20 heures correspondant à une pluie modérée. Les résultats sont montrés au Tableau 15 et à la Figure 36.

Tableau 15 – Résultats de validation des BR du 24 juillet 2017

Critères de calibration	Débits corrigés	Débits simulés	Résultats obtenus
Décalage entre le début des débits	-	-	Intervalle de temps : 19 h
Décalage des débits de pointe	-	-	Intervalle de temps : 8 h 35 min
Débits de pointe (L/min)	21	75	Rapport : 0,28
Volumes (m³)	28	16	Rapport : 1,71

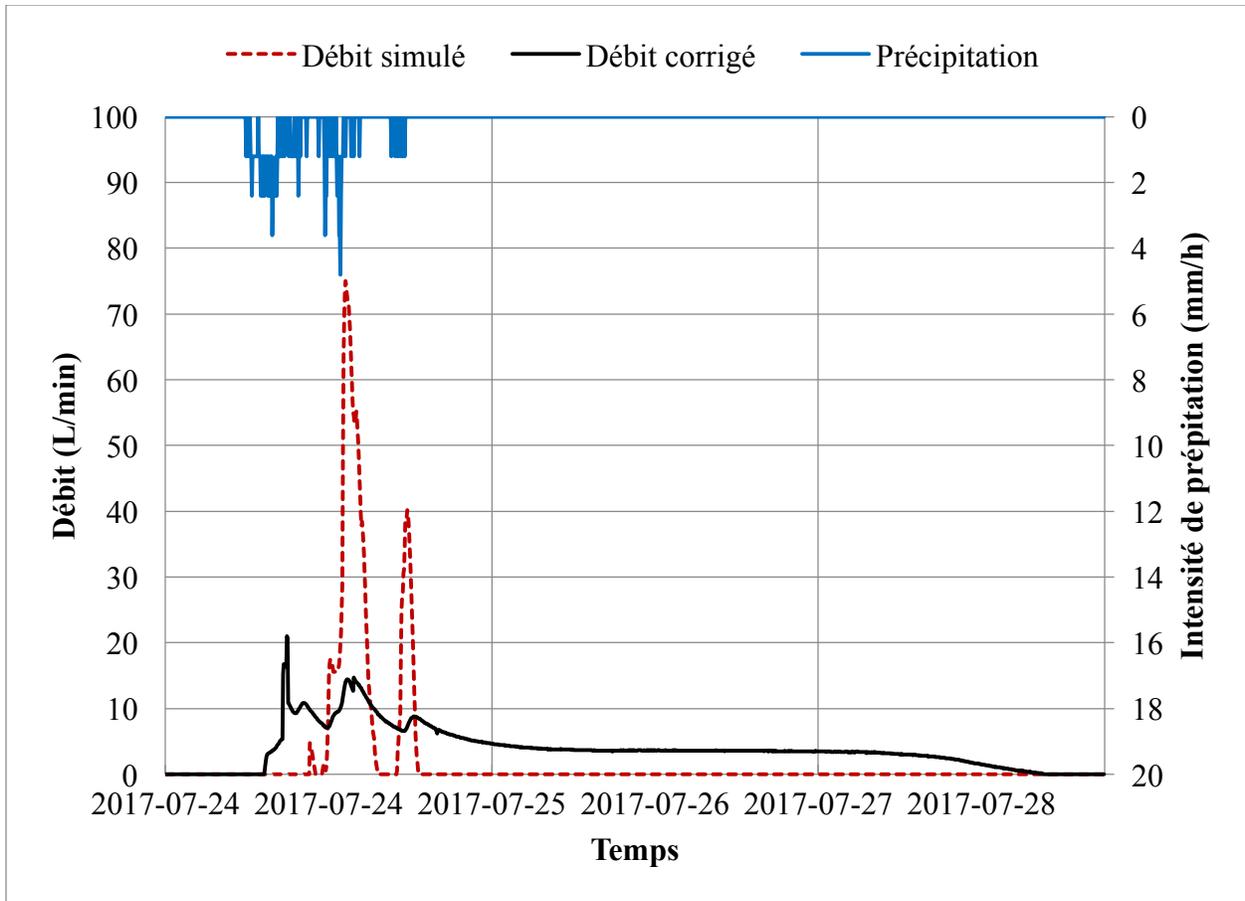


Figure 36 - Validation des débits sortant des BR du 24 juillet 2017

La comparaison des courbes de débits mesurés et simulés montre que le choix des paramètres de calibration de la pluie du 18 août 2017 n'est pas adéquat pour représenter le comportement hydraulique du 24 juillet 2017. Visuellement, un décalage des débits de plusieurs heures et des débits de pointe supérieurs à ceux trouvés sur le terrain ont été observés. Des écarts de 19 h et de plus de 8 h sont observés entre le début des débits et les débits de pointe, ce qui est élevé. De plus, des rapports de 0,28 et 1,71 ont respectivement été calculés pour les débits de pointe et les volumes, ce qui n'est pas jugé satisfaisant. De plus, comme pour la pluie du 18 août 2017, le calage du modèle SWMM ne permet pas de reproduire l'évacuation graduelle des eaux de pluie. L'emploi d'un même modèle SWMM permettant de reproduire le comportement des BR pour différents événements de précipitation n'a donc pas été possible.

Des mesures supplémentaires doivent être réalisées sur le terrain pour améliorer la modélisation des BR dans SWMM. Tout d'abord, un échantillon de sol devrait être prélevé dans le but d'évaluer la conductivité hydraulique du substrat. La valeur inscrite au Tableau 13 est une valeur trouvée par essai-erreur, mais qui respecte l'ordre de grandeur de celle du fournisseur.

La mesure de l'humidité du sol a également été problématique lors des visites de terrain en temps de pluie. En fait, cette mesure était limitée par les déplacements de la personne responsable de l'échantillonnage. À certaines reprises, l'arrivée de la personne s'est effectuée après le début de la pluie. Ainsi, la teneur en eau initiale du sol n'a pas pu être mesurée. Une mesure en continu de l'humidité du sol pourrait faciliter la prise de données.

Cas de la tranchée drainante

Pour la calibration du modèle SWMM de la TD, les seules données ayant pu être récupérées sur le terrain lors de la deuxième campagne d'échantillonnage de l'été 2017 sont l'humidité du sol ainsi que les heures où l'écoulement a été observé à partir de la variation du niveau d'eau. Dû à la configuration et l'enrochement de cette PGO, des mesures de débit à sa sortie n'ont pas pu être prises. En fait, puisque la conduite a été installée avec une faible pente (0,15%), une lame d'eau était constamment visible à la sortie de la conduite, ce qui rendait difficile la prise de données. La Figure 37 illustre ce propos. De plus, étant donné que la sortie de conduite était située à la même élévation que le fond du BS, en temps de pluie, la conduite pouvait être complètement submergée comme montré à la Figure 38.



Figure 37 - Sortie de la TD (Photo prise le 14 avril 2017)

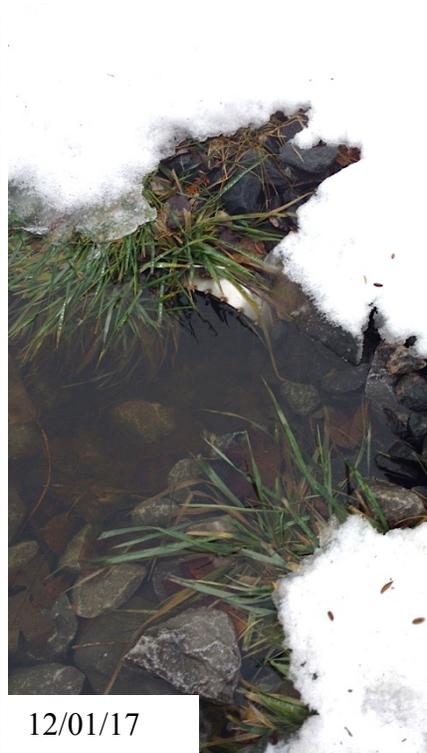


Figure 38 - Sortie de la TD

À la lumière de ces informations, le déversoir à jaugeage volumétrique ne pouvait pas être utilisé, car la conduite n'était pas suffisamment élevée pour générer un écoulement à jet libre.

Par manque de données de terrain, les paramètres caractérisant la TD dans le modèle SWMM n'ont donc pas pu être validés. La mesure de l'humidité ainsi que les heures d'écoulement ne sont pas des critères suffisants pour calibrer la PGO. N'ayant aucune certitude sur la validité des débits estimés par le logiciel, le modèle n'a donc pas été utilisé. Par conséquent, l'évaluation de la performance hydraulique de la TD n'a pas pu être réalisée grâce à un bilan hydrique.

Pour valider les débits estimés par le modèle SWMM, il serait pertinent d'obtenir des données en continu de la variation du niveau d'eau ainsi que de la vitesse moyenne de l'écoulement. Avec ces deux mesures, les débits sortant de la TD pourraient être estimés et permettre le calage du modèle SWMM.

Cas du bassin avec retenue permanente

Pour le BS, les heures d'écoulement et quelques mesures ponctuelles de débit ont été prises lors des visites sur le terrain. Ces mesures ne sont toutefois pas suffisantes pour le calage du modèle SWMM, car elles n'ont pas pu être effectuées sur toute la durée de l'écoulement observé à l'exutoire du BS. En fait, le BS laisse écouler les eaux de pluie sur plusieurs jours, ce qui rend difficile la prise de données en continu. Ainsi, les données récupérées ne représentent qu'une partie de l'hydrogramme. Le débit de pointe et la décrue n'ont pas pu être mesurés lors d'un même événement en raison de la prise de mesure ponctuelle. L'ajout d'un enregistreur de débits à la sortie de la conduite faciliterait la collecte de données de cette PGO.

En ce qui a trait au BRP, aucune mesure n'a été effectuée sur cette PGO. Aucun appareil de mesure n'a pu être installé dû à la configuration de la sortie de ce bassin (Figure 39).

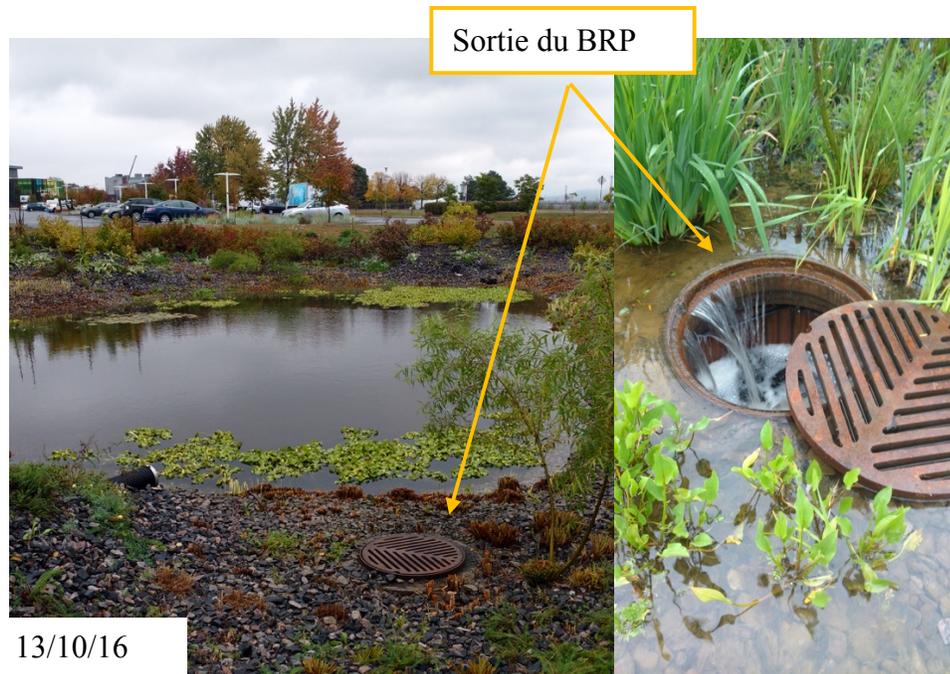


Figure 39 - Sortie du BRP

Lorsque le niveau atteint la hauteur maximale admise, les eaux se rejettent directement dans le regard dont la conduite de sortie est connectée au réseau municipal. Selon cette configuration, l'estimation des débits ne peut pas être effectuée par la méthode volumétrique, car les eaux s'écoulent sur toute la circonférence du regard. Ainsi, lors des campagnes d'échantillonnage, seule l'heure où l'écoulement débutait a été prise en note. Comme pour la TD et le BS, n'ayant pas suffisamment d'information concernant le comportement du BRP, les débits entrant et sortant estimés par SWMM n'ont pas pu être validés.

Résultat de la calibration de la TD, BS et BRP

On a vu dans les paragraphes précédents que la prise de mesures au marché public est limitée par la configuration des PGOs, mais aussi par les déplacements de la personne responsable du projet. Il n'a donc pas été possible, avec les données récupérées au cours des derniers mois, de valider les débits estimés par SWMM. C'est pourquoi ces débits n'ont pas été utilisés pour évaluer la performance hydraulique des PGOs. SWMM a toutefois été utilisé pour obtenir les débits entrant dans les BR. Ainsi, pour de futurs projets, il pourrait être pertinent de revoir la conception de la sortie des PGOs pour faciliter la prise de mesures manuelles ou en continu et ainsi permettre un meilleur suivi quantitatif des eaux de ruissellement.

4.4 Résultats du suivi quantitatif des PGOs

À partir des données de précipitation validées et des mesures de débits corrigées, la performance hydraulique des PGOs a été évaluée. Les sections suivantes présentent les résultats obtenus en ce qui a trait au suivi quantitatif.

4.4.1 Cellules de biorétention

Grâce aux débits entrant estimés par le modèle SWMM, l'effet des BR sur la quantité des eaux de ruissellement a été déterminé. Les critères choisis pour évaluer la performance hydraulique de ces PGOs sont : la réduction des volumes, la réduction des débits de pointe et la durée de l'écoulement à la sortie des BR. Pour évaluer les deux premiers critères, l'équation 3 a été utilisée :

$$\Delta X (\%) = \left(1 - \frac{X_S}{X_E}\right) \times 100\% \quad \text{Éq 3}$$

Où ΔX correspond au changement du volume ou des débits de pointe entre l'entrée et la sortie des BR (%), X_E est le volume (m^3) ou le débit de pointe (L/min) entrant et X_S est le volume (m^3) ou débit de pointe (L/min) calculé à la sortie. Pour le dernier paramètre, une analyse graphique a été menée sur les courbes de débits mesurés pour chaque événement. Il est à noter que l'évaluation de la performance des BR s'est portée uniquement sur les journées d'échantillonnage où un nombre suffisant de lectures de vitesse a été enregistré. De cette manière, on s'assure d'avoir un hydrogramme représentatif du comportement hydraulique des BR. Pour faciliter la compréhension, la Figure 40 illustre l'hydrogramme des débits de ruissellement et des débits corrigés de l'évènement du 18 octobre 2017 (pluie d'environ 3 heures, 20,6 mm). Les graphiques des autres évènements sont présentés à l'Annexe 7.

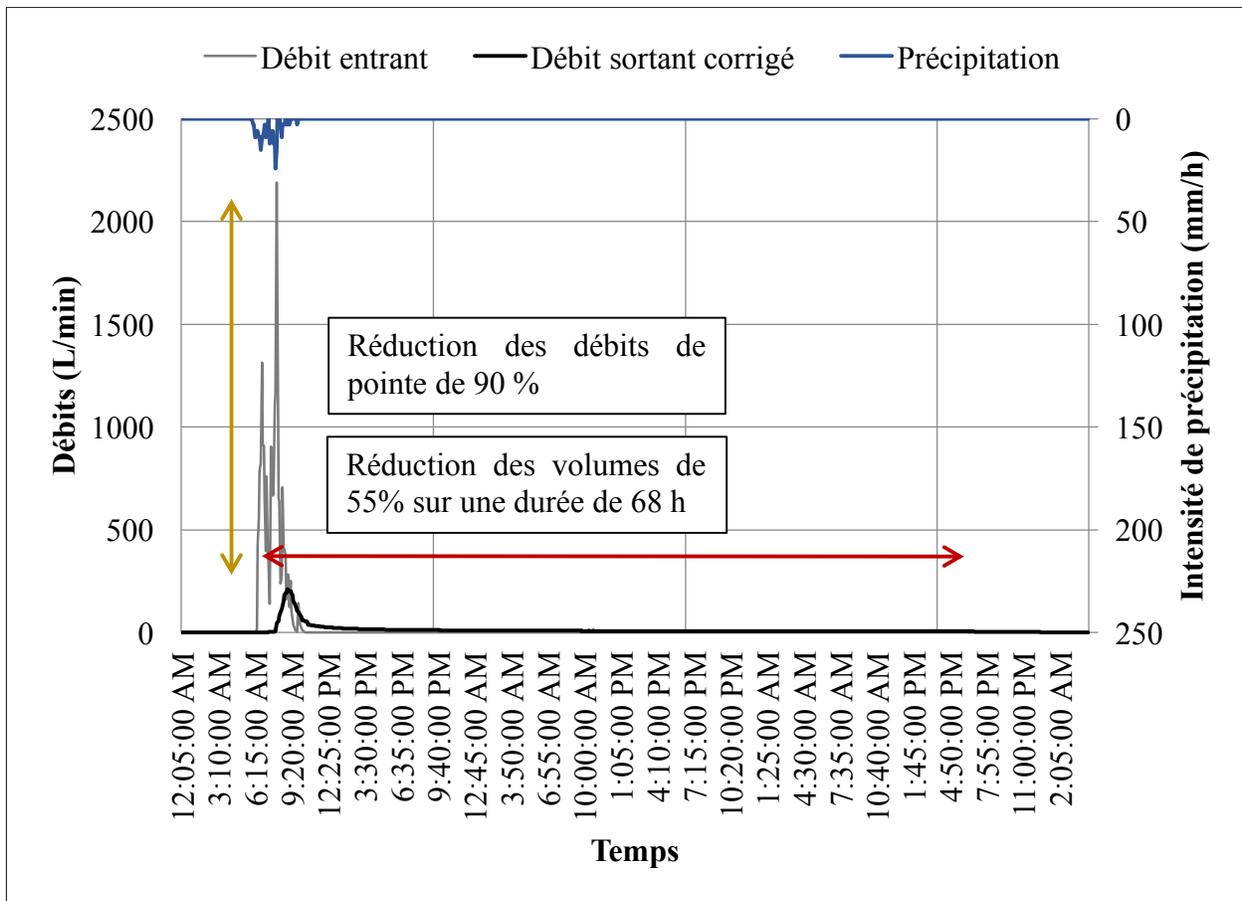


Figure 40 - Performance hydraulique des BR pour l'événement du 18 août 2018

Selon cette figure, les BR permettent la réduction du volume de 55 % sur une durée de 68 h. De plus, on observe une diminution des débits de pointe de 90%. Lors de cette pluie, les BR ont donc permis de réduire les volumes d'eaux générés par l'orage et de les répartir sur une longue période. Cette même analyse a été réalisée sur l'ensemble des pluies (Tableau 16).

Tableau 16 - Effet tampon des cellules de biorétention

Date	Réduction des volumes (%)	Réduction des débits de pointe (%)	Durée de l'écoulement (j)
13/10/16	85	96	0,8
16/10/16	62	96	1,7
25/05/17	69	93	2,4
29/05/17	77	98	2,4
5/06/17	66	86	3,5
27/06/17	60	91	2,3
17/07/17	100	100	-
24/07/17	54	95	4,2
18/08/17	55	90	2,8
Moyenne	70	94	2,5

Selon les résultats obtenus, les BR permettent une réduction des volumes de 54 à 100 %, avec une moyenne de 70 %. Ces résultats sont légèrement inférieurs à ceux obtenus par Geheniau (2014) et Khan et al. (2012) où des réductions de 81 % et de 94 % ont respectivement été observées pour leurs sites d'étude. Une partie du volume s'infiltré donc dans le sol ou s'évapore. Les résultats ont également démontré que les BR permettent une meilleure rétention des eaux de ruissellement en présence d'une petite pluie. En effet, à l'exception de la pluie du 16 octobre 2016, les pluies du 13 octobre 2016 et du 17 octobre 2017, ayant été considérées comme des petites pluies dans la section 4.1 « Caractérisation des pluies échantillonnées », sont associées aux taux de réduction des volumes les plus élevés.

Du mois de mai 2017 au mois d'août 2017, la performance des BR tend également à diminuer. À partir du mois de mai, les plantes sortent de leur dormance. Ces dernières, étant en pleine croissance, ont dû puiser l'eau contenue dans le substrat pour développer leur feuillage et leurs bourgeons. Cette croissance est documentée dans la section 4.6 « Évolution de la végétation ». Les plantes peuvent donc expliquer les pourcentages plus élevés de réduction des volumes pour les pluies des mois de mai et juin. On observe également que la réduction des volumes s'échelonne sur plusieurs jours, avec une moyenne d'environ deux jours et demi. Le temps que prennent les PGOs à évacuer les eaux de pluie a un impact direct sur le réseau municipal, et même sur le cours d'eau récepteur, car cela permet de répartir dans le temps les volumes d'eaux de ruissellement. De cette manière, cela permet de limiter les vitesses d'écoulement vers le cours d'eau.

Parallèlement à la réduction des volumes, l'emploi de BR favorise aussi la réduction des débits de pointe de 86 à 100 % avec une moyenne de 94 %. Khan et al. (2012) ont rapporté des résultats similaires, soit une diminution moyenne des débits de pointe de 96 % variant entre 85 % et 100%. Ainsi, l'aménagement de BR au sein d'un stationnement permet non seulement la réduction des volumes, mais aussi la réduction des débits de pointe.

4.4.2 Tranchée drainante, bassin sec et bassin avec retenue permanente

Étant donné que les débits obtenus par le modèle SWMM n'ont pas pu être validés, l'évaluation de l'effet tampon de la tranchée drainante, du bassin sec et du bassin avec retenue permanente a été basée uniquement sur les observations de terrain. Cette analyse repose sur les heures où le ruissellement et l'écoulement à la sortie des PGOs ont été observés. Ainsi, les temps de décalage montrés au Tableau 17 correspondent au temps entre le moment où les eaux de pluie ont commencé à ruisseler à la surface du stationnement et le moment où l'écoulement à la sortie des PGOs a été observé. Il est à noter que pour la colonne du BS, cela représente le temps que prennent les eaux à passer au travers de la tranchée drainante et du bassin sec. Dans le même ordre d'idée, pour la colonne du BRP, la durée inscrite indique le temps que cela prend pour observer un écoulement à la sortie du bassin. Cette colonne combine donc l'effet de l'ensemble des PGOs aménagées au marché.

Tableau 17 - Décalage des débits des PGOs étudiées

Date	Temps de décalage (min)			
	Sortie TD	Sortie BS	Sortie BR ¹	Sortie BRP
18/08/16	30	-	-	-
25/05/17	30	50	65	122
29/05/17	-	Filet d'eau à l'arrivée	55	125
5/06/17	-	45	45	210
27/06/17	-	-	10	-
17/07/17	-	-	Aucun écoulement	Aucun écoulement
24/07/17	30	40	55	240
18/08/17	45	-	55	120

¹ Résultats obtenus à partir des débits estimés par SWMM et de l'enregistreur de débits

Selon les notes d'observation, la TD permet le décalage des débits entre 30 et 45 minutes. Combiné avec le BS, cet intervalle de temps peut atteindre entre 40 et 50 minutes. Le bassin permet donc une rétention supplémentaire d'une durée d'au moins 5 minutes. Puisque le radier de la conduite de sortie du BS a été installé à la même élévation que le fond, les eaux de ruissellement s'évacuent donc rapidement.

En ce qui a trait aux BR, pour la plupart des événements, l'écoulement à la sortie des cellules a été observé après 45 minutes et pouvant aller jusqu'à 65 minutes suivant le début de la précipitation. La pluie du 27 juin 2017 fait exception dû aux conditions météorologiques orageuses. En fait, de grandes quantités d'eau ont subitement été générées, ce qui a saturé le sol rapidement et engendré un écoulement rapide. De plus, les résultats trouvés pour les BR employées seules sont similaires à ceux de la chaîne impliquant la TD et le BS. Ainsi, lorsque le site ne permet pas le traitement en chaîne, l'emploi de BR peut être avantageux pour réduire les vitesses des eaux de ruissellement atteignant le réseau municipal.

Selon ces mêmes résultats, l'ajout du BRP à la fin des chaînes de traitement permet un décalage des débits variant entre 120 minutes et 240 minutes suite à la génération du ruissellement. Comparativement aux autres infrastructures, il s'avère que ce bassin contribue le plus à la rétention des eaux de ruissellement. En fait, selon la hauteur d'eau initiale du bassin, cela prend au moins une heure avant d'observer un écoulement à son exutoire. Ce niveau d'eau est un facteur important à considérer lors de l'analyse du bilan hydrologique. Plus le niveau d'eau est bas au début d'un événement, meilleurs sont la rétention des eaux et le décalage des débits. Ainsi, pour un futur projet, cette mesure devrait être prise en compte.

Malgré le manque de données permettant l'analyse de la performance hydraulique, les observations effectuées sur le terrain ont démontré que l'aménagement de PGOs en série permet d'augmenter le temps de rétention des eaux de ruissellement. Ainsi, l'enchaînement de ces infrastructures engendre un effet positif par rapport aux PGOs utilisées seules. En fait, la série permet de retarder l'arrivée des eaux de ruissellement dans le réseau municipal.

4.4.3 Performance en conditions hivernales

Dans ce projet de recherche, la performance hydraulique en conditions hivernales n'a pas pu être évaluée. En fait, du mois de décembre 2016 au mois d'avril 2017, aucune donnée de précipitation n'a pu être récupérée sur le terrain, les pluviomètres étant inactifs en hiver. L'installation d'un pluviomètre comportant un élément chauffant serait donc pertinent pour évaluer la performance hydraulique de ces PGOs en conditions hivernales.

Bien qu'il n'ait pas été possible d'évaluer la performance hydraulique de manière quantitative, quelques campagnes d'échantillonnage ont toutefois eu lieu au cours de cette période. On a pu observer que les BR remplissent leurs fonctions malgré l'accumulation de neige à la surface du sol comme on peut le voir à la Figure 41.



Figure 41 - Photos de la sortie et de la surface des BR en conditions hivernales

Les photos du 23 février 2017 et du 28 mars 2017 montrent que les eaux de ruissellement s'accumulent à la surface des BR malgré la présence de neige. Ces eaux s'infiltrent par la suite dans le sol, puis sont évacuées vers le BRP via la conduite perforée. Ce type de PGOs reste donc fonctionnel en conditions hivernales. Les autres PGOs impliquées dans les chaînes de traitement étudiées, soit la TD, le BS et le BRP sont également fonctionnelles en temps froid. En effet, un écoulement à la sortie de ces PGOs a été observé comme montré à la Figure 42.

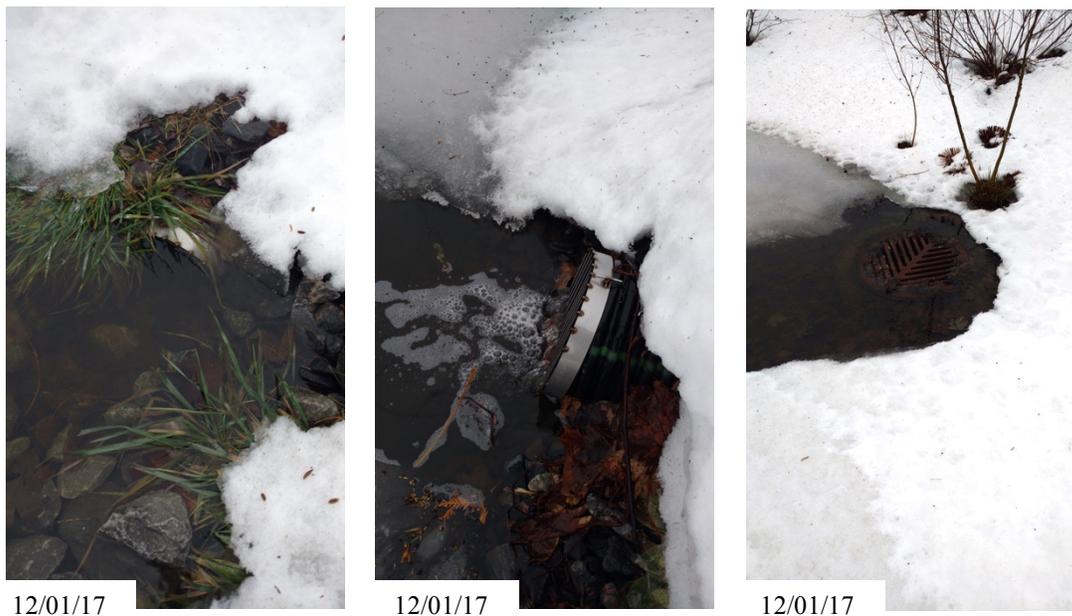


Figure 42 - Conduite de sortie de la TD (droite), du BS (milieu) et exutoire du BRP (gauche)

4.5 Résultat du suivi qualitatif des PGOs

À partir des campagnes d'échantillonnage, l'efficacité d'enlèvement des contaminants a été évaluée. Les prochaines sections font part de l'analyse de ces résultats.

4.5.1 Caractérisation des eaux de ruissellement

Du mois de juin 2016 au mois d'août 2017, entre 7 et 13 évènements de pluie ont servi pour la caractérisation des eaux de ruissellement du stationnement arrière et du stationnement principal du marché public. Les résultats des analyses menées sur les MeS, DCO, P et N sont résumés au Tableau 18. Les résultats de chacune des campagnes sont présentés dans la section 4.5.2 « Efficacité d'enlèvement des contaminants des PGOs ».

Tableau 18 – Résultats de la caractérisation des eaux de ruissellement

	Stationnement arrière				Stationnement principal			
	n	Moyenne	Médiane	Gamme de valeurs	n	Moyenne	Médiane	Gamme de valeurs
MeS (mg/L)	13	48	21	4-205	12	78	47	9-238
DCO (mg/L)	12	52	36	20-123	11	79	70	12-226
P (mg/L)	9	0,27	0,27	< 0,03-0,80	7	0,31	0,25	< 0,03-0,76
N (mg/L)	9	1,7	1,8	1,1-2,4	7	1,3	1,3	< 0,3-2,5

Pour l'ensemble des paramètres, les concentrations trouvées à l'arrière du marché et dans le stationnement principal sont du même ordre de grandeur. Toutefois, il s'avère que les concentrations à la surface du stationnement principal sont légèrement supérieures à celles du stationnement arrière dans le cas des MeS et de la DCO. Une moyenne de 78 mg/L en MeS a été trouvée pour le stationnement principal alors que le stationnement arrière a une moyenne de 48 mg/L. Cet écart s'explique par le fait que le stationnement principal est davantage sollicité par les usagers. Les déplacements étant plus fréquents dans cette section du marché, cela peut favoriser l'apport et le dépôt de contaminants à la surface du sol via les automobiles. Une seule pluie rapporte la situation inverse, soit la pluie du 9 juillet 2016. Une concentration moyenne en MeS de 64 mg/L a été trouvée dans le stationnement arrière alors qu'une concentration de 57 mg/L a été obtenue dans le stationnement principal. Bien que la différence entre ces deux concentrations soit petite, l'écart entre ces valeurs est de plus de 10 %, ce qui peut être considéré comme significatif. Lors de cette journée, une compétition sportive avait lieu dans le voisinage. Étant située à proximité, plusieurs voitures se stationnaient à l'arrière du marché, ce qui a pu favoriser l'apport de MeS à l'arrière. Ces observations coïncident avec les conclusions de Davis et Birch (2011) stipulant que les MeS sont corrélées avec l'achalandage des routes. Les concentrations de DCO mesurées vont également dans le même sens que les résultats de MeS. Les matières organiques se fixant à la surface des MeS, celles-ci peuvent être également entraînées par les automobiles.

En ce qui a trait au P et N, il n'y a pas de différence entre le stationnement arrière et le stationnement principal. Les concentrations se situent dans le même intervalle, soit entre <0,03 et 0,80 mg/L pour le P et entre <0, mg/L pour le N. Bien que ces nutriments se retrouvent en petite

quantité, leur présence, en période estivale, peut être expliquée par l'utilisation d'engrais pour l'entretien des plantes en vente à l'extérieur du bâtiment principal. En hiver, cela peut être dû au lessivage des nutriments suite au passage des eaux de pluie sur les plantes mortes en décomposition.

Les concentrations présentées au Tableau 18 ont également été comparées aux concentrations observées lors d'études similaires (Geheniau, 2014; Brome-Missisquoi, 2015). Dans ces deux projets, les eaux de ruissellement provenant d'un stationnement sous des conditions nordiques ont été analysées. La comparaison montre que les résultats obtenus pour le marché public sont du même ordre de grandeur que ceux des études précédentes. Toutefois, les résultats sont légèrement inférieurs à ceux du suivi de Brome-Missisquoi (2015), s'apparentant davantage à ceux trouvés par Geheniau (2014). Par exemple, pour les MeS, une moyenne de 37 mg/L a été trouvée dans le projet de Geheniau (2014) alors qu'on obtient des concentrations de plus de 48 mg/L au marché. Cette légère différence peut être expliquée par l'achalandage moins fréquent du magasin comparativement au marché public qui héberge différents commerces. Dans le même ordre d'idée, on remarque des concentrations inférieures de P et N dans l'étude menée par Geheniau (2014). Des concentrations moyennes de 0,1 mg/L (P) et 1,3 mg/L (N) ont été trouvées alors qu'on obtient des moyennes de 0,27-0,31 mg/L (P) et de 1,3-1,7 mg/L (N) à Longueuil. Ayant des plantes à entretenir à l'extérieur du bâtiment, il est normal de voir des concentrations supérieures au marché public. Somme toute, la qualité des eaux de ruissellement du marché public est comparable à celle observée dans l'étude de Geheniau (2014) dont le terrain à l'étude présente des caractéristiques similaires.

4.5.2 Efficacité d'enlèvement des contaminants des PGOs

Considérant les problèmes de mesure de débits, l'efficacité d'enlèvement des contaminants a été déterminée en comparant les concentrations retrouvées à l'entrée et à la sortie des PGOs de la manière suivante :

$$Eff. = \frac{(C_{moyE} - C_{moyS})}{C_{moyE}} \times 100 \% \quad \text{Éq. 4}$$

Eff. est l'efficacité d'enlèvement (%), C_{moyE} est la concentration moyenne des eaux de ruissellement entrant dans les PGOs (mg/L) et C_{moyS} est la concentration moyenne des eaux sortant des PGOs (mg/L). Suivant ce calcul, lorsque le résultat est positif, cela correspond à un enlèvement de contaminants. À l'inverse, quand l'efficacité est négative, un relargage est observé.

Le Tableau 19 rapporte les concentrations des eaux de ruissellement du stationnement arrière, de la tranchée drainante et du bassin sec. Les concentrations des eaux de ruissellement du stationnement principal, des cellules de biorétention et du bassin avec retenue permanente sont montrées au Tableau 20. De plus, le Tableau 21 rapporte l'efficacité d'enlèvement des contaminants de la tranchée drainante, du bassin sec et des cellules de biorétention estimée à partir des concentrations. Dans les deux premiers tableaux, la colonne Entrée correspond aux eaux de ruissellement entrant dans la tranchée drainante ou les cellules de biorétention. Les colonnes Sortie correspondent à l'exutoire des PGOs étudiées. Il est à noter qu'aucune efficacité d'enlèvement n'a pu être calculée dans le cas du BRP étant donné qu'il y a plusieurs entrées d'eau.

Tableau 19 – Caractérisation des eaux de ruissellement du stationnement arrière et des eaux sortant de la tranchée drainante (TD) et du bassin sec (BS)

Date	MeS (mg/L)			DCO (mg/L)			P (mg/L)			N (mg/L)		
	Entrée TD	Sortie TD	Sortie BS	Entrée TD	Sortie TD	Sortie BS	Entrée TD	Sortie TD	Sortie BS	Entrée TD	Sortie TD	Sortie BS
	205	6	-	123	41	-	-	-	-	-	-	-
09/07/16	64	2	-	36	-	-	0,26	0,21	-	2,2	2,5	-
25/07/16	4	1	-	22	17	-	<0,03	<0,03	-	1,9	2,5	-
16/08/16	15	3	-	118	92	-	0,31	-	-	2,4	1,3	-
13/10/16	13	2	-	32	17	-	-	-	-	-	-	-
19/04/17	37	1	-	20	15	-	<0,03	0,16	-	1,9	1,3	-
25/05/17	28	1	7	41	21	31	0,32	0,24	0,24	1,2	1,2	1,2
29/05/17	21	1	5	34	21	29	-	-	-	-	-	-
05/06/17	4	1	6	36	25	21	0,42	<0,03	0,20	1,4	1,1	1,6
27/06/17	170	4	6	97	28	25	0,80	0,18	0,26	1,8	1,7	1,3
17/07/17	14	1	1	40	21	25	0,27	<0,03	0,18	1,1	<0,30	<0,30
24/07/17	9	1	3	28	25	29	<0,03	<0,03	0,17	1,2	1,15	1,2
18/07/17	42	1	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne	48	2	4	52	29	27	0,27	0,11	0,21	1,7	1,4	1,1
Médiane	21	1	5	36	21	27	0,27	0,10	0,20	1,8	1,3	1,2
Minimum	4	1	1	20	15	21	0,03	0,03	0,17	1,1	0,3	0,31
Maximum	205	6	7	123	92	31	0,08	0,24	0,26	2,4	2,5	1,60
n	13	13	7	12	11	6	9	8	5	9	9	5

Tableau 20 – Caractérisation des eaux de ruissellement du stationnement principal et des eaux sortant des cellules de biorétention (BR) et du bassin avec retenue permanente (BRP)

Date	MeS (mg/L)			DCO (mg/L)			P (mg/L)			N (mg/L)		
	Entrée BR	Sortie BR	Sortie BRP	Entrée BR	Sortie BR	Sortie BRP	Entrée BR	Sortie BR	Sortie BA	Entrée BR	Sortie BR	Sortie BRP
28/06/16	238	-	-	226	-	-	-	-	-	-	-	-
09/07/16	57	11	-	85	70	-	0,25	0,64	-	2,0	2,5	-
16/08/16	39	13	-	108	102	-	<0,03	0,16	-	1,5	1,4	-
16/10/16	168	4	-	123	29	-	0,76	0,23	-	2,5	1,6	-
08/02/17	89	10	-	42	18	-	0,49	0,17	-	1,3	1,2	-
23/02/17	153	6	-	77	13	-	-	-	-	-	-	-
01/03/17	54	5	-	24	20	-	-	-	-	-	-	-
29/05/17	26	1	5	59	35	21	-	-	-	-	-	-
05/06/17	36	1	1	40	36	30	0,18	-	-	1,3	<0,3	<0,3
27/06/17	39	20	8	12	29	26	0,27	0,31	0,16	<0,3	<0,3	<0,3
24/07/17	25	2	4	70	34	26	0,19	<0,03	<0,03	<0,3	1,2	1,1
18/08/17	9	3	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne	78	7	5	79	35	26	0,31	0,26	0,10	1,3	1,2	0,6
Médiane	47	5	5	70	29	26	0,25	0,20	0,10	1,3	1,2	0,3
Minimum	9	1	1	12	0	21	0,03	0,03	0,03	0,3	0,3	0,3
Maximum	238	20	8	226	102	30	0,76	0,64	0,16	2,5	2,5	1,1
n	12	11	5	11	11	4	7	6	2	7	7	3

Tableau 21 – Efficacité d'enlèvement des contaminants (%) de la tranchée drainante (TD), des cellules de biorétention (BR) et du bassin sec (BS)

Date	MeS (%)			DCO (%)			P (%)			N (%)		
	TD	BS	BR	TD	BS	BR	TD	BS	BR	TD	BS	BR
28/06/16	97	-	-	67	-	-	-	-	-	-	-	-
09/07/16	97	-	80	-	-	18	19	-	-153	0	-	0
25/07/16	0	-	-	21	-	-	0	-	-	0	-	-
16/08/16	81	-	66	22	-	6	-	-	-433	47	-	0
13/10/16	83	-	-	46	-	-	-	-	-	-	-	-
16/10/16	-	-	98	-	-	77	-	-	69	-	-	37
08/02/17	-	-	89	-	-	58	-	-	66	-	-	0
23/02/17	-	-	96	-	-	84	-	-	-	-	-	-
01/03/17	-	-	91	-	-	19	-	-	-	-	-	-
19/04/17	98	-	-	23	-	-	-447	-	-	0	-	-
25/05/17	97	-641	-	49	-45	-	26	0	-	0	0	-
29/05/17	94	0	95	39	-41	40	-	-	-	-	-	-
05/06/17	0	-505	98	30	16	9	93	-578	-	0	-48	77
27/06/17	98	0	49	72	11	-142	78	-47	-17	0	0	0
17/07/17	93	0	-	49	-22	-	89	-513	-	73	0	-
24/07/17	91	0	93	11	-16	52	0	-473	84	0	0	-300
18/08/17	97	0	69	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moyenne	79	-164	84	39	-16	22	-18	-322	-61	13	-10	-27
Médiane	94	0	91	39	-19	40	22	-473	33	0	0	0
Minimum	0-98	-641	49	11	-45	-142	-447	-578	-433	0	-48	-300
Maximum	98	0	98	72	16	84	93	0	84	73	0	77
n	13	7	11	11	6	11	8	5	5	9	5	7

Tranchée drainante

Les résultats présentés au Tableau 21 montrent que la tranchée drainante favorise l'enlèvement des contaminants, sauf pour le P pour un évènement. En effet, on remarque des efficacités positives pour l'ensemble des paramètres étudiés, à l'exception du P. Pour les MeS, deux pluies obtiennent une efficacité d'enlèvement de 0 %, soit les pluies du 25 juillet 2016 et du 5 juin 2017, alors que les autres pluies ont des efficacités variant entre 81 % et 98 %. Ces écarts sont attribuables à la période de temps sec entre deux évènements de pluie. En fait, cette période dure moins de deux jours pour les pluies présentant une efficacité de 0 %. De plus, l'échantillonnage a commencé après le début de la pluie; l'échantillon composite n'est pas représentatif de l'ensemble de la pluie. De plus, une partie des contaminants a dû être lessivée au cours de la pluie précédente, ce qui explique les faibles concentrations mesurées au niveau des eaux de ruissellement entrant dans la tranchée drainante. À l'exception de ces deux pluies, les résultats obtenus sont comparables à ceux produits par le Programme d'évaluation des technologies durable du Toronto and Region Conservation (2015) où une efficacité moyenne d'enlèvement de MeS de 98 % a été obtenue lors du suivi d'une tranchée drainante aménagée dans un stationnement d'un parc en Ontario. En ce qui a trait à la DCO, on observe que la tranchée drainante permet, en tout temps, un enlèvement positif. En effet, des taux d'enlèvement variant entre 11% et 72 % ont été obtenus. Les particules de sable permettent donc la filtration de la matière organique.

De manière générale, la tranchée drainante favorise également l'enlèvement de phosphore. Des efficacités d'enlèvement variant entre -447 % et 93 % avec une moyenne de -18 % ont été calculées. Un seul relargage de P a été observé, soit lors de la pluie du 19 avril 2017, avec un taux d'enlèvement de -447 %. Cet évènement explique l'efficacité moyenne étant négative. Selon le Tableau 20, les eaux de ruissellement entrant dans la tranchée drainante ne contiennent pas de phosphore. La TD n'étant pas composée de substrat nutritif, la présence de ce nutriment à la sortie de la TD provient d'une autre source externe. À titre de rappel, la tranchée drainante se situe à proximité d'un terrain de jeu engazonné. Ainsi, au mois d'avril, le sol de cet aire de jeu était saturé des eaux de fonte nivale et, à quelques reprises, ces eaux s'écoulaient vers la tranchée drainante. La photo présentée à la Figure 43 illustre ces propos.

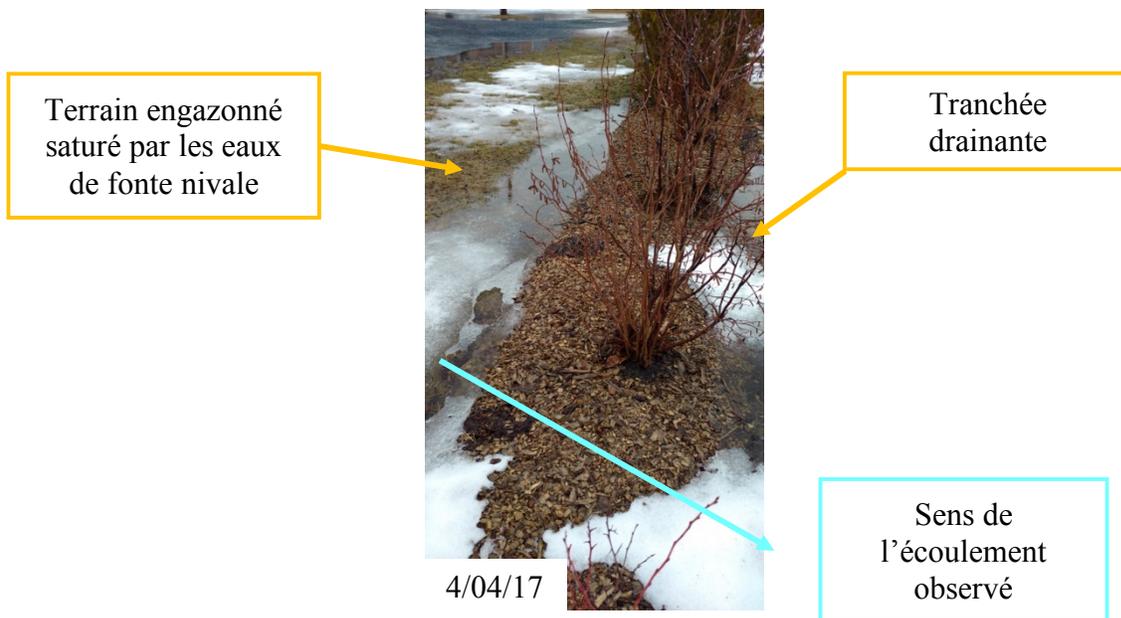


Figure 43 - Terrain engorgé d'eau près de la tranchée drainante

Bien que les arbustes fassent office de barrière entre les deux terrains à certains endroits, l'eau se frayait un chemin, ce qui a pu introduire du P dans la tranchée drainante. Il est à noter que le drainage du terrain de jeu vers le marché public ne s'est produit qu'en période de fonte des neiges. Ainsi, en ne considérant pas cet événement, le taux d'enlèvement de phosphore de la tranchée drainante varie entre 0 % et 93 % avec une moyenne de 44 %, ce qui est inférieur à l'efficacité moyenne de 93 % obtenue par Toronto and Region Conservation (2015).

En ce qui concerne l'azote, il s'avère que la tranchée drainante a peu d'effet sur son enlèvement. En effet, bien qu'une moyenne de 13 % ait été obtenue, des efficacités d'enlèvement de 0% sont rapportées pour sept des neuf pluies analysant ce paramètre.

Selon les résultats obtenus, le type de pluie rencontré ne semble pas avoir d'impact sur l'enlèvement des contaminants effectué par la tranchée drainante. En effet, les efficacités calculées se situent majoritairement dans les mêmes gammes de valeurs pour tous les types de pluies.

Dans le cas où la tranchée drainante serait utilisée individuellement, les concentrations obtenues à la sortie de cette PGO ont été comparées aux normes maximales du règlement sur l'assainissement des eaux de la Communauté métropolitaine de Montréal (2008) présentées au

Tableau 4. Pour l'ensemble des événements, les normes sont respectées, ce qui justifie l'emploi de la TD pour l'amélioration de la qualité des eaux de ruissellement.

Cellules de biorétention

En ce qui concerne les MeS et la DCO, les efficacités d'enlèvement des cellules de biorétention sont comparables à celles de la tranchée drainante. Les BR enlèvent en moyenne 84 % des MeS des eaux de ruissellement avec une gamme de valeurs située entre 49 % et 98 %. Ce résultat est légèrement supérieur au taux d'enlèvement de 75 % trouvé par Geheniau (2014), mais similaire à celui du projet de la MRC Brome-Missisquoi (2015) ayant obtenu un enlèvement moyen de 87 %. Comme pour la TD, on observe une réduction globale de la DCO. La gamme de valeurs trouvée pour ce projet varie entre -142 % et 84 %. Un seul événement de pluie a relâché de la matière organique, ce qui fait baisser la moyenne à 22 %. Autrement, elle serait de 36 %. Toutefois, ces BR sont favorables à l'enlèvement de ces matières comparativement aux BR de l'étude de Geheniau (2014) où un taux d'enlèvement moyen de -50 % a été obtenu. Selon les valeurs présentées au Tableau 21, les BR ont tendance à relarguer du P et du N avec des taux d'enlèvement moyens respectifs de -61 % et -27 %. Ce phénomène a également été rapporté par Geheniau (2014) où une efficacité d'enlèvement du P de -65 % a été trouvée au MEC de Longueuil. La MRC Brome-Missisquoi (2015) a également été confrontée à cette problématique. À quelques reprises, un relargage de P a été observé avec un taux moyen de -350 %. La présence du P et N dans les eaux sortant des BR peut être due à la présence d'engrais dans le substrat ou à la décomposition des plantes. Utilisé seul, ce type de PGO peut donc contribuer à la prolifération d'algues dans le cours d'eau récepteur. À cet effet, la Figure 44 illustre cette situation dans le cas du BRP aménagé au marché public correspondant au point de sortie des BR. Au cours de l'été 2016, une prolifération d'algues a été observée causant des problèmes d'odeurs et altérant l'aspect esthétique du BRP. La présence en grande quantité de ces algues peut être expliquée par l'apport supplémentaire de nutriments dans le bassin provenant des cellules de biorétention et du bassin sec.



Figure 44 – Prolifération des algues dans le BRP (photo prise le 27 mai 2016)

Bien qu'un relargage se produit au niveau des BR, les normes prescrites par la Communauté métropolitaine de Montréal (2008) sont respectées pour la majorité des pluies, à l'exception de deux événements. En fait, le 9 juillet 2016 et le 18 août 2016, les concentrations de DCO et P sont légèrement supérieures aux normes maximales.

Comparativement à la TD, il s'avère que le type de pluie a un impact sur l'efficacité d'enlèvement des BR notamment au niveau des grosses pluies. Comme mentionné dans la section 4.1 « Caractérisation des pluies échantillonnées », les pluies du 27 juin 2017 et du 18 août 2017 ont été considérées comme des orages. En comparaison avec les autres campagnes d'échantillonnages menées à l'été 2017, les performances obtenues pour ces deux pluies font partie des plus basses valeurs. Ainsi, la performance de traitement des BR est réduite lors des événements orageux.

Bassin sec

Contrairement à la tranchée drainante et aux cellules de biorétention, le bassin sec ne contribue pas à l'enlèvement de contaminants quel que soit le type de pluie. À plusieurs reprises, un relargage des contaminants ou une efficacité nulle ont été obtenus. Des taux d'enlèvement moyens de -164 %, -16 %, -322 % et de -10 % ont été calculés respectivement pour les MeS, la DCO, P et N. Ces résultats diffèrent de ceux de Carpenter (2011) où une efficacité d'enlèvement

des MeS variant entre 7 % et 78 % a été obtenue. Cette étude n'a toutefois pas évalué la DCO, le P et N total.

Suite à la fonte des neiges, au mois d'avril 2017, une couche de sédiments s'est déposée à la surface de l'enrochement du BS (Figure 45). Ainsi, en traversant le BS, l'eau a pu emporter une partie des sédiments s'étant accumulés sur l'enrochement.

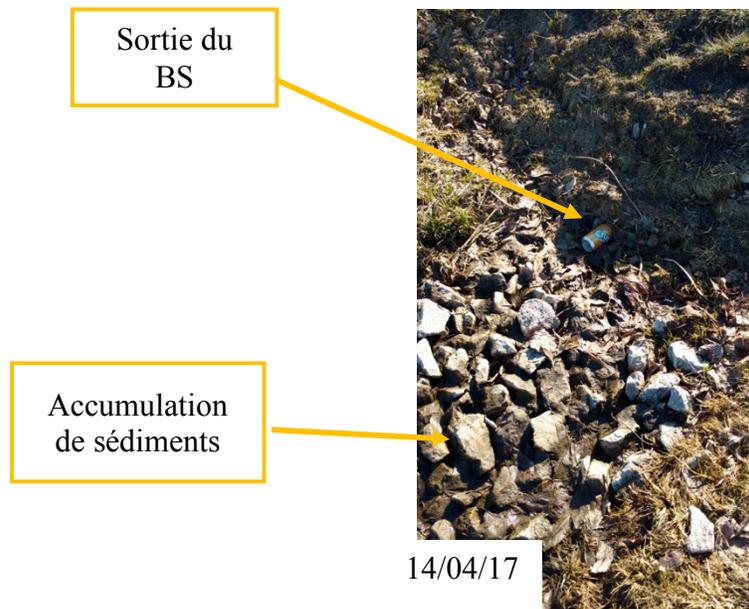


Figure 45 – Accumulation de sédiments à la surface du BS

Pour leur part, les matières organiques, le P et N peuvent provenir des brins issus du fauchage du gazon et/ou des plantes ayant pris place dans l'enrochement. Pour pallier ce relargage, on pourrait revoir la conception du BS pour permettre un meilleur enlèvement des sédiments, notamment en ajoutant une trappe à sédiments. Toutefois, bien que le BS relargue des polluants, les concentrations mesurées à sa sortie restent conformes aux normes du règlement sur l'assainissement des eaux (CMM, 2008).

Bassin avec retenue permanente

Bien qu'il n'ait pas été possible d'évaluer quantitativement l'efficacité du bassin avec retenue permanente, selon les résultats montrés aux Tableaux 19 et 20, on remarque tout de même une diminution des contaminants à la sortie de cette PGO.

En fait, en comparant les concentrations moyennes à la sortie du bassin sec et des cellules de biorétention avec celles du bassin avec retenue permanente, on voit que les concentrations à la sortie du bassin sont en tout temps similaires ou inférieures à celles des PGOs aménagées à l'amont. Par exemple, une concentration moyenne en MeS de 8 mg/L a été mesurée à la sortie du BRP alors que des concentrations moyennes de 20 mg/L et de 6 mg/L ont été trouvées pour les BR et le BS pour la pluie du 26 juin 2017. Ainsi, en prenant en considération le cumul des masses de contaminants des cinq points d'entrée, on en déduit que le BRP a un effet positif sur l'enlèvement des MeS. En fait, celui-ci permet une seconde décantation.

En ce qui concerne la DCO, malgré que des conditions aérobies n'ont pas été favorisées dû à l'absence de l'amenée d'air durant l'été 2017, l'activité microbienne a tout de même pu faire diminuer les matières organiques sortant du bassin. En effet, on a mesuré une concentration moyenne de 26 mg/L à l'exutoire du BRP alors que les eaux récupérées à la sortie des cellules de biorétention et du bassin sec ont des concentrations respectives de 34 mg/L et de 29 mg/L pour la pluie du 24 juillet 2017.

Dans le même ordre d'idée, une réduction de phosphore et d'azote a également été observée. On a trouvé des concentrations de P de 0,26 mg/L et 0,21 mg/L aux sorties des BR et du BS alors qu'on a calculé une moyenne de 0,1 mg/L à la sortie du BRP. De même, des concentrations moyennes de N de 1,2 mg/L et de 1,1 mg/L respectivement ont été calculées à la sortie des cellules de biorétention et du bassin sec tandis qu'une concentration de 0,6 mg/L a été obtenue à la sortie du BRP. Le bassin avec retenue permanente a donc un effet positif quant à l'enlèvement de ces deux polluants. Le P et N étant des éléments nutritifs nécessaires au fonctionnement métabolique (Khiari, 2016), les plantes doivent donc en absorber, ce qui permet de réduire leur concentration à la sortie du bassin.

À ce jour, aucune étude n'a évalué l'efficacité de traitement d'un bassin avec retenue permanente en condition nordique. Les résultats obtenus lors de ce projet constituent les premières données abordant ce sujet. Étant donné la nature qualitative de l'analyse de l'efficacité d'enlèvement des contaminants de ce type de PGOs, pour un projet futur, il serait pertinent d'évaluer quantitativement l'impact d'un BRP à partir du calcul du débit massique. De la sorte, la masse totale de contaminants issue des différents points d'entrée pourrait être comparée à celle sortant du bassin.

Performance en conditions hivernales

Durant les mois d'hiver, les eaux du stationnement principal et celles des BR ont été échantillonnées. Les campagnes d'échantillonnage du 8 février 2017, du 23 février 2017 et du 1^{er} mars 2017 ont servi pour l'analyse. Selon les résultats obtenus au Tableau 21, l'efficacité d'enlèvement des MeS varie pour ces événements entre 89 % et 96 %, avec une moyenne de 92 %. Ces résultats sont supérieurs à ceux de Geheniau (2014) où une moyenne de 75 % a été obtenue pour un projet similaire. En ce qui a trait à l'enlèvement de la matière organique, les cellules de biorétention permettent une réduction variant entre 19 % et 84 % aux cours des événements hivernaux. De plus, ces mêmes installations permettent l'enlèvement du phosphore avec une réduction de 66 % lors de l'échantillonnage du 8 février 2017. Toutefois, il s'est avéré que les BR n'ont pas d'effet sur l'enlèvement de l'azote en hiver. Ces résultats démontrent que les cellules de biorétention remplissent leur fonction de traitement des eaux malgré les conditions hivernales.

Effet du traitement en chaîne

Pour la chaîne de traitement composée de la tranchée drainante et du bassin sec, la TD contribue majoritairement à l'enlèvement de contaminants lessivés par les eaux de ruissellement alors que le BS n'améliore pas la qualité de l'eau sortant de ce dernier. En fait, le bassin a peu d'effet sur l'enlèvement des polluants et, à plusieurs reprises, il en relâche. L'ajout du bassin sec, à la suite de la tranchée drainante, réduit donc l'efficacité de traitement. Ainsi, l'hypothèse de départ stipulant que, plus il y a de PGOs impliquées dans la série de traitement, meilleur est l'enlèvement des contaminants, n'est pas confirmée dans ce cas. Toutefois, cette hypothèse est validée lorsque le BRP est pris en compte dans l'analyse de l'efficacité. En fait, les résultats ont

montré que le BRP permet un traitement supplémentaire, et même pallie le relargage de contaminants des PGOs situées à l'amont.

L'aménagement de chaînes de traitement est donc une option avantageuse pour les municipalités. Ces chaînes permettent globalement d'améliorer la qualité des eaux. Dans le cas où une PGO située à l'amont relargue des contaminants, ce phénomène est atténué par l'ajout à la fin de la série d'une PGO dédiée au traitement. De plus, les PGOs utilisant les plantes comme procédé de filtration n'ont pas besoin d'entretien supplémentaire pour remplir leurs fonctions. Une fois établies, les plantes poussent sans l'ajout d'agent fertilisant et procèdent à la filtration des eaux. Au marché public de Longueuil, les plantes du BR et du BRP sont entretenues du mois de juin au mois d'octobre en effectuant principalement du désherbage. Cette activité est réalisée principalement pour des raisons esthétiques et pour éviter l'abondance de plantes indigènes. Ainsi, l'entretien de ces infrastructures est le même que pour une plate-bande de base.

4.6 Évolution de la végétation

Comme il a été mentionné dans la section 3.1 « Description générale du site à l'études », parmi les PGOs aménagées au marché public, les BR et le BRP ont été sélectionnés pour traiter les eaux de ruissellement à l'aide de végétaux. Ainsi, lors des visites sur le terrain, quelques photos ont été prises pour voir l'évolution de ces végétaux (Figure 46).



Figure 46 - Évolution des végétaux des BR

La végétation remplit ses fonctions jusqu'au moment du rabattage des vivaces et de la taille des arbustes. En effet, la végétation est encore florissante jusqu'au 13 octobre 2016. En hiver, les arbres et arbustes supportent bien le froid comme le montrent les photos du 23 février 2017 et du 4 avril 2017. De plus, ce n'est qu'au mois de mai que les plantes ont commencé à sortir de leur dormance comme le montre la photo du 5 mai 2015 où leur feuillage a commencé à être apparent. Au cours de la période estivale, les plantes sont redevenues florissantes. Toutefois, aucune photo

n'a été prise à la fin de la saison. Somme toute, cette série de photographies montre que la végétation plantée au moment de la construction des cellules s'est bien établie.

La croissance de la végétation du BRP suit la même tendance que celle des cellules de biorétention. La Figure 47 présente cette évolution.



Figure 47 - Évolution des végétaux du BRP

En avril, aucune plante n'était visible dans le bassin. La végétation a commencé à pousser à partir du mois de mai et sa croissance s'est poursuivie comme le montre la photo du 5 juin 2017. En comparant les photos du 9 juillet 2016 et du 4 octobre 2017, on voit que la végétation est beaucoup plus florissante après un an. De plus, de nouvelles espèces se sont implantées dans le bassin, ce qui améliore l'aspect esthétique du bassin.

4.7 Faits divers

Cette section aborde certains événements rencontrés lors des visites de terrain. Suite à de nombreuses discussions avec les commerçants, le personnel et les usagers, il s'avère que peu de gens sont au courant du fonctionnement et de l'utilité PGOs pour la gestion des eaux pluviales. Malgré l'implantation de panneaux détaillant le concept des PGOs aménagées au marché public, les gens ne sont pas conscients de la problématique entourant les eaux de ruissellement. Les deux

prochaines sections abordent des situations vécues lors des campagnes. Pour leur part, les dernières sections font part de certaines observations ayant été faites sur le terrain.

4.7.1 Sensibilisation des commerçants

Lors de la campagne d'échantillonnage du 25 mai 2017, un écoulement de couleur blanche a été observé à la sortie de la conduite reliant le trop-plein du réservoir interne au BRP (Figure 48). En temps normal, les eaux sortant de cette conduite proviennent majoritairement du ruissellement des eaux du toit du marché public. L'écoulement de ce panache n'est donc pas attendu.



Figure 48 - Écoulement blanchâtre

Suite à un échange avec des employés du marché, il s'est avéré qu'une personne a versé un liquide à base de lait dans le regard connectant le trop-plein et le filtre à sable situé près de l'entrée principale. Cette personne avait la conviction que le rejet de cette substance dans ce regard allait rejoindre les égouts sanitaires de la municipalité en vue d'être traitée. Les personnes responsables du projet ont dû informer les employés du commerce de la manière dont les eaux de ruissellement du marché sont récupérées, contrôlées, puis acheminées vers le cours d'eau récepteur. Les commerçants du marché public ne sont pas suffisamment informés de la gestion des eaux effectuée sur les lieux. Il serait bien de mettre en valeur le fonctionnement et les bienfaits des PGOs en faisant une campagne de sensibilisation auprès des commerçants.

4.7.2 Produits utilisés pour l'entretien

Comme mentionné à la section 4.5.2 « Efficacité d'enlèvement des contaminants des PGOs », à l'été 2016, le marché public a été confronté à une problématique de prolifération d'algues au niveau du BRP (Figure 44). Ces algues altéraient l'esthétique du bassin et dégageaient des odeurs. Pour pallier ce problème, plusieurs mesures ont été effectuées dont l'ajout d'un algicide chimique composé de sulfate de cuivre. Cette substance est l'un des plus anciens agents utilisés pour combattre la prolifération des algues (MAPAQ, 2007). Ce produit étant un inhibiteur de la photosynthèse, il bloque le transfert d'énergie effectué à l'intérieur de la plante, ce qui provoque sa mort dans les jours qui suivent (MAPAQ, 2007). Ce traitement choc n'est pas sans conséquence. Dans un document du MAPAQ (2007), il est mentionné que dans les plans d'eau, le sulfate de cuivre est très toxique pour les poissons, notamment en eau acide et en eau douce. Ce même document précise que « son usage est à proscrire dans les plans d'eau qui contiennent des poissons » (MAPAQ, 2007). L'emploi de ce produit n'est peut-être pas adéquat dans l'optique d'une gestion durable des eaux pluviales. Le BRP étant l'exutoire des chaînes de traitement, les surplus de sulfate de cuivre peuvent donc atteindre le cours d'eau récepteur après leur écoulement dans le réseau municipal et altérer l'environnement. Il serait donc pertinent d'utiliser d'autres moyens pour remédier à cette prolifération d'algues.

4.7.3 Activités d'origine anthropique

Bris de la bordure

Le 27 mai 2016, lors d'une visite d'observation sur le terrain, une fissure a été remarquée dans la chaussée du stationnement arrière du marché public (Figure 49). Puisque le stationnement arrière n'est pas très large, un camion de livraison a probablement reculé dans la bande de trottoir lors d'une manœuvre, ce qui a pu causer la fissure.

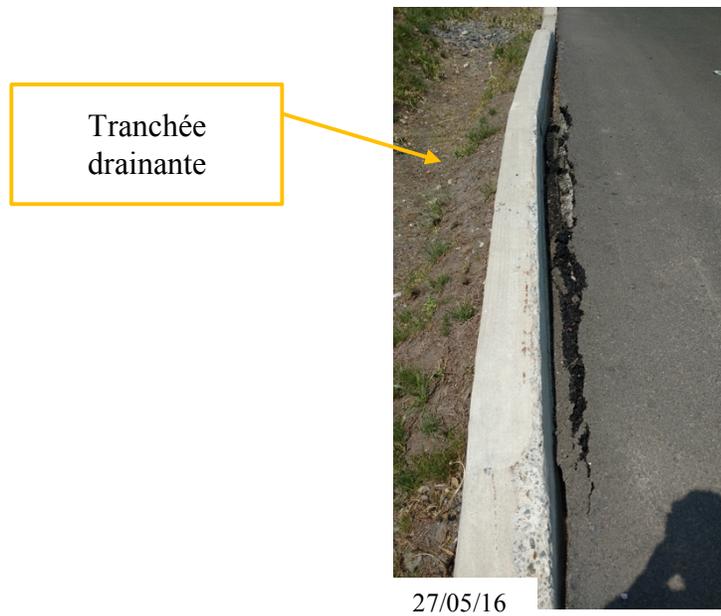


Figure 49 – Fissure dans la chaussée du stationnement arrière

Ce bris d'origine anthropique n'a pas causé de problème au niveau de la TD située à l'arrière du marché étant donné que ce dernier n'était pas situé au niveau de la bordure arasée. Cette fissure n'a pas généré de sédiments pouvant être lessivés par les eaux de ruissellement. Toutefois, si des sédiments avaient été produits, ceux-ci auraient été enlevés par la tranchée drainante.

Accumulation de gros sédiments

À la fonte des neiges, du sable grossier a été observé à la surface du stationnement ainsi que dans certaines PGOs. Ces sédiments proviennent entre autres des produits abrasifs contenus dans la neige accumulée (Figure 50) ou ont été entraînés par les voitures et les camions.



Figure 50 - Gauche : Sédiments en bordure de la TD; Droite : Accumulation de la neige à la surface de la NE

Bien qu'un nettoyage du stationnement ait lieu au mois de mai, ces sédiments se retrouvent tout de même à la surface des PGOs comme le montre la Figure 51 dans le cas de la tranchée drainante.



Figure 51 - Sédiments à la surface de la TD

Aucun problème au niveau du traitement des eaux de ruissellement n'a été observé malgré cette accumulation. Ces sédiments n'ont pas eu d'effet néfaste sur les PGOs.

Accumulation de débris suite à la fonte des neiges

De manière générale, les PGOs ne nécessitent pas d'entretien particulier pour remplir leur fonction. Seul un nettoyage doit être effectué suite à la fonte des eaux nivales pour enlever les débris bloquant la sortie des installations comme le montre la Figure 52.



Figure 52 - Débris accumulés suite à la fonte des eaux nivales à la sortie du BS et du BRP

Dans cette figure, l'encadré blanc cible l'exutoire du BS et du BRP. D'après ces photos, la sortie de ces deux PGOs a été bloquée par l'accumulation de feuilles et de débris. Cela n'a toutefois pas causé de problèmes au niveau du fonctionnement des PGOs, ni pour la sécurité des passants, car les eaux s'écoulaient tout de même. Suivant ce constat, le seul entretien consiste à enlever en tout temps les débris faisant obstruction à l'exutoire des PGOs.

Effet d'un chantier de construction

Au mois d'août 2017, des travaux de construction ont débuté à l'arrière du marché public. Cela a eu pour effet de modifier la configuration de la sortie de la TD et du BS (Figure 53).



Figure 53 - Réaménagement de la sortie de la TD et du BS

Une conduite de 375 mm de diamètre a été connectée à la sortie de la conduite originale de 200 mm de la TD. En soi, cette nouvelle configuration n'a pas été problématique. Les eaux de ruissellement sortant de la TD s'écoulaient encore dans le BS. Toutefois, cette nouvelle disposition a réduit la surface du BS, ce qui pourrait avoir un effet sur sa capacité de rétention et ses performances hydrauliques.

Depuis le début de la construction, des sédiments fins se sont également accumulés à la sortie de la nouvelle entrée du BS (Figure 54).



Figure 54 - Accumulation de sédiments à l'entrée du bassin sec

Suite à ce constat, il n'est plus possible de récupérer des échantillons d'eau à cette sortie. En effet, pour atteindre cette conduite, la personne responsable doit marcher dans la couche de sédiments qui, aussitôt, se remettent en suspension. L'échantillon d'eau n'est donc plus représentatif de la qualité des eaux sortant de la TD. Ces mêmes sédiments ont également été retrouvés à la surface de l'enrochement du BS comme le montre la troisième photo. Ainsi, en temps de pluie, ces particules pourraient être entraînées vers le BRP. Dans le même ordre d'idée, au cours de cette même visite, les responsables du projet ont également observé que les eaux d'excavation du chantier de construction sont évacuées vers le BS (Figure 55).



Figure 55 -

Évacuation des eaux d'excavation du site en construction vers le BS

Depuis, un écoulement en continu à la sortie du BS a été observé par la personne chargée de l'entretien paysager. Les gens de la construction n'ont donc pas été sensibilisés au concept de gestion des eaux pluviales du marché public. À partir des résultats obtenus lors de l'évaluation de l'efficacité épuratoire des PGOs, on peut supposer que le BRP permettrait d'atténuer les impacts de cette nouvelle construction en favorisant un traitement et une décantation supplémentaires en fin de série. Le BRP permettrait de limiter le dépôt de ces sédiments dans le réseau municipal. Ainsi, la mise en place d'une chaîne de traitement peut permettre de réduire les risques de pollution associés aux activités humaines.

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Dans l'optique d'une gestion durable des eaux pluviales, le marché public de Longueuil a été aménagé de manière à récupérer et à traiter les eaux de pluie grâce à différentes PGOs. Depuis les années 1980, plusieurs travaux ont étudié les PGOs utilisées seules, mais peu d'information existe sur leur performance dans une chaîne de traitement. L'objectif principal de ce projet de recherche consistait donc en un suivi quantitatif et qualitatif des eaux pluviales de PGOs installées en série dans un climat nordique comme au Québec. Pour ce faire, quatre objectifs ont été établis : 1- développer un protocole d'échantillonnage pour effectuer un suivi le long d'une chaîne de traitement; 2- effectuer le suivi quantitatif et qualitatif des eaux pluviales, des végétaux et des infrastructures; 3- estimer qualitativement l'efficacité épuratoire de chaînes de traitement; et 4- proposer des pistes d'amélioration pour la conception, l'implantation, le suivi et l'entretien des chaînes. Pour répondre à ces objectifs, deux chaînes de traitement ont été ciblées : une chaîne constituée d'une tranchée drainante, d'un bassin sec et d'un bassin avec retenue permanente; et une seconde constituée de cellules de biorétention et d'un bassin avec retenue permanente. Ainsi, sur une période de 16 mois, ces différentes PGOs ont été étudiées, ce qui a permis d'atteindre les objectifs fixés.

Grâce au suivi quantitatif et au protocole d'échantillonnage développé pour le suivi qualitatif, plusieurs données ont été récupérées sur le terrain. Les résultats obtenus au cours de cette étude ont démontré que les PGOs installées en série sont plus efficaces pour réduire les volumes et les débits de pointe comparativement aux PGOs utilisées seules. Il a été démontré que les cellules de biorétention permettent une diminution moyenne des volumes et des débits de pointe de 70 % et de 94% respectivement et que la tranchée drainante, le bassin sec et le bassin avec retenue permanente permettent un décalage des débits respectivement de 30 minutes, 10 minutes et de plus d'une heure respectivement. En série, les PGOs permettent de décaler les débits de près de deux heures. De plus, il s'est avéré que l'écoulement à la sortie des PGOs dure en moyenne deux jours et demi, ce qui a un impact direct sur l'écoulement dans le réseau municipal, car les volumes se répartissent sur une plus longue durée.

Selon le suivi de la qualité des eaux de pluie pour les matières en suspension, la demande chimique en oxygène, le phosphore et l'azote total, il s'est avéré que le traitement en chaîne

favorise également positivement l'enlèvement de contaminants. Pour les 18 pluies échantillonnées, les résultats ont démontré que la tranchée drainante et les cellules de biorétention favorisent l'enlèvement des MeS et des matières organiques. En ce qui concerne les MeS, un enlèvement moyen de 79 % et de 84 % a respectivement été trouvé pour la tranchée drainante et les cellules de biorétention. Pour la matière organique, l'enlèvement est de 39 % pour la tranchée drainante et de 22 % pour les cellules de biorétention. Toutefois, en période estivale, une augmentation de phosphore a été observée principalement à la sortie des cellules de biorétention. En ce qui a trait au bassin sec, contrairement aux deux autres PGOs, celui-ci ne contribue pas à l'enlèvement supplémentaire de contaminants dans la chaîne de traitement, il en relargue plutôt. Si ce relargage s'accroît, il est recommandé d'installer une trappe à sédiments avant la sortie de cette PGO. De cette manière, ces contaminants vont pouvoir être retenus avant d'atteindre le cours d'eau récepteur. Au marché public, l'ajout du bassin avec retenue permanente à la fin de la série de traitement permet de pallier ce relargage en favorisant une décantation supplémentaire ainsi qu'une filtration par les plantes. L'emploi de chaîne de traitement est donc avantageux comparativement à l'utilisation de PGOs seules.

Comparativement au système de drainage traditionnel, il s'avère que les PGOs ne nécessitent pas d'entretien particulier. Lorsque les végétaux utilisés pour effectuer une filtration sont bien enracinés, aucun effort additionnel, tel que l'ajout de fertilisant, n'est requis pour qu'ils remplissent leur fonction. Un entretien conventionnel peut être effectué entre autres pour préserver l'esthétique de la PGO. Il est toutefois recommandé d'effectuer, en tout temps, un nettoyage des gros débris et des feuilles mortes pour ne pas obstruer totalement la sortie des PGOs.

De plus, au marché public, une campagne de sensibilisation auprès des commerçants concernant la gestion durable des eaux pluviales pourrait être pertinente. Lors d'échanges avec ces derniers, il s'est avéré que peu d'entre eux sont au courant de l'aménagement extérieur du marché public et du principe de gestion durable des eaux pluviales. Il est donc recommandé d'offrir une brève séance d'information auprès de ces gens, pour qu'ils puissent à leur tour informer les usagers et préserver l'état de l'aménagement extérieur.

Bien que des données aient été obtenues sur le terrain, le suivi a été complexe à réaliser, notamment au niveau de la tranchée drainante, du bassin sec et du bassin avec retenue permanente,

d'une part dû aux faibles débits sortant des infrastructures et d'autre part à la configuration des PGOs qui ne se prêtait pas à la prise de mesure. En fait, il est laborieux de mettre en place un suivi simple et efficace de collecte de données lorsque l'aménagement n'a pas été envisagé lors de la conception. Ceci constitue donc une limite à cette étude. Cette difficulté a eu pour conséquence de ne pas pouvoir utiliser le modèle SWMM pour l'estimation des débits sortant des PGOs mentionnées précédemment, car celui-ci n'a pas pu être calé sur des observations de terrain. Ainsi, l'évaluation de la performance hydraulique de la tranchée drainante, du bassin sec et du bassin avec retenue permanente a été basée uniquement sur les observations effectuées au marché public. Pour de futurs projets où le suivi expérimental est désiré, il est recommandé de revoir la conception des sorties, notamment pour favoriser un écoulement sous forme de jet libre. Par exemple, pour la tranchée drainante, ne pas installer la conduite à la même élévation que le fond du bassin sec pourrait faciliter la mesure de débits, mais aussi la prise d'échantillons. La méthode volumétrique pourrait ainsi être utilisée pour estimer les débits sortant de cette PGO. Par ailleurs, cette modification permettrait un meilleur échantillonnage de la tranchée drainante. Selon la configuration actuelle, puisque la bouteille doit être introduite dans l'eau pour prendre un échantillon, cela peut remettre en suspension les sédiments déposés au fond. Ainsi, en présence d'un écoulement à jet libre, cela permettrait de préserver la qualité de l'échantillon, car les eaux pourraient se verser directement dans la bouteille.

Malgré les difficultés rencontrées, il a tout de même été possible de démontrer que les chaînes de traitement ont des effets positifs par rapport à l'utilisation de PGOs seules. Cette étude de cas vient donc supporter les bienfaits de l'aménagement de traitements en chaîne. Ce projet a fait partie des premières recherches développées au Québec pour évaluer la performance de PGOs installées en série. Les résultats présentés n'abordent toutefois que la performance des PGOs en période estivale. Les performances de ces séries n'ont pas été évaluées sous des conditions hivernales. Les campagnes d'échantillonnage doivent donc être poursuivies pour obtenir davantage d'information concernant leur fonctionnement sous des températures froides.

RÉFÉRENCES

Bastien, N., Arthur, S., Wallis, S. et Scholz, M. (2010). *The best management of SuDS treatment trains: a holistic approach*. *Water Science and Technology*, 61(1), 263-272. doi:10.2166/wst.2010.806

Boucher, I (2010). *La gestion durable des eaux de pluie, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable, ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, coll. « Planification territoriale et développement durable »*, 118 p. Repéré à www.mamrot.gouv.qc.ca

Boudreau, L., Sinotte, M. et Defo, M. A. (2015). *Développement de critères de qualité d'eau de surface pour les hydrocarbures pétroliers – réalisé dans le cadre de l'évaluation environnementale stratégique (Étude AENV14)*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-74762-8

Bratieres, K., Fletcher, T.D., Deletic, A., Alcazar, L., Le Coustumer, S. et McCarty, D.T. (2008). *Removal of nutrients, heavy metals and pathogens by stormwater biofilters*. Résumé présenté au 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK. Repéré à [https://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/11th International Conference on Urban Drainage_CD/ICUD08/pdfs/538.pdf](https://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/11th%20International%20Conference%20on%20Urban%20Drainage_CD/ICUD08/pdfs/538.pdf)

Brattebo, B. O., & Booth, D. B. (2003). *Long-term stormwater quantity and quality performance of permeable pavement systems*. *Water Research*, 37(18), 4369-4376. doi : [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00410-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00410-X)

Brown, R. A., Line, D. E. et Hunt, W. F. (2012). *LID Treatment Train: Pervious Concrete with Subsurface Storage in Series with Bioretention and Carewith Seasonal High Water Tables*. *Journal of Environmental Engineering*. doi: 2012.138:689-697

Cahill, T. H. (2012). *Low Impact Development and Sustainable Stormwater Management*. Wiley. New Jersey. ISBN-13 : 978-0470096758

Carpenter, J. (2011). *Caractérisation du ruissellement urbain et évaluation de l'efficacité épuratoire d'un bassin de rétention*. (Maîtrise), Université Laval

Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2016). *Détermination de la demande chimique en oxygène: méthode de reflux en système fermé suivi d'un dosage par colorimétrie avec le bichromate de potassium* Repéré à <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA315DCO11.pdf>

Chocat, B. (1997). *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. vol. 5., Paris : Technique & Documentation-Lavoisier. ISBN-13 :978-2743001261

Collins, K. A., Hunt, W. F., & Hathaway, J. M. (2008). *Hydrologic Comparison of Four Types of Permeable Pavement and Standard Asphalt in Eastern North Carolina*. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(12), 1146-1157. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:12(1146)

Communauté métropolitaine de Montréal. (2008). *Règlement numéro 2008-47 sur l'assainissement des eaux*. Repéré sur le site de l'organisme Communauté métropolitaine de Montréal: http://cmm.qc.ca/fileadmin/user_upload/reglements/2008-47_v2.pdf

David, N., Leatherbarrow, D., Yes, D., Lester, J., Mckee, J. (2014). *Efficiencies of a Bioretention System for Trace Metals, PCBs, PAHs, and Dioxins in a Semiarid Environment*. *American Society of Civil Engineers*. 141(6). doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000921

Davis, A. P., Shokouhian, M., Sharma, H., & Minami, C. (2006). *Water Quality Improvement through Bioretention Media: Nitrogen and Phosphorus Removal*. *Water Environment Research*, 78(3). doi:10.2175/106143005X94376

Davis, A. P., Stagge, J. H., Jamil, E., Kim, H. (2012). *Hydraulic performance of grass swales for managing highway runoff*. Elsevier Science. 141(6). doi: 10.1016/j.watres.2011.10.017

Davis, B. S., Birch, G.F. (2011). *Spatial Distribution of Bulk Atmospheric Deposition of Heavy Metals in Metropolitan Sydney, Australia*. *Water Air Soil Pollut.* 214(1). doi: 10.1007/s11270-010-0411-3

DeBusk, K.M. et Wynn, T.M. (2011). *Storm-Water Bioretention for Runoff Quality and Quantity Mitigation*. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*. 137(9) doi : 2011, 137(9): 800-808

Descôteaux, J. (2014). *Suivi de l'implantation d'une noue engazonnée*. (Maîtrise), Université Laval

Duchemin, M. et Hébert, S, (2014). *Les métaux dans les rivières du sud-ouest du Québec (2008-2011)*, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-71296-1 (PDF), 24 pages, 17 annexes

Duchesne, S. (2015). *Subvention d'engagement partenarial*. Document inédit. Institut national de la recherche scientifique (INRS). Québec

Dugué, M. (2010). *Conception d'un jardin de pluie: théorie et étude de cas*. (Maîtrise), École Polytechnique de Montréal. Repéré de <http://publications.polymtl.ca/427/>

EPA. (1999). *Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices*. Repéré à https://www3.epa.gov/npdes/pubs/usw_a.pdf

EPA. (2011). *International Stormwater Best Management Practices (BMP Database, Pollutant Category Summary : Solids (TSS, TDS and Turbidity)*. Repéré à <https://pdfs.semanticscholar.org/ca78/08c605540f9f32414e59bebc68d7000c2073.pdf>

EPA. (2015). *Storm Water Management Model User's Manual Version 5.1*. Repéré à <https://www.innovyze.com/products/swmm/download/ZyPDF.pdf>

Environnement Canada. (2014). *Courbe IDF de l'Aéroport de St-Hubert*. Repéré à ftp://ftp.tor.ec.gc.ca/Pub/Engineering_Climate_Dataset/IDF/IDF_v2.30_2014-12-21/IDF_Files_Fichiers/

Fassman, E. A. Blackman, S. (2010). *Permeable Pavement Performance over 3 Years of Monitoring*. Communication au Low Impact Development International Conference (LID) 2010, San Francisco

Flaganan, K., Branchu, P., Ramier, D. et Gromaire, M.-C.. (2017). *Evaluation of the relative roles of a vegetative filter strip and a biofiltration swale in a treatment train for road runoff*. *Water Science & Technology*. 75 (4) doi: 10.2166/wst.2016.578

Forbes. (1997). *Ecotoxicologie :théorie et application*. INRA. ISBN : 2738006884

Freni, G., Mannina, G., & Viviani, G. (2009). *Stormwater infiltration trenches: a conceptual modelling approach*. *Water Science and Technology*, 60(1), 185-199. doi:10.2166/wst.2009.324

Geheniau, N. (2014). *Évaluation expérimentale de la performance d'un jardin de pluie et d'un toit vert en climat froid*. (Maîtrise), École Polytechnique de Montréal. Repéré à <https://publications.polymtl.ca/1382/>

Getter, K. L., Rowe, D. B., & Andresen, J. A. (2007). *Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention*. *Ecological Engineering*, 31(4), 225-231. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.06.004>

Glass, C. et Bissouma, S. (2005). *Evaluation of a parking lot bioretention cell for removal of stormwater pollutants*. *Ecosystems and Sustainable Development V*. doi : 1743-3541

Gülbaz, S., & Kazezyılmaz-Alhan, C. M. (2017a). *An evaluation of hydrologic modeling performance of EPA SWMM for bioretention*. *Water Science and Technology*, 76(11), 3035-3043. doi:10.2166/wst.2017.464

Gülbaz, S., & Kazezyılmaz-Alhan, C. M. (2017b). *Hydrological Model of LID with Rainfall-Watershed-Bioretention System*. *Water Resources Management*, 31(6), 1931-1946. doi:10.1007/s11269-017-1622-9

Hatt, B.E., Fletcher, T.D., Deletic, A. (2007). *Hydraulic and pollutant removal performance of stormwater filters under variable wetting and drying regimes*. *Water Science & Technology*. 56(12). doi: 10.2166/wst.2007.751

Hébert, S., Légaré, S. (2000). *Suivi de la qualité des rivières et petits cours d'eau, Québec*. Direction du suivi de l'état de l'environnement. Ministère de l'Environnement, envirodoq no ENV-2001-0141, rapport n° QE-123, 24 p. et 3 annexes

Jang, A., Seo, Y., Bishop, P.L. (2004). *The removal of heavy metals in urban runoff by sorption on mulch*. Elsevier Science. doi: 10.1016/j.envpol.2004.05.020

Jia, H., Wang, X., Ti, C., Zhai, Y, Field, R, Tafuri, Tafuri, A. N., Cai, H., Yu, L.. (2015). *Field monitoring of a LID-BMP treatment train system in China*. Springer International Publishing Switzerland, 187(373), 10.1007/s10661-015-4595-2

Khan, U. T., Vleo, C., CHU, A. et Van Dun, B. (2012). *Bioretention cell efficacy in cold climates: Part 2 water quality performance*. Canadian Journal of Civil Engineering, 39, 1222–1233

Khiari, L. (2016). *SLS-7021 : Phosphore et agroenvironnement*. Recueil inédit, Université Laval

Liu, K., & inor, J. (2005). *Performance evaluation of an extensive green roof*. Conseil national de recherches Canada

Lucke, T., Mohamed, M. A. K., Tindale, N. (2014). *Pollutant Removal and Hydraulic Reduction Performance of Field Grassed Swales during Runoff Simulation Experiments*. Water. doi: 10.3390/w6071887

MAPAQ. (2007). *Contrôle et élimination des algues dans les étangs piscicoles*. Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/dadd11algues.pdf>

MDDELCC. (2012). *Guide de gestion des eaux pluviales*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide-gestion-eaux-pluviales.pdf>

MDDELCC. (2013). *Manuel d'instructions à l'usage des observateurs en météorologie*. Direction du suivi de l'état de l'environnement. Québec. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/climat/surveillance/manuel-instruction-meteo.pdf>

Middleton, J. R., & Barrett, M. E. (2008). *Water Quality Performance of a Batch-Type Stormwater Detention Basin*. Water Environment Research, 80(2), 172-178

MRC Brome-Missisquoi. (2015). *Rapport final. Essai sur le terrain du comportement des cellules de biorétention. Projet Stationnement écologique de la MRC-Brome-Missisquoi*. Cowansville, 105 p.

Savaria (n.d). *Catalogue 2016 Matériaux Paysagers Savaria*. Document inédit

Nichols, P., & Lucke, T. (2016). *Evaluation of the long-term pollution removal performance of established bioretention cells*. GEOMATE International Society

Page, J. L., Winston, R. J., Mayes, D. B., Perrin, C., & Hunt, W. F. (2015). *Retrofitting with innovative stormwater control measures: Hydrologic mitigation of impervious cover in the municipal right-of-way*. Journal of Hydrology, 527, 923-932. doi:10.1016/j.jhydrol.2015.04.046

Read, J., Fletcher, T.D., Wevill, T., Deletic, A. (2009). *Plant Traits that Enhance Pollutant Removal from Stormwater in Biofiltration Systems*. International Journal of Phytoremediation. 2(1). doi: 10.1080/15226510902767114

Reddy, K. R., Xie, T., Dastgheibi, S. (2014). *Removal of heavy metals from urban stormwater runoff using different filter materials*. doi: 10.1016/j.jece.2013.12.020

Roger, S., Montrejaud-Vignole, M., Andral, M.C., Herremans, L., Forture, J.P. (1998). *Mineral, physical and chemical analysis of the solid matter carried by motorway runoff water*. 32(4) S0043-1354(97)00262-5

Spectrum Technologie, I. (n.d). *TDR 100 Soil Moisture Meter, Product manual*

Spolek, G. (2008). *Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon*. Urban Ecosystems, 11(4), 349-359. doi:10.1007/s11252-008-0061-z

Stagge, J. H., Davis, A. P., Jamil, E., Kim, H. (2012). *Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff*. 46(20). doi: 10.1016/j.watres.2012.02.037

Stagge, J. H., Davis, A. P. (2006). *Water Quality Benefits of Grass Swales in Managing Highway Runoff*. Water Environment Foundation. Récupéré de <https://www.environmental-expert.com/Files/5306/articles/13485/439.pdf>

Toronto and Region Conservation. (2015). *Gestion optimale des eaux pluviales : Étude comparative de la performance d'un bassin de biorétention et d'une tranchée d'infiltration : Document technique*. Repéré à http://www.sustainabletechnologies.ca/wp/wp-content/uploads/2015/07/BioVSTrench_TechBrief_July2015_FR.pdf

Vaillancourt, C. (2017). *Évaluation de la contribution du pavage perméable à la gestion des eaux pluviales en milieu urbain*. Résumé présenté au Symposium sur la gestion de l'eau, Lévis

Vinci Consultants. (2016). *Rapport de l'ingénieur et plans, révision 01 : Projet N° 13-569C TS8*. Document inédit

Winston, R.J., Hunt, W.F., Kennedy, S. G., Wright, .D (2011). *Evaluation of Highway Stormwater Practices along Interstate-40 in North. Carolina, USA*. 12th International Conference on Urban Drainage. Récupéré à <https://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/temp/12th%20ICUD/PDF/PAP005112.pdf>

ANNEXES

Annexe 1 - Sens de l'écoulement sur l'ensemble du marché public

La récupération des eaux de pluie du marché public est divisée en neuf zones. La surface de drainage de ces zones ainsi que le sens de l'écoulement sont présentés à la Figure 56.

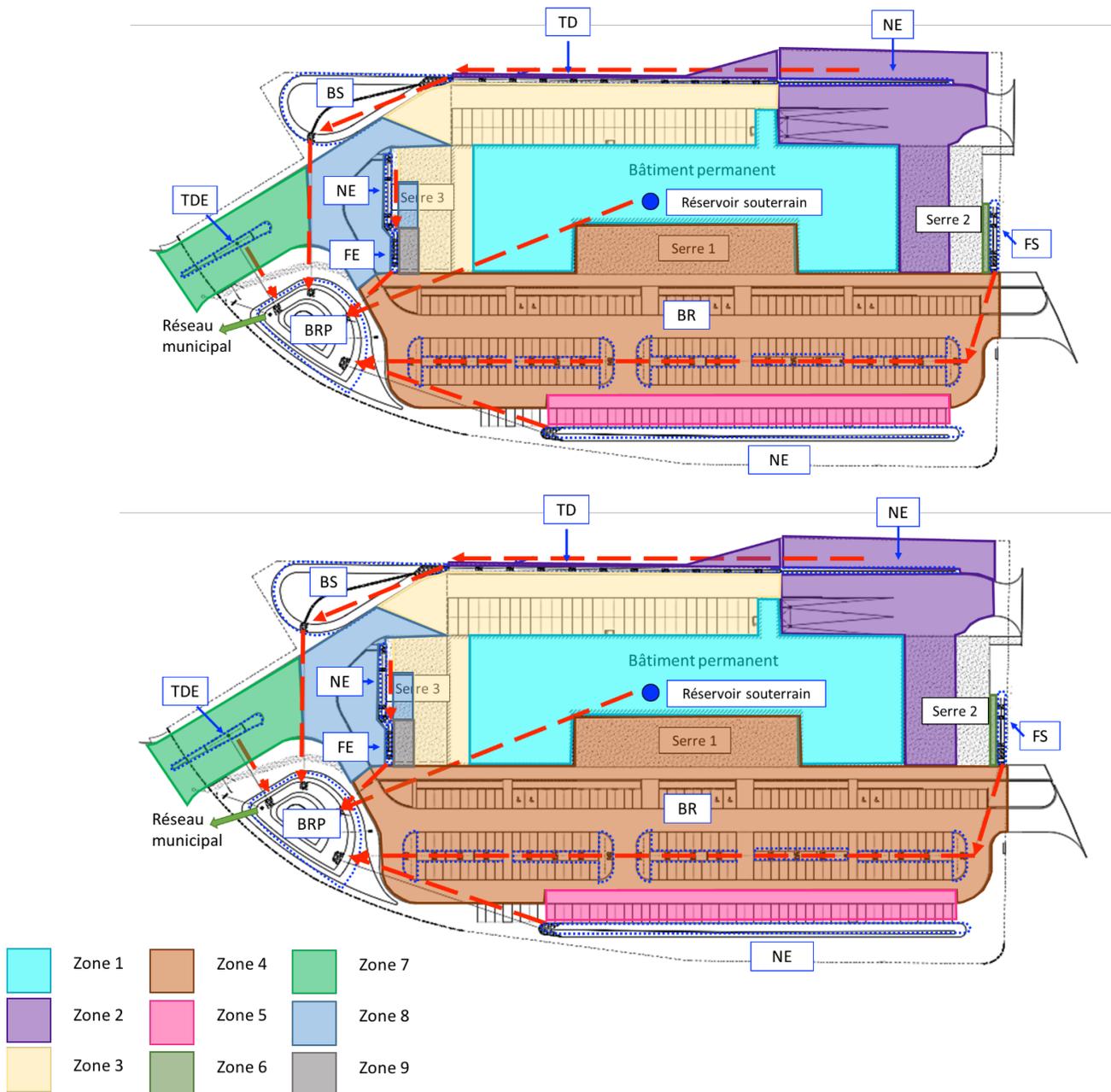


Figure 56 – Zones drainées par les PGOs et sens de l'écoulement

Zone 1 : Les eaux de pluie tombant sur le toit du marché sont récupérées via des gouttières, puis acheminées vers un réservoir installé au sous-sol du bâtiment permanent. Le trop-plein est évacué directement vers le bassin avec retenue permanente.

Zone 2 : Dû à sa configuration, 14 % des eaux tombant sur le toit du bâtiment du marché et 75 % de la serre 2 s'écoulent par une gouttière et s'additionnent aux eaux de ruissellement du stationnement. Ces eaux sont, par la suite, récupérées par la noue engazonnée (NE-2) située à l'arrière du marché. À ses eaux s'ajoutent les eaux ne s'étant pas infiltrées dans le gazon situé à l'arrière du marché. Grâce à sa pente de 0,2 %, les eaux de ces zones s'écoulent lentement vers la tranchée drainante de la zone 3.

Zone 3 : 100 % des eaux de pluie tombant sur le toit de la serre 3 et 6% du toit du bâtiment s'écoulent vers le stationnement arrière. Dans cette zone, c'est la tranchée drainante (TD-1) qui récupère ces eaux de ruissellement. Ces eaux s'infiltrent dans la tranchée et, à saturation, sont évacuées par la conduite perforée qui les dirige vers l'entrée du bassin sec. L'eau s'écoule ensuite par le chemin préférentiel du bassin sec pour atteindre la sortie qui mène au bassin avec retenue permanente.

Zone 4 : Les cinq cellules de biorétention récupèrent les eaux de ruissellement du stationnement principal, du pavé piétonnier et du toit de la serre 1. À saturation, les eaux s'écoulent vers le bassin avec retenue permanente.

Zone 5 : La noue engazonnée principale (NE-1) capte 15 % des eaux qui ruissellent sur le stationnement principal, puis les dirige vers le bassin avec retenue permanente.

Zone 6 : Un filtre à sable (FS-2) a été aménagé afin de recueillir l'eau tombant sur la dalle de béton de la serre lorsque le toit n'est pas installé. L'eau qui s'est infiltrée est récupérée par une conduite qui est connectée à la conduite perforée des cellules de biorétention. Cette eau s'écoule donc vers le bassin avec retenue permanente.

Zone 7 : Une seconde tranchée drainante (TD-2) permet de récupérer les eaux de ruissellement de l'entrée du marché. Comme les autres PGOs, celle-ci achemine les eaux de ruissellement infiltrées directement vers le bassin avec retenue permanente.

Zone 8 : La troisième noue engazonnée (NE-3) capte une partie de l'eau de ruissellement sur le stationnement ainsi que l'eau qui s'accumule dans une bande végétalisée. L'eau accumulée dans cette noue est ensuite dirigée vers un filtre à sable (FS-1).

Zone 9 : Tel que mentionné précédemment, le filtre à sable FS-1 récupère les eaux présentes dans la noue engazonnée NE-3. Il récupère également 37 % des eaux provenant de la dalle de béton prévue pour des fins récréatives. Une fois infiltrée, l'eau du filtre à sable est évacuée vers le bassin avec retenue permanente.

Comme le montre la figure précédente, les différentes zones ont une surface drainante différente. Le Tableau 22 présente les proportions de chacune des PGOs du marché par lesquelles l'eau passe.

Tableau 22 - Surface de drainage des PGOs

PGO	Surface de drainage (%)
Réservoir interne	17
Noue engazonnée (NE-1)	5
Noue engazonnée (NE-2)	13
Noue engazonnée (NE-3)	4
Tranchée drainante (TD-1)	28
Trachée drainante (TD-2)	3
Bassin sec (BS)	29
Cellules de biorétention (BR)	37
Filtre à sable (FS-1)	5
Filtre à sable (FS-2)	0,2
Bassin avec retenue permanente (BRP)	100

Comme le montre le Tableau 22, les eaux de pluie s'écoulent toutes vers le bassin avec retenue permanente avant d'atteindre le réseau d'égout pluvial de Longueuil.

Annexe 2 - Description des PGOs non impliquées dans les chaînes

Noue engazonnée

Les noues engazonnées ont pour principale fonction d'accumuler les eaux de ruissellement, puis de les transporter vers une autre PGO pour un éventuel traitement. Ces PGOs sont constituées de deux couches : une couche de gazon et 100 mm de terre végétale compressée. La Figure 57 illustre un exemple de la conception des noues.

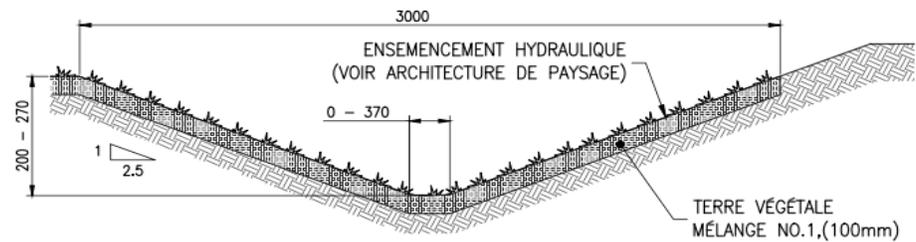


Figure 57 – Coupe des noues engazonnées secondaires NE-2, NE-3 (Vinci Consultants)

Selon le plan de conception, la pente visée des talus était de 1 : 2,5. Toutefois, lors de la construction, dû au manque d'espace, les pentes ont dû être révisées. Ainsi, les talus sont davantage pentus. De plus, au niveau de la pente longitudinale, celle-ci a été fixée à 0,2 %, ce qui favorise l'accumulation de l'eau à la surface

Filtre à sable

Les filtres à sable sont composés de 100 mm de pierres concassées dont le diamètre est supérieur à 40 mm et de 200 mm de sable drainant. La Figure 59 présente une coupe transversale du filtre à sable.

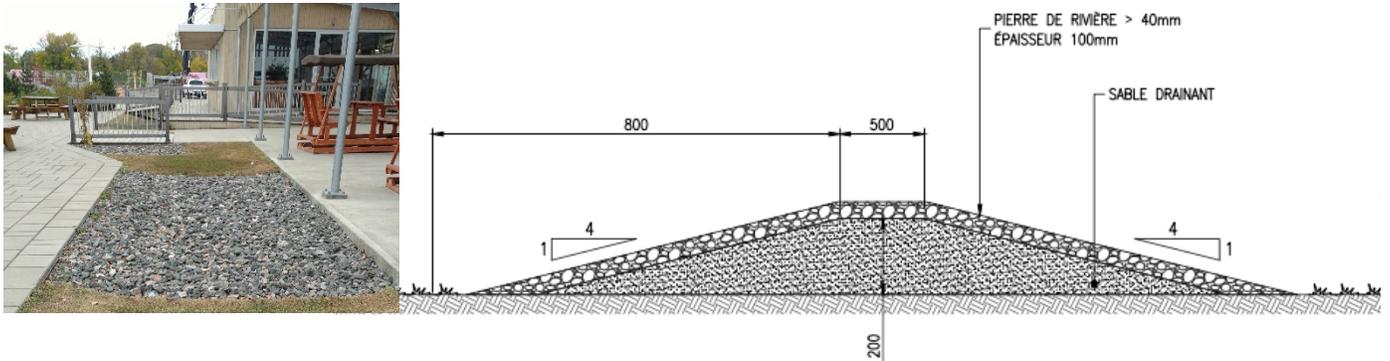


Figure 59 -Coupe du filtre à sable (Vinci Consultants)

L'eau infiltrée dans les filtres à sable est collectée par une conduite de 250 mm de diamètre dont la sortie est dirigée vers le bassin avec retenue permanente.

Réservoir interne

Lors de la construction du bâtiment principal, un réservoir souterrain a été installé au sous-sol. Celui-ci récupère la majorité de l'eau de pluie tombant sur le toit du marché qui est destinée à l'entretien des serres et à l'approvisionnement des toilettes. La citerne a 10,5 m de largeur et 11,75 m de longueur et 1,5 m de profondeur (Figure 60).

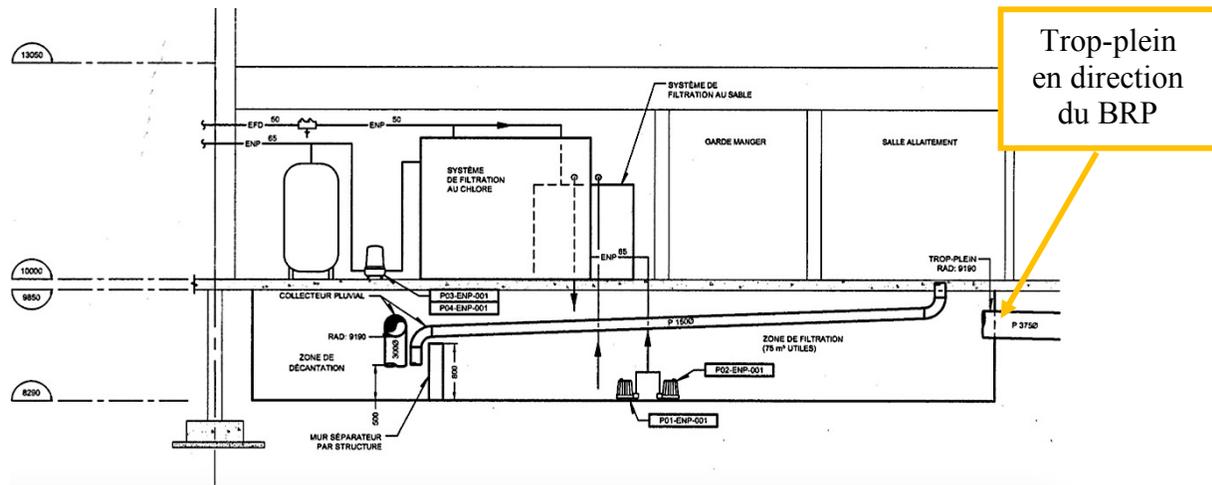


Figure 60 - Schéma du réservoir souterrain et ses installations (Pageau Morel et ass. inc)

Avant d'être utilisée pour l'entretien, l'eau passe par une chaîne de traitement physico-chimique. À même le réservoir, une zone de décantage a été construite favorisant le dépôt des particules sédimentables. Le surnageant est ensuite pompé vers un système de filtration au sable, puis dans un système de filtration au chlore. Une fois ces étapes complétées, l'eau est ensuite utilisée pour l'entretien. Dans l'éventualité où la capacité maximale du réservoir est atteinte, une sortie a été prévue. Une conduite de 375 mm de diamètre fait donc office de trop-plein et évacue l'eau par gravité vers le bassin avec retenue d'eau permanente.

Annexe 3 - Implantation des arbres dans les cellules de biorétention

Les Figures 61 et 62 illustrent les coupes des différentes sections des cellules de biorétention.

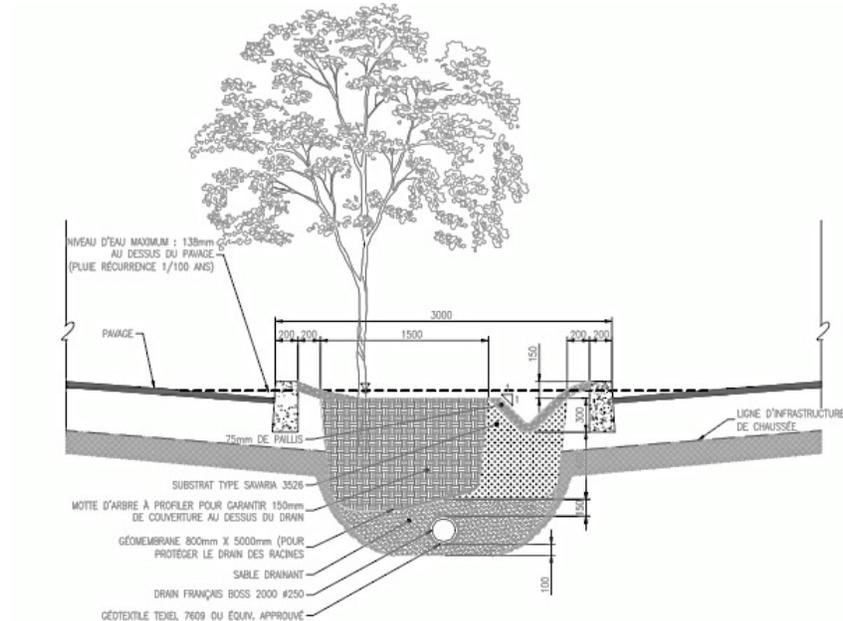


Figure 61 – Coupe des cellules de biorétention au niveau de l'implantation des gros arbres
(Vinci Consultants)

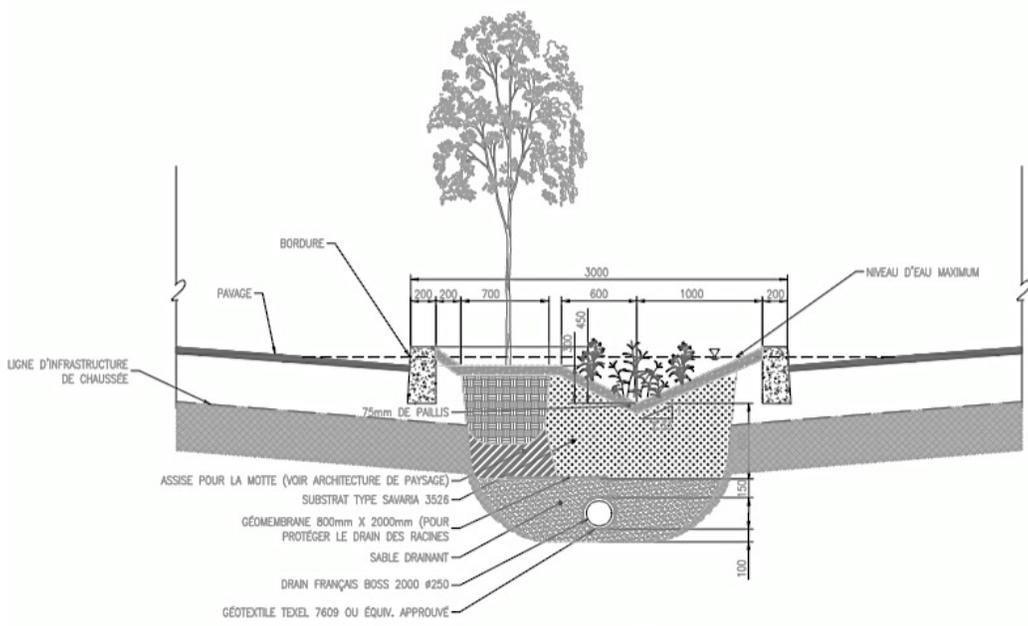


Figure 62 – Coupe des cellules de biorétention au niveau de l’implantation des petits arbres (Vinci Consultants)

Annexe 4 - Correction des mesures de l'enregistreur et estimation des débits

L'événement du 24 juillet 2017 sert d'exemple pour la correction des mesures de l'enregistreur et l'estimations des débits. Voici les étapes de la démarche à suivre.

1. Déterminer la hauteur d'eau correspondant au débit de base mesuré par l'enregistreur et corriger les hauteurs d'eau

Lors de la pluie du 24 juillet 2017, l'écoulement sortant de la conduite des BR a été observé approximativement vers 13h00. Ainsi, les lectures de hauteurs d'eau précédant cette heure ont été associées à un débit nul. La courbe des hauteurs d'eau devait donc être rabaissée en soustrayant une hauteur dite de base afin que les lectures mesurées avant 13h00 soient égales à 0 (Figure 63).

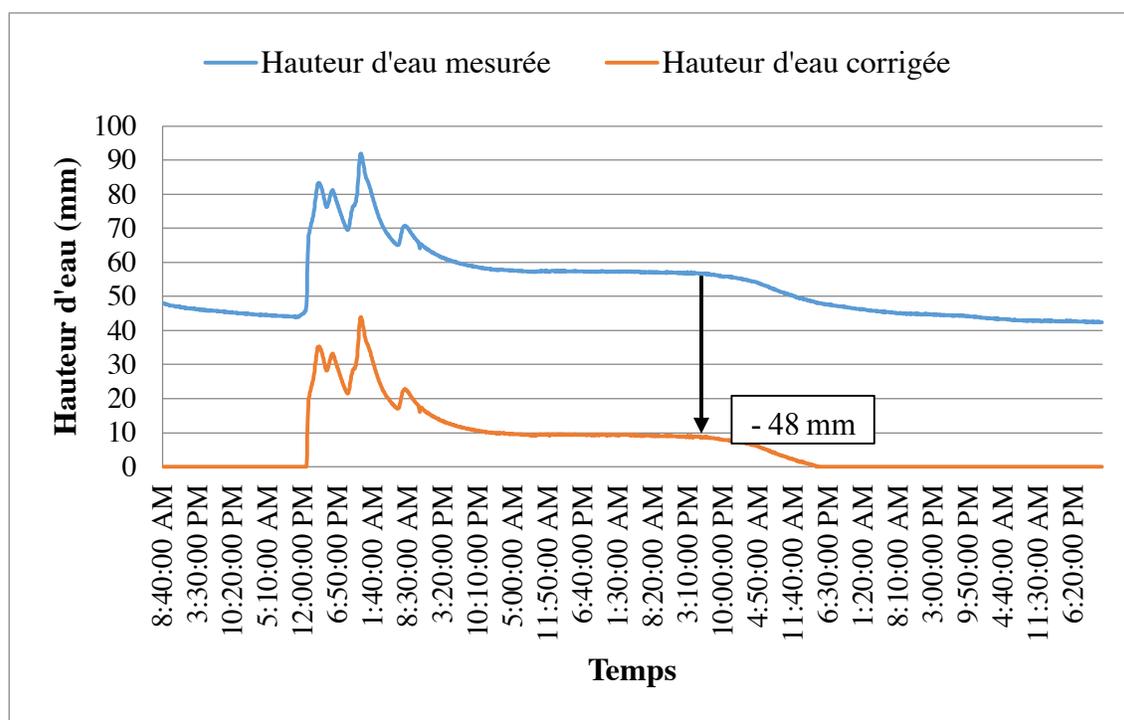


Figure 63 - Hauteurs d'eau mesurées par l'enregistreur lors de l'évènement du 24 juillet 2017

Pour cette pluie, la correction nécessaire sur la hauteur d'eau de base est de 48 mm puisque les hauteurs d'eau correspondant au débit de base sont inférieures à la hauteur d'eau calculée au moment de la calibration de l'appareil. Dans le cas où les hauteurs d'eau mesurées précédant un

Annexe 5 - Caractéristiques de la surface du sol

Le tableau 23 présente les paramètres utilisés pour modéliser les sous-bassins dans le modèle SWMM.

Tableau 23 – Caractéristiques de la surface du sol

Critère de conception		Asphalte	Gazon	Végétaux	Toit bâtiment	Toit serres	Références
Coefficient de Manning	Surface imperméable (N-imperv.)	0,011	-	-	0,024	0,013	McCuen, R. et al., (1996) cité dans EPA, (2015)
	Surface perméable (N-perv.)	-	0,41	0,13	-	-	
Perte par dépression (mm)	Surface imperméable (Dstore-imperv.)	2	-	-	1,25	0 ¹	MDDELCC, Guide de gestion des eaux pluviales, p. 6-16 (2012)
	Surface perméable (Dstore-perv.)	-	8,8	10	-	-	

Annexe 6 – Critères de conception des PGOs

Les Tableaux 24 à 27 présentent les critères utilisés pour modéliser les PGOs.

Tableau 24 - Critères de conception des cellules de biorétention (Vinci Consultants, 2016)

Caractéristique de la PGO	Valeur adoptée	Explicatif
Surface		
Berme	300 mm	Zone d'emmagasinement avant trop-plein
Faction du volume de la végétation	0,1	% de représentation de la végétation en comparaison avec le volume du sol
Coefficient de rugosité de la surface (N de Manning)	0,3	Recommandation de la Ville de Montréal
Pente de la surface	0,5 %	Même pente que la rue
Sol		
Épaisseur	450 mm	Épaisseur du substrat
Porosité	0,437	Valeur proposée par SWMM pour un loam sableux
Capacité du sol	0,105	Valeur proposée par SWMM pour un loam sableux
Point de flétrissement	0,047	Valeur proposée par SWMM pour un loam sableux
Conductivité	40 mm/h	Ficher Savaria Natureausol (perméabilité au chantier minimale avec un facteur de sécurité de 2)
Pente de conductivité	5,7	Valeur proposée par SWMM pour un loam sableux
Hauteur de charge	110 mm	Valeur proposée par SWMM pour un loam sableux
Rétention		
Épaisseur	500 mm	Épaisseur de la pierre
Ratio des vide (vide/solide)	0,5	Sol limitant l'infiltration en raison du roc présent à 2-3 m de profondeur
Taux d'infiltration	0,5	
Facteur de colmatage	0	Non applicable pour simulation courte durée
Drain		
Coefficient d'écoulement (Flow Coefficient)	1	Recommandation forum PCSWMM, Valeur typique
Exposant de l'écoulement (Flow Exponent)	0,5	Valeur typique
Hauteur du drain	150	Hauteur du drain VS fond de la pierre

Tableau 25 - Critères de conception de la tranchée drainante

Type de PGO	Tranchée drainante	
Surface		
Berme (mm)	300	Plan de conception de Vinci Consultants (2014)
Faction du volume de la végétation	0	Aucune végétation
Coefficient de rugosité de la surface (N de Manning)	0,3	Rapport technique Vinci Consultant (2016)
Pente de la surface (%)	0,15	Plan de conception de Vinci Consultants (2014)
Storage		
Épaisseur (mm)	525	Plan de conception de Vinci Consultants (2014)
Ratio des vide (vide/solide)	0,5	Rapport technique Vinci Consultant (2016)
Taux d'infiltration (mm/h)	0,5	Rapport technique Vinci Consultant (2016)
Facteur de colmatage	0	Rapport technique Vinci Consultant (2016)
Drain		
Coefficient d'écoulement (Flow Coefficient)	1	Rapport technique Vinci Consultant (2016)
Exposant de l'écoulement (Flow Exponent)	0,5	Rapport technique Vinci Consultant (2016)
Hauteur du drain (mm)	100	Plan de conception de Vinci Consultants (2014)

Tableau 26 Dimensionnement du bassin sec

Élévation (m)	Profondeur (m)	Aire (m ²)
27,05	0,00	17
27,08	0,03	107
27,11	0,06	191
27,14	0,09	249
27,17	0,12	300
27,2	0,15	369
27,4	0,35	413
27,6	0,55	462
27,8	0,75	502
28,0	0,95	619

Tableau 27 - Dimensionnement du bassin avec retenue d'eau permanente

Élévation (m)	Profondeur (m)	Aire (m ²)
25,7	0,0	118
26,4	0,7	186
27,4	1,7	535
28,0	2,3	747

Annexe 7 – Effet tampon des cellules de biorétention

Le Tableau 28 et les Figures 66 à 72 présentent les résultats de l'effet tampon des cellules de biorétention.

Tableau 28 – Volumes et débits de pointe entrant et sortant des BR

Date	Volume entrant (m ³)	Volume sortant (m ³)	Débit de pointe ruissellement (L/min)	Débit de pointe sortie BR (L/min)
13/10/16	30	4	532	21
16/10/16	41	16	1003	42
25/05/17	85	26	1062	79
29/05/17	64	15	532	13
5/06/17	291	98	1213	167
27/06/17	149	59	6703	599
17/07/17	6	0	462	0
24/07/17	60	28	408	21
18/08/17	114	52	2191	211

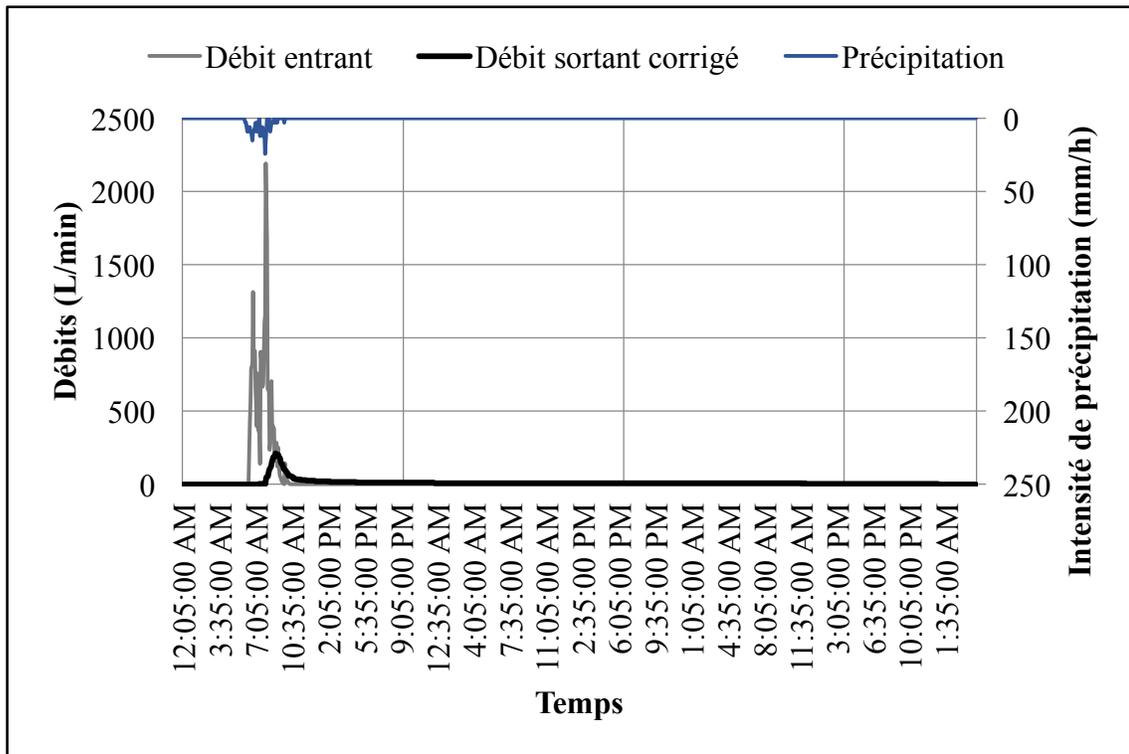


Figure 66 – Performance hydraulique des BR lors de l'événement du 13 octobre 2016

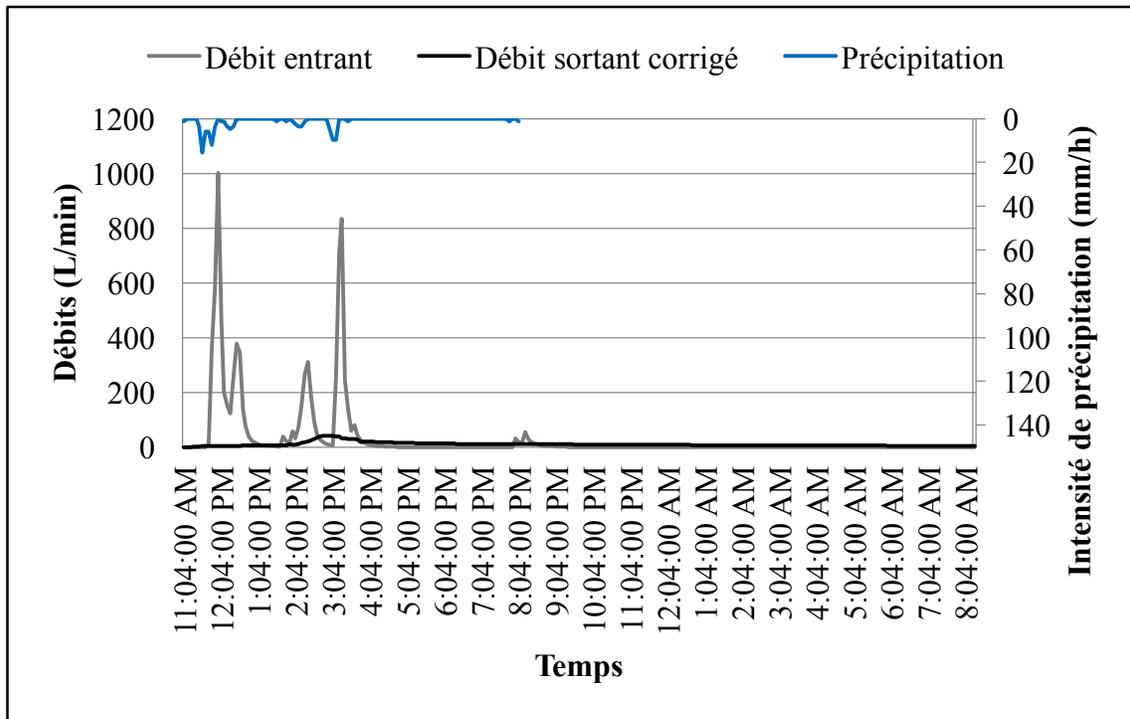


Figure 67 - Performance hydraulique des BR lors de l'événement du 16 octobre 2016

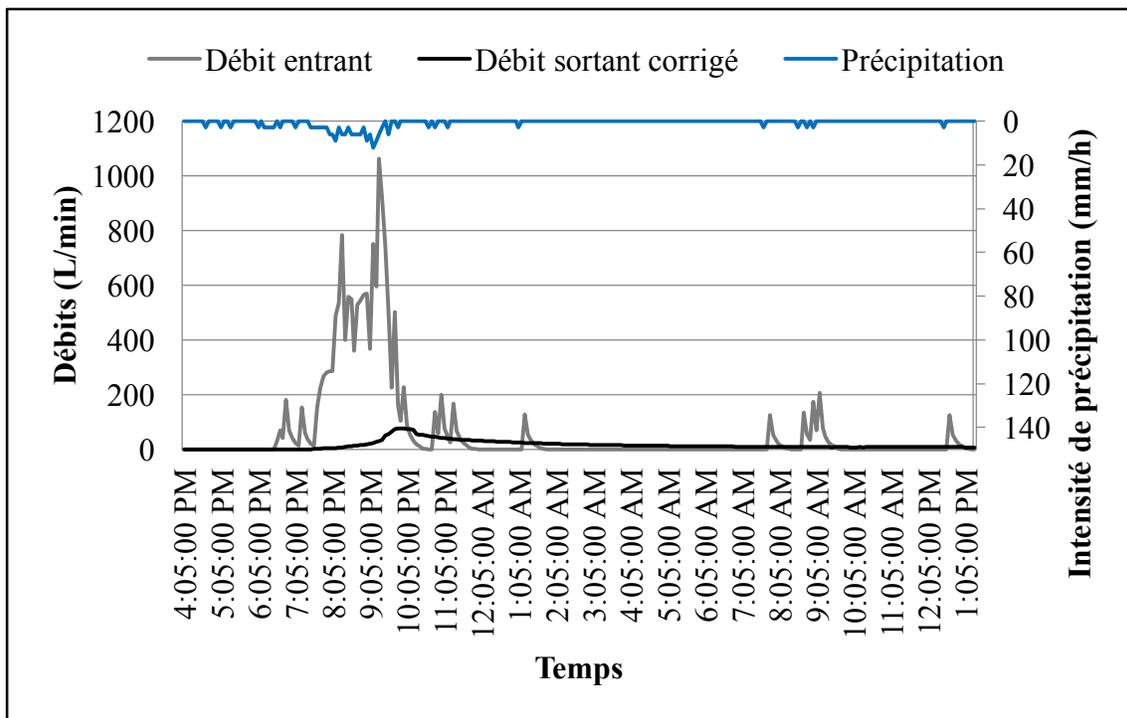


Figure 68 - Performance hydraulique des BR lors de l'événement du 25 mai 2017

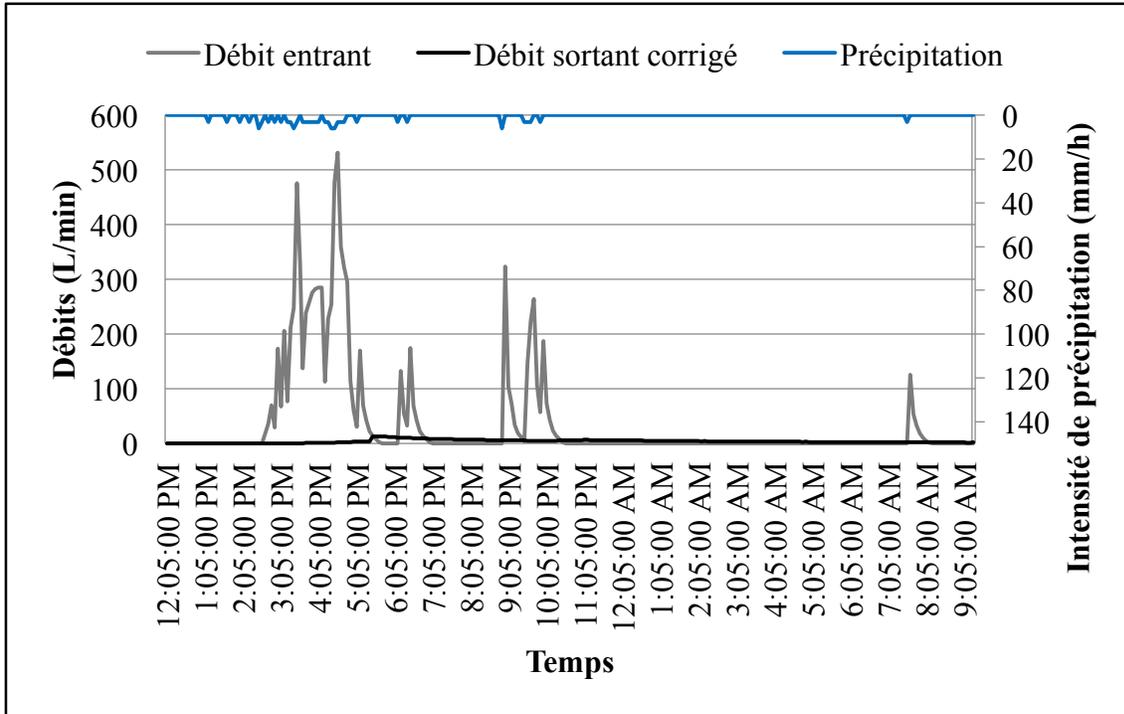


Figure 69 - Performance hydraulique des BR lors de l'événement du 29 mai 2017

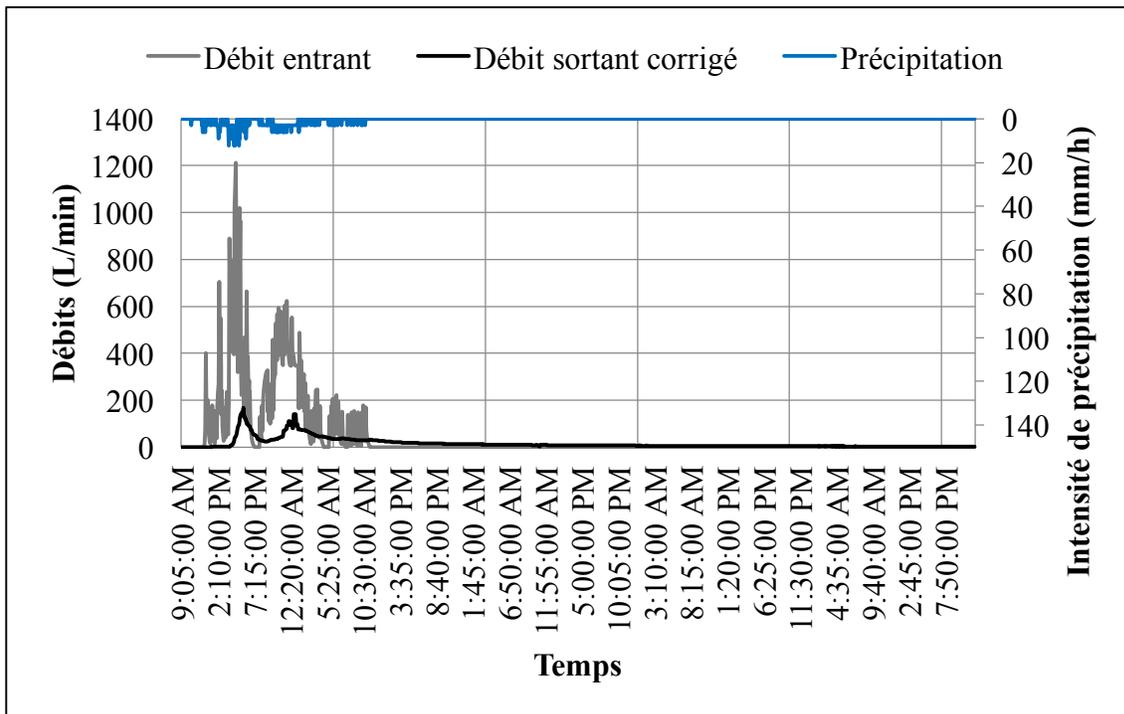


Figure 70 - Performance hydraulique des BR lors de l'événement du 5 juin 2017

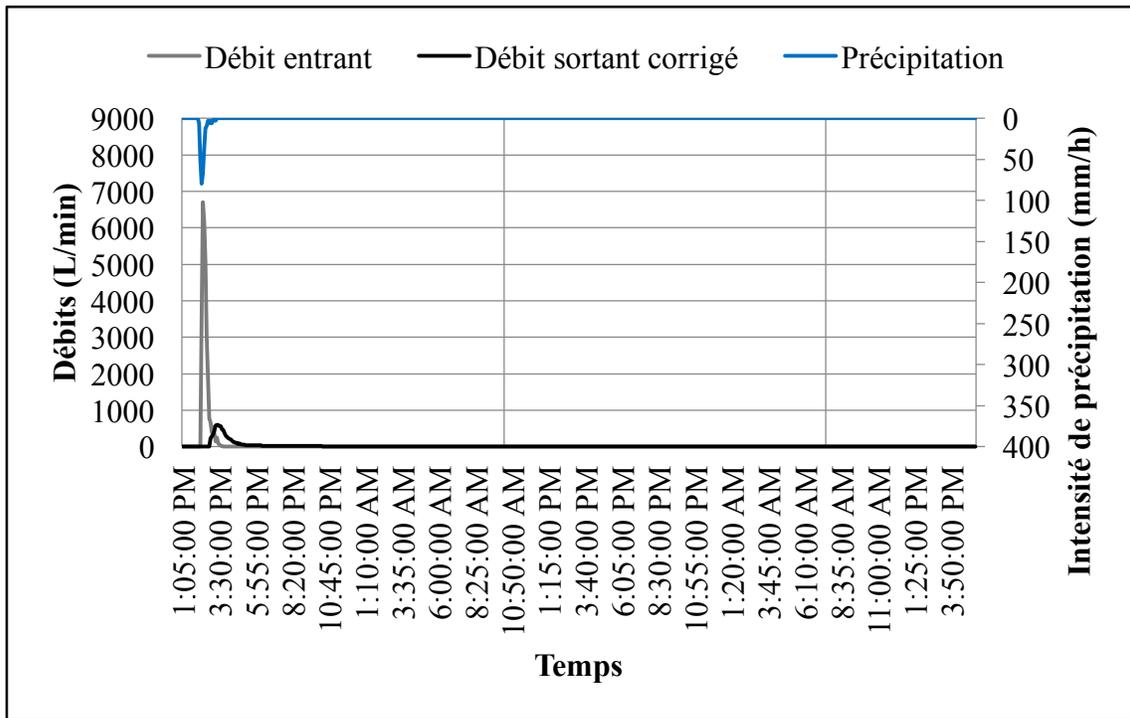


Figure 71 - Performance hydraulique des BR lors de l'événement du 27 juin 2017

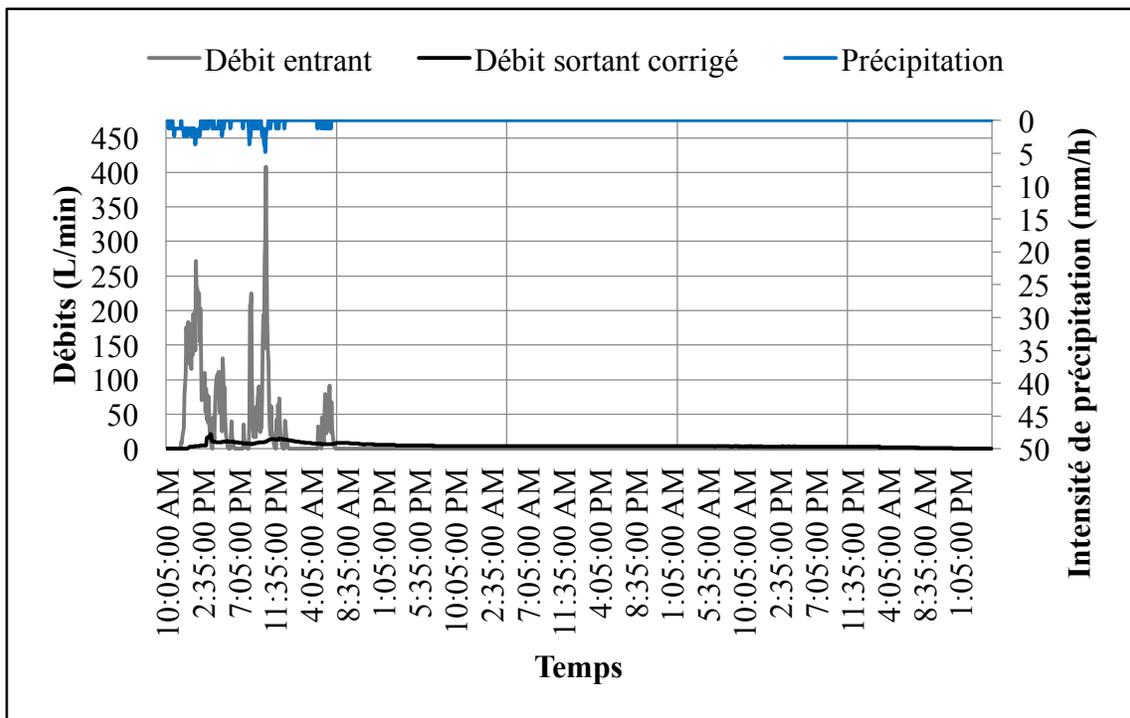


Figure 72 - Performance hydraulique des BR lors de l'événement du 24 juillet 2017