

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

COMPARAISON DES COUTS DE DIVERSES MESURES D'ADAPTATION DES RESEAUX DE DRAINAGE URBAIN

Par

Landrie Anaelle Joana MAKUNGU

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

Jury d'évaluation

Président du jury et
Examineur interne

Karem CHOKMANI
INRS

Examineur externe

Saad BENNIS
ÉTS

Directrice de recherche

Sophie DUCHESNE
INRS

À toi mon mini-pois, parce que j'y suis arrivée avec toi.

REMERCIEMENTS

Avant d'entamer ce travail, je tiens d'abord à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cet humble travail. Je voudrais d'abord bénir le Seigneur pour la grâce qu'il m'a accordée de pouvoir réaliser jusqu'à terme ce travail.

En second, je voudrais remercier particulièrement Professeure **Sophie Duchesne** pour son sourire, sa patience, son aide et son encadrement. Par la suite, je souhaite remercier chaque membre du jury, c'est-à-dire Professeur **Karem Chokmani** et Professeur **Saad Bennis** pour le temps qu'ils ont accordé à la correction et la relecture de ce travail. Mais aussi l'étudiante en PhD **Hind El Housni** pour son aide précieuse. Sans oublier, toute l'équipe de l'**INRS-ETE** en particulier Professeurs **Patrick Drogui** et **Alain Rousseau** pour leur attention lors de mon séminaire de maîtrise, ainsi que tous ceux qui m'ont encadrée tout au long de ces trimestres passés au sein de cet institut.

En troisième, je voudrais remercier tout le corps professoral de l'**ISHEDD** pour les bases qu'ils m'ont transmises au cours des quatre années précédentes passées au sein de leur établissement à Rabat.

Enfin, mes remerciements vont se tourner vers toute ma grande famille, mais en particulier mes quatre parents pour leur soutien physique, psychologique, moral et spirituel. Je voudrais aussi remercier ma petite famille au Québec, **Tancrède Ropivia** pour ta patience et ton soutien, **Lorraine Ikounga** pour tout ce qu'elle a pu m'apporter qui n'est pas quantifiable, et **Azra Ropivia** pour avoir été ma raison de continuer.

Je ne pourrais citer chaque personne ayant contribué à l'élaboration de ce travail, mais je remercie chacun d'eux d'avoir été là pour moi.

RÉSUMÉ

Il existe principalement deux manières de gérer l'eau pluviale pour limiter les inondations causées par des débordements de conduites en milieu urbain. La première consiste à changer le diamètre d'une ou d'un ensemble de conduites afin d'accroître la capacité de transport du réseau et donc de réduire la fréquence des surcharges et des débordements. La seconde, nommée contrôle à la source, consiste à réduire la quantité d'eau collectée, ce qui peut être réalisé en ajoutant sur les divers sous-bassins des structures favorisant l'infiltration et/ou l'évapotranspiration de l'eau ruisselée.

Les études comparatives de ces deux types de gestion sont nombreuses, cependant, peu d'entre elles s'intéressent aux différences de coûts. Afin d'explorer cet axe, nous avons émis l'hypothèse selon laquelle la méthode dite durable, faisant appel au contrôle à la source, peut s'avérer moins coûteuse que celle nécessitant un agrandissement des conduites. L'objectif principal du mémoire est de vérifier cette hypothèse.

Cet objectif a été vérifié sur un cas d'étude, qui est un réseau urbain réel drainant une superficie de 260 ha, en utilisant six pluies réelles, ayant des périodes de retour entre 2 et 5 ans. Ainsi, nous avons réalisé différentes simulations à l'aide du logiciel PCSWMM version7, afin de pouvoir, dans l'ordre :

- Énumérer les nœuds en surcharge et leur position;
- Appliquer un algorithme qui permet d'établir les conduites responsables de la surcharge et augmenter leur diamètre pour l'application du scénario d'agrandissement;
- Identifier les sous-bassins où il est rentable d'installer des cellules de biorétention pour l'application du scénario avec pratiques de gestions optimales (PGO).

Pour ce cas d'étude, l'hypothèse a été validée, c'est-à-dire que, pour une même performance hydraulique, le scénario avec PGO s'est avéré moins coûteux que le scénario de remplacement de conduites, soit trois fois moins cher au minimum. Néanmoins, nous avons pu constater que, sur un réseau réel, l'ajout de PGO doit aussi s'accompagner d'ajustements structuraux sur certaines conduites.

Mots clés : eau pluviale, conduites, changement de diamètre, contrôle à la source, surcharges, coût, pratiques de gestion optimale.

TABLE DES MATIÈRES

1.	Introduction.....	1
2.	Revue de littérature.....	5
2.1.	Évolution des concepts.....	5
2.2.	Définitions.....	7
2.2.1.	Low Impact Development.....	7
2.2.2.	Best Managements Practices ou Pratiques de Gestion Optimale.....	7
2.2.3.	Contrôle à la source	9
2.3.	Systèmes de biorétention.....	9
2.3.1.	Applicabilité.....	11
2.3.2.	Avantages.....	11
2.3.3.	Limitations	11
2.4.	Gestion des eaux pluviales et changements climatiques.....	12
2.5.	SWMM.....	12
2.5.1.	PCSWMM.....	15
2.5.2.	Fonctionnement de la simulation avec SWMM.....	15
2.5.3.	Objets conceptuels	15
2.5.4.	Gestion des eaux de pluie dans SWMM.....	17
2.5.5.	Modélisation des pratiques de gestion optimale des eaux pluviales dans SWMM	17
2.5.6.	Équations de modélisation	18
2.6.	Étude du réseau de drainage par El Housni.....	20
2.7.	Étude du coût du contrôle à la source par rapport au changement de conduites	21
3.	Méthodologie	23

3.1.	Modèle.....	23
3.2.	Évènements pluvieux	24
3.3.	Configuration de la PGO.....	27
3.3.1.	Analyse de sensibilité	27
3.3.2.	Configuration de la couche de surface.....	31
3.3.3.	Configuration de la couche de sol.....	32
3.3.4.	Configuration de la couche de stockage	35
3.3.5.	Drain souterrain	36
3.3.5.	Récapitulatif.....	37
3.4.	Application de PGO pour réduire les surcharges.....	39
3.5.	Méthodologie pour l'identification des conduites à remplacer	42
3.6.	Calcul des coûts.....	43
4.	Résultats et discussions.....	45
4.1.	Sommaire des résultats.....	45
4.1.1.	Nœuds en surcharge sur le réseau non modifié	45
4.1.2.	Nombre et localisation des PGO pour éliminer les surcharges.....	49
4.1.3.	Changement de conduites avec ajout de PGO	55
4.1.4.	Changement de conduites sans ajout de PGO.....	56
4.2.	Exemple d'élimination de la surcharge pour une zone	57
4.3.	Comparaison des coûts de construction	63
5.	Conclusions.....	65
6.	Références.....	67
	Annexes.....	71
	Annexe I.....	71
	Annexe II	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Récapitulatif des évènements choisis (tiré de El Housni, 2018).....	25
Tableau 2 : Caractéristiques des LIDs dans PCSWMM (traduit de CHI, 2017a)	27
Tableau 3: Test de sensibilité des paramètres.....	29
Tableau 4: Valeurs des paramètres pour le sable (source : CHI, 2007).....	34
Tableau 5: Récapitulatif des valeurs pour le paramétrage des cellules de biorétention dans le logiciel PCSWMM.....	37
Tableau 6: Nombre de nœuds en surcharge	48
Tableau 7: Récapitulatif de l'impact des PGO	50
Tableau 8: Liste des PGO ajoutées au secteur pour réduire les surcharges.....	52
Tableau 9: Liste des conduites dont le diamètre a dû être changé malgré l'utilisation de PGO sur les sous-bassins	56
Tableau 10: Surcharges des nœuds avant l'utilisation des PGO pour la zone prise en exemple avec la pluie 2.....	58
Tableau 11: Surcharges des nœuds après ajout de cellules de biorétention sur le sous-bassin S10 avec la pluie 2	59
Tableau 12: Surcharges des nœuds après ajout de cellules de biorétention sur les sous-bassins S10 et S103 pour la pluie 2	60
Tableau 13: Surcharges des nœuds après ajout de cellules de biorétention sur les sous-bassins S10, S103, S102, S104 et S118 avec la pluie 2.....	61
Tableau 14 : Coût total de construction avec les valeurs minimales de coûts unitaires ...	63
Tableau 15 : Coût total de construction avec les valeurs maximales de coûts unitaires ..	64
Tableau 16 : Nouveau diamètre appliqué	72
Tableau 17: Coûts de construction pour bassins de biorétention et jardins de pluie (extrait de Gérardin, 2017)	73

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Processus de contrôle pour la gestion des eaux pluviales (adapté de InfraGuide, 2003; Ontario Ministry of the Environmental, 2003; Rivard, 2009)	6
Figure 2: Coupe type d'une cellule de biorétention (extraite de Glorieux, 2010).....	10
Figure 3: Schéma d'une cellule de biorétention typique(inspirée de James & Rossman,,2012; Rossman et al., 2016).....	18
Figure 4: Carte du réseau étudié	23
Figure 5a : Graphiques des hauteurs de pluie en fonction du temps (pas de temps de 5 min) pour les évènements 1 et 2	25
Figure 5b : Graphiques des hauteurs de pluie en fonction du temps (pas de temps de 5 min) pour les évènements 3 à 6.....	26
Figure 6: Interface PCSWMM de la couche de surface des cellules de biorétention avec valeurs par défaut.....	31
Figure 7: Interface PCSWMM de la couche de sol des cellules de biorétention avec valeurs par défaut.....	33
Figure 8: Interface PCSWMM de la couche de stockage des cellules de biorétention avec valeurs par défaut.....	35
Figure 9 : Schéma de l'application de la PGO.....	39
Figure 10: Nœuds en surcharge pour la pluie 1	45
Figure 11: Nœuds en surcharge pour la pluie 2	46
Figure 12: Nœuds en surcharge pour la pluie 3	46
Figure 13: Nœuds en surcharge pour la pluie 4	47
Figure 14: Nœuds en surcharge pour la pluie 5	47
Figure 15: Nœuds en surcharge pour la pluie 6	48
Figure 16: Sous-bassins sur lesquels des cellules de biorétention ont été ajoutées pour toutes les pluies	51
Figure 17: Distribution des pourcentages de la superficie de chaque sous-bassin couverts par les cellules de biorétention.....	53
Figure 18 : Aperçu de l'occupation du sol du sous-bassin S119_Pseudo (Source : PCSWMM)	54

Figure 19: Aperçu de l'occupation du sol du sous-bassin S58_Pseudo (source : PCSWMM vue avec Google maps hybrid)	55
Figure 20: Carte de la zone prise en exemple avec les détails des modifications	57
Figure 21: Nœuds restants en surcharge et conduite changée	61
Figure 22: Profil de la conduite PLU_156702 et des conduites encadrantes	62

LISTE DES ÉQUATIONS

1 En surface.....	19
2 Mélange de sol.....	19
3 Couche de stockage.....	19

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BMP : *Best Management Practices*

CHI : *Computational Hydraulics International*

EPA : *Environmental Protection Agency*

GVSD : *Greater Vancouver Sewerage and Drainage District*

LID : *Low Impact Development*

PCSWMM : *Personal Computer Storm Water Management Model*

PGO : *Pratiques de Gestion Optimale*

SWMM : *Storm Water Management Model*

1. Introduction

Les inondations dues aux réseaux d'égout surviennent principalement lorsque le ruissellement produit par une pluie, qui est un phénomène aléatoire, dépasse le débit que les conduites du réseau sont en mesure de transporter (Renard & Volte, 2009). En raison du changement climatique et de la dégradation de l'état des réseaux, la fréquence de ces inondations augmente depuis quelques années et on s'attend à ce qu'elle continue d'augmenter au cours des prochaines décennies (Mailhot *et al.*, 2014). Par ailleurs, les méthodes de gestion conventionnelles des eaux pluviales favorisent le ruissellement. Ce ruissellement est une des causes d'inondation des rivières urbaines par débordement (Vaucelle, 1999). De nouvelles méthodes de gestion du ruissellement, plus durables, favorisent quant à elles l'infiltration, l'évaporation et la rétention des eaux de ruissellement (Marsalek & Chocat, 2002; MDDEP, 2011; Watt *et al.*, 2003). Ces méthodes, nommées pratiques de gestion optimale (PGO) au Québec, permettent de réguler le débit entrant dans et/ou sortant du réseau (Huber, 2001; MDDEP, 2011). Notre sujet de maîtrise s'intéresse à la régulation à la source des eaux de ruissellement, c'est-à-dire aux méthodes de rétention d'eau en amont du réseau. Nous nous intéresserons plus particulièrement aux cellules de biorétention. Ces méthodes favorisent l'infiltration au détriment du ruissellement et permettent de réduire les débits entrant dans les conduites (MDDEP, 2011).

De nombreuses questions se posent par rapport à la rentabilité de ces nouvelles méthodes. Jusque-là, la littérature, à notre connaissance, ne se préoccupe que de l'efficacité hydraulique localisée des méthodes de contrôle à la source et n'a pas démontré que la gestion des eaux pluviales par bassins de biorétention sur la totalité d'un territoire est à long terme plus rentable que la gestion conventionnelle des eaux pluviales (Dugué, 2010; Holzbauer-Schweitzer, 2016; Idaho Department of Environmental Quality, 2005; Sebti, 2016; Wyoming Department of Environmental Quality & Water Quality Division, 2013).

Notre hypothèse est que la gestion par PGO des eaux pluviales s'inscrit dans une optique de développement durable et, de ce fait, est plus rentable que le remplacement de

conduites pour maintenir le niveau de service des réseaux de drainage urbain (ce niveau de service étant défini par la fréquence d'apparition des problèmes de refoulement).

L'objectif principal de ce mémoire est de démontrer l'hypothèse de la rentabilité des cellules de biorétention sur un réseau d'une ville réelle, en s'appuyant sur des précipitations réelles d'une période de retour de 2 à 5 ans. Pour répondre à cet objectif, nous proposons de répondre aux questions suivantes :

- L'utilisation exclusive des PGO permet-elle de résoudre le problème de surcharge des conduites pour des épisodes pluvieux de période de retour de 2 à 5 ans ?
- Quelle est la meilleure solution pour l'élimination totale du refoulement des conduites du réseau étudié soumis à des événements pluvieux de récurrence de 2 à 5 ans ?

Pour répondre à ce questionnement, nous proposons de simuler l'hydrologie et l'hydraulique d'un réseau d'une ville de la province de Québec en considérant :

- des épisodes pluvieux réels ayant une période de retour de 2 à 5 ans;
- des cellules de biorétention paramétrées selon des critères d'efficacité hydrologique;
- des simulations d'un réseau sans modification, pour évaluer les zones de refoulement, avec le logiciel PCSWMM (CHI, 2017b; James & Rossman, 2012);
- des choix de localisation et de quantité de cellules de biorétention en fonction du pourcentage de sol inoccupé des sous-bassins;
- des simulations du réseau en le modifiant par ajout de PGO et/ou en augmentant le diamètre de certaines conduites, avec le logiciel PCSWMM;
- des moyens optimaux de suppression de la surcharge des conduites;
- une évaluation des coûts de chaque solution simulée.

Le deuxième chapitre de ce mémoire recense l'évolution de la gestion des eaux pluviales et énonce l'applicabilité de la biorétention dans un climat québécois. Il présente aussi les critères et les équations de modélisation de PGO dans le logiciel PCSWMM. Le troisième chapitre détaille la méthodologie utilisée pour répondre à nos objectifs, en énonçant tout d'abord le choix des pluies, puis le paramétrage utilisé pour chaque cellule de

biorétention, enfin le déroulement des différents types de simulations. Le quatrième chapitre est celui où les résultats sont présentés et discutés, et qui permettra d'évaluer si les cellules de biorétention sont avantageuses, d'un point de vue économique, pour régler la problématique des surcharges sur le réseau étudié. Finalement, quelques conclusions et pistes de solutions sont énoncées au cinquième chapitre.

2. Revue de littérature

2.1. Évolution des concepts

Le développement urbain, dans un contexte où le développement durable est privilégié, implique la prise en compte de la gestion des eaux pluviales. En effet, historiquement, l'urbanisation d'un territoire s'accompagne nécessairement d'une imperméabilisation des sols (Miller *et al.*, 2014; Rivard, 2009). Cependant, cette imperméabilisation favorise le ruissellement, modifie le régime hydrologique et, par conséquent, augmente les débits de crue et défavorise la recharge de la nappe (Rivard, 2009).

L'historique de la conception du drainage urbain a été répertorié par Rivard (2009) :

- Du milieu des années 1800 et pendant tout le siècle qui a suivi : méthode rationnelle, avec comme objectif d'évacuer rapidement et efficacement les débits de ruissellement (Kuichling, 1889; cité dans Rivard, 2009).
- À partir des années 1970 : contrôle de la qualité de l'eau et protection contre les inondations.
- À partir des années 1980 : apparition des réseaux séparés pour le contrôle de la pollution.
- À partir des années 2000 : apparition d'un nouveau contexte privilégiant le développement durable.

Ce nouveau contexte entraîne une planification intégrée de la gestion des eaux pluviales (De Paola *et al.*, 2015; Fletcher *et al.*, 2014; Mailhot *et al.*, 2014; MDDEP, 2011; Rivard, 2009). On parle alors d'un nouveau paradigme, qui est une transition entre une planification traditionnelle et une planification intégrée et plus durable. Nous observons les changements suivants (adapté de Rivard, 2009)

- les systèmes de drainage doivent prendre en compte les écosystèmes des milieux récepteurs;
- la gestion est proactive plutôt que réactive;

- les équipes doivent être multidisciplinaires;
- les infrastructures sont conçues de façon à reproduire les processus naturels;
- intégration de toutes les composantes pour la prise de décision;
- prise en compte autant du débit de pointe que du volume d'eau ruisselé.

Cette nouvelle façon de considérer et de gérer les eaux pluviales s'est accompagnée d'une montée en puissance de nouveaux termes au cours des trois dernières décennies (Fletcher *et al.*, 2014) tels que *Low Impact Development* (LID) (County Prince George's, 1999), *Best Management Practices* (BMP ou PGO en français au Québec) (Schueler, 1987), *Sustainable Urban Drainage Systems* (SUDS) (Martin *et al.*, 2000), *Water Sensitive Urban Design* (Whelans *et al.*, 1994; Wong, 2006) et les techniques alternatives (Azzout *et al.*, 1994).

Son intégration peut être résumée dans le schéma suivant (Figure 1), qui résume la gestion intégrée et durable des eaux pluviales :



Figure 1: Processus de contrôle pour la gestion des eaux pluviales (adapté de *InfraGuide*, 2003; Ontario Ministry of the Environmental, 2003; Rivard, 2009)

2.2. Définitions

2.2.1. *Low Impact Development*

Low Impact Development (LID) controls est un terme qui a été cité pour la première fois comme étant une approche pour minimiser le coût de la gestion des eaux pluviales avec une conception « plus proche de la nature » (McHarg, 1977, cité dans Barlow et al., 1977). Le but original des LID était de mettre en place des dispositifs qui permettent de reproduire le cycle hydrologique naturel. On entend par cycle hydrologique naturel, un équilibre entre le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation atteint grâce à un « paysage hydraulique fonctionnellement équivalent » au cycle naturel de l'eau (Environmental Protection Agency, 2000; Mailhot *et al.*, 2008).

2.2.2. *Best Managements Practices ou Pratiques de Gestion Optimale*

Les expressions BMP ou PGO étaient à l'origine utilisées pour décrire un type de pratiques ou d'approches pour prévenir la pollution (Fletcher *et al.*, 2014). Pour citer Ice (2004), le terme « meilleures pratiques de gestion » désigne « restaurer une couverture végétale et une structure de sol plus favorable pour maintenir l'état des terres et des cours d'eau pour servir les besoins en eau présents et futurs ». Cette définition s'applique peu à un milieu urbain mais plutôt à un milieu rural. De nos jours, les termes PGO et BMP sont utilisés, en milieu urbain, pour décrire les pratiques de gestion de la qualité et de la quantité des eaux pluviales. Elles s'appliquent dans un contexte de développement durable et prennent en compte plusieurs critères de contrôle (MDDEP, 2011) :

- le contrôle qualitatif;
- le contrôle quantitatif;
- le contrôle pour minimiser l'érosion des cours d'eau;
- le contrôle de la recharge de la nappe phréatique pour la protection des eaux souterraines.

Dans ce mémoire, nous nous intéressons exclusivement au contrôle de type quantitatif, soit aux volumes d'eau, aux débits et aux hauteurs d'eau.

2.2.2.1. Généralités

Les PGO sont classifiables en quatre groupes selon Fuamba et al. (2010) et Rivard (2011) :

- leur fonctionnement : structural ou non;
- leurs caractéristiques générales : la technique utilisée;
- le processus de contrôle : caractérisation du processus soit physique, chimique ou biologique;
- le contrôle visé : quantitatif, qualitatif ou les deux.

Les mécanismes d'action des PGO pour le contrôle qualitatif sont ceux du traitement physico-chimique et biologique de l'eau en général : décantation, infiltration, phyto-remédiation, filtration et rétention dans les végétaux (Davis *et al.*, 2009; Environmental Protection Agency, 2000; Fuamba *et al.*, 2010; McCarthy, 2008; MDDEP, 2011; Rivard, 2009).

Le choix d'implantation d'un type de PGO dépend des caractéristiques du bassin versant et des objectifs souhaités. La topographie, la profondeur de la nappe phréatique, les précipitations attendues, l'occupation du sol, le volume d'eau ruisselée voulu, etc., sont les facteurs qui vont influencer les choix.

Dans notre mémoire, nous nous intéressons exclusivement à un type de PGO, soit les bassins de biorétention, qui sont décrits et discutés dans la section 2.3 suivante.

Il s'agit d'une pratique structurale de contrôle à la source (Ahiablame *et al.*, 2012); elle consiste à construire des ouvrages, dans le réseau de drainage, pour réguler le volume d'eau ruisselée. En raison des investissements requis, il est préférable de les intégrer directement dans l'aménagement du territoire que de les ajouter *a posteriori*.

2.2.3. Contrôle à la source

À l'origine, le terme contrôle à la source était utilisé pour faire une distinction entre les systèmes de gestion des eaux pluviales utilisés à la source, où le ruissellement est généré, et des bassins de rétention plus larges qui retiennent l'eau à l'aval du réseau de drainage. Cependant, avec l'apparition des LIDs, ce terme devient associé aux utilisations de diverses pratiques mises en place dans tout le bassin versant pour « reproduire ou maintenir les conditions hydrologiques » (Fletcher *et al.*, 2014). La définition que nous souhaitons retenir dans le cadre de ce mémoire est que le contrôle à la source constitue un ensemble de PGO, structurales et non structurales, favorisant le contrôle du débit, de l'évaporation et de l'infiltration en amont du système de drainage classique (par conduites), en vue de minimiser le ruissellement et la dégradation de la qualité de l'eau (Rivard *et al.*, 2005).

2.3. Systèmes de biorétention

Comme toutes les PGO, structurales ou non, les systèmes de biorétention (voir Figure 2), communément appelés jardins de pluie, utilisent des mécanismes d'interaction entre le sol, les plantes et les microbes. Ces mécanismes incluent de nombreux processus capables de reproduire les conditions hydrologiques naturelles en maximisant l'adsorption, la filtration, l'infiltration, le stockage puis la relâche lente des eaux emmagasinées. Les systèmes de biorétention sont des dépressions peu profondes et efficaces pour réduire le volume d'eau ruisselée (par évaporation et infiltration) tout en réduisant la pollution s'infiltrant avec l'eau dans la nappe phréatique par un mélange de sols et de plantations adapté aux conditions climatiques.

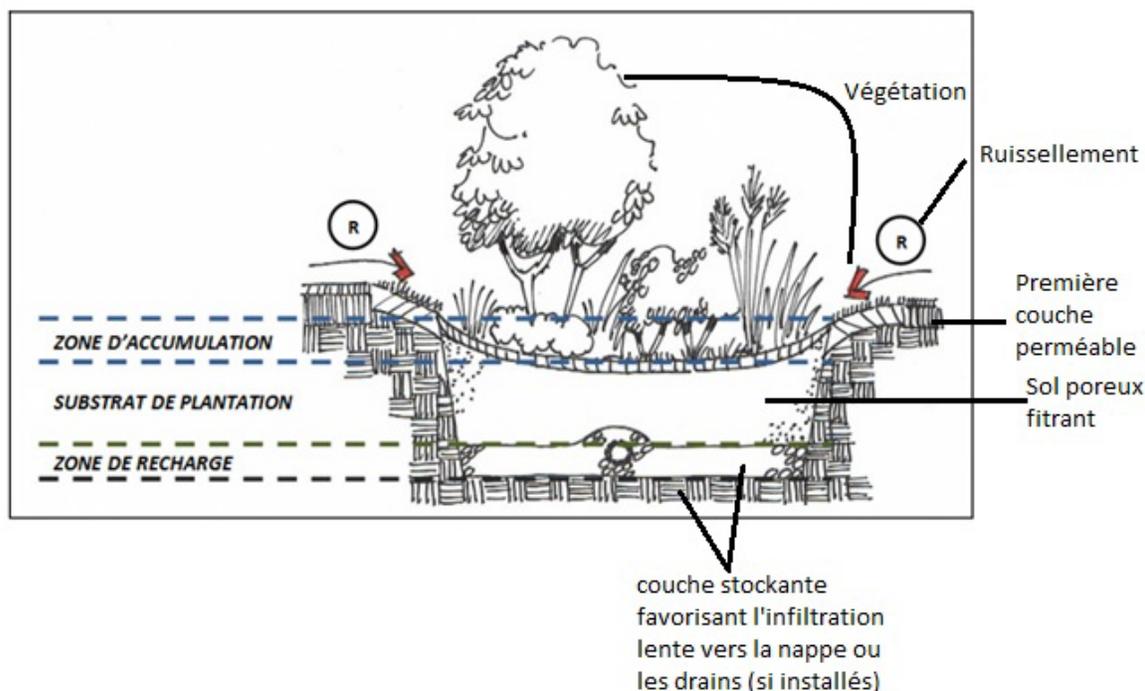


Figure 2: Coupe type d'une cellule de biorétention (extraite de Glorieux, 2010)

Il s'agit généralement de petites étendues (0,25 ha environ) (Fuamba *et al.*, 2010) d'étang qui ont un caractère de rétention temporaire, avec une couche de paillasson en surface, un ensemble de végétaux sélectionnés ainsi qu'un mélange de sol conçu pour avoir une perméabilité désirée. Les eaux de pluie tombent directement dans les cellules des bassins de biorétention ou sont drainées vers celles-ci. Les cellules vont être soumises soit à une évapotranspiration par les végétaux, soit à une infiltration par le sol, ou souvent aux deux. Ces cellules ne sont pas conçues pour retenir l'eau plus de 72 h après un événement pluvieux. Le choix du sol et des végétaux utilisés est très important car c'est lui qui va déterminer l'efficacité des bassins. Il devra être fait en fonction des caractéristiques du bassin, du degré de pollution et des objectifs visés (Idaho Department of Environmental Quality, 2005; Wyoming Department of Environmental Quality & Water Quality Division, 2013).

2.3.1. Applicabilité

Les bassins de biorétention sont applicables pour les projets de développement autant industriels, résidentiels que commerciaux. Leur intégration paysagère est aisée, et il est possible d'adapter les matériaux (sol ou végétation) aux conditions climatiques. Ils peuvent être placés (Fuamba *et al.*, 2010; Idaho Department of Environmental Quality, 2005; MDDEP, 2011) :

- sur des parkings ou aires de stationnement;
- dans les terre-pleins centraux de boulevards et culs-de-sac;
- dans les aires communes et les jardins résidentiels;
- dans des zones à réhabiliter, car ils ont un fort pouvoir dépolluant.

2.3.2. Avantages

L'avantage principal de cette PGO, par rapport aux objectifs de ce mémoire, est qu'elle permet de réduire le débit ruisselé et de recharger la nappe phréatique. Cette pratique est esthétiquement intégrable dans l'aménagement paysager de divers projets. De plus, il est possible d'opter pour un choix de végétations variées, tout en minimisant la déforestation des sites. Les systèmes de biorétention ont une aire naturelle de dépression et de déversement, ce qui réduit les travaux de conception en comparaison de ceux requis pour les bassins de rétention (Idaho Department of Environmental Quality, 2005) et ceux de l'agrandissement des canaux du réseau de drainage; par conséquent, le coût des ouvrages en aval s'en trouve diminué. Même s'ils demandent un entretien adéquat, ils sont adaptables à des zones fortement imperméabilisées et à une variété de conditions climatiques.

2.3.3. Limitations

Malgré tous les avantages que les systèmes de biorétention présentent, il existe certains facteurs limitants. L'un d'entre eux est la composition du sol, qui doit être spécifique pour permettre à la fois l'infiltration (des tests sont nécessaires en laboratoire) et

l'adsorption des particules. La profondeur de l'aquifère est un autre facteur limitant le choix du site. Pour éviter toute contamination de la nappe, sa distance par rapport à la surface doit être favorable à une filtration efficace de l'eau infiltrée. De plus, cette pratique nécessite des investissements plutôt élevés qui doivent englober, en plus du coût de la conception, le coût du prétraitement nécessaire pour prévenir le colmatage dû aux sédiments (Idaho Department of Environmental Quality, 2005; MDDEP, 2011; Wyoming Department of Environmental Quality & Water Quality Division, 2013) ainsi que les coûts d'entretien.

2.4. Gestion des eaux pluviales et changements climatiques

Le climat et la pluviométrie sont des éléments liés entre eux. Au cours des dernières décennies, des variations de climat sont perceptibles; ces changements climatiques ont des répercussions significatives sur la récurrence et les volumes totaux des inondations. Les résultats des études citées dans Mailhot (2014) concluent que ces volumes devraient évoluer de 2 à 4 fois plus que les années antérieures (Mailhot *et al.*, 2014). D'autres auteurs remettent en question l'efficacité des infrastructures hydrauliques sous ce nouveau contexte (Mailhot *et al.*, 2014). Les changements climatiques se concrétisent par une augmentation des débits de pointe et de la fréquence des inondations. L'imperméabilisation des sols ne fait qu'amplifier ces conséquences. Les pratiques de gestions optimales des eaux pluviales figurent parmi les mesures possibles d'adaptation aux évolutions climatiques. Il ne s'agit pas de résoudre la source du problème mais d'en limiter les conséquences. En effet, tel que mentionné précédemment, les PGO de type structural permettent de réduire le volume d'eau ruisselée et de favoriser l'infiltration.

2.5. SWMM

Le *Storm Water Management Model* (SWMM) est un programme de simulation de la dynamique des systèmes de drainage, développé pour la première fois en 1971 (Abi Aad *et al.*, 2009), par le US *Environmental Protection Agency* (EPA) en collaboration avec le département de Sciences et d'Ingénierie Environnementale de l'université de Floride

(selon l'accord coopératif CR-811607) (Huber *et al.*, 1988). Ce logiciel permet d'évaluer à la fois la qualité et la quantité de l'eau pluviale ou des eaux usées, pour un épisode ponctuel ou des épisodes continus. SWMM est l'un des logiciels les plus utilisés en Amérique du Nord pour simuler l'hydrologie et l'hydraulique en milieu urbain; il a connu plusieurs améliorations de ses versions au cours des années. La dernière version, version 5.1, développée en 2014, est toujours en cours d'amélioration (une dernière amélioration a été apportée en mars 2017). Elle offre une meilleure interface ainsi qu'une diversité de formats d'affichage des résultats et du type de données qui peuvent être traitées.

SWMM est basé sur un modèle mathématique à base physique, qui permet de transformer les précipitations en écoulement tout en tenant compte des processus d'infiltration et d'évaporation (Gironás *et al.*, 2010). Dans le logiciel, la zone étudiée est divisée en sous-bassins. Les calculs sont basés sur les composantes suivantes (Abi Aad *et al.*, 2009; Gironás *et al.*, 2010) :

- pour le ruissellement, le modèle utilisé est soit le modèle de ruissellement du *Curve Number*, développé par le *Soil Conservation Service* (SCS) du USDA, soit le modèle d'onde cinématique (Abi Aad *et al.*, 2009; Gironás *et al.*, 2010; Rossman *et al.*, 2016);
- pour les pertes par infiltration, le choix entre deux équations est possible par l'utilisateur, celle de Horton ou celle de Green-Ampt (Abi Aad *et al.*, 2009; Gironás *et al.*, 2010; Rossman *et al.*, 2016);
- pour le transport de l'eau dans les conduites ou les canaux, ce sont les équations de Saint-Venant qui sont utilisées; l'utilisateur choisit la simplification à adopter : modèle permanent, modèle de l'onde cinématique ou modèle de l'onde dynamique (Abi Aad *et al.*, 2009; Gironás *et al.*, 2010; Rossman *et al.*, 2016).

Selon le Guide d'utilisation de SWMM5 (Gironás *et al.*, 2010; Rossman, 2010), il est possible de simuler le ruissellement en milieu urbain via plusieurs processus hydrologiques :

- variation de la pluie dans le temps;
- évaporation des eaux de surface;
- accumulation et fonte de la neige;

- interception et stockage dans les dépressions;
- infiltration dans les sols non saturés;
- percolation ou écoulement dans le sous-sol;
- prise en compte de l'échange entre les eaux souterraines et le système de drainage;
- transport de l'écoulement par des réservoirs non linéaires;
- rétention des eaux pluviales ou de ruissellement par divers types de PGO.

De plus, toujours selon le Guide d'utilisation de SWMM5 (Rossman, 2010), le logiciel a une palette variée de fonctions hydrauliques permettant le transfert du débit à travers des conduites, des canaux, une unité de traitement ou de stockage, ou un ouvrage de diversion. Pour ce faire, SWMM inclut :

- la manipulation de réseaux de tailles illimitées;
- l'utilisation d'une grande variété de conduites à sections standard et de canaux naturels;
- l'utilisation, comme méthode de routage, des ondes cinétiques ou dynamiques ou de l'état permanent;
- l'application des écoulements externes tels que les débits des eaux usées en temps sec;
- la simulation du fonctionnement des pompes, orifices et déversoirs en fonction de lois définies par l'utilisateur;
- la simulation d'éléments spéciaux tels que les unités de stockage ou de traitement, les pompes, etc.;
- la simulation de différents régimes d'écoulement (surface libre, remous, surcharge, inondation ou accumulation de surface);
- l'application de courbes d'étalonnage pour le contrôle des données en entrée.

À cela, il est aussi possible d'ajouter l'évaluation de la production et du transport de charge polluante en relation avec cet écoulement.

2.5.1. PCSWMM

Le logiciel PCSWMM (*Personal Computer Storm Water Model Management*), développé par *Computational Hydraulics International* (CHI), est dérivé de SWMM version 5. Les deux logiciels sont basés sur les mêmes équations et méthodes de résolution, le même principe de fonctionnement. Cependant, l'interface de PCSWMM est plus facile d'utilisation et donne la possibilité de travailler en français. PCSWMM permet de traiter et d'importer aisément les fichiers de systèmes d'information géographique (SIG), grâce à son interface intégrée de SIG (MDDEP, 2011).

2.5.2. Fonctionnement de la simulation avec SWMM

Le programme fonctionne comme suit (MDDEP, 2011) :

- La pluie est transformée en écoulement dans la zone d'étude en prenant en compte la quantité infiltrée et évaporée; la zone d'étude étant divisée en sous-bassins, le bilan hydrologique est fait pour chacun d'eux.
- Les débits calculés servent de données d'entrée, aux nœuds, pour le réseau de drainage.
- Puis le modèle calcule la hauteur d'eau à chaque nœud et le débit généré dans chaque conduite.
- Ce calcul est réalisé pour chaque pas de temps tout au long de la simulation.

2.5.3. Objets conceptuels

Il existe trois grandes classes d'objets disponibles dans SWMM (Rossman, 2010) :

- les objets hydrologiques;
- les objets hydrauliques;
- les objets de gestion qualitative.

2.5.3.1. Objets hydrologiques

Les objets hydrologiques sont liés aux processus hydrologiques, soit à la pluie, à la neige, aux paramètres météorologiques, aux bassins de captage et aux aquifères.

- ✚ *Subcatchment* : représente les bassins versants qui vont recevoir la pluie et la transformer en ruissellement et en infiltration, en prenant en compte les caractéristiques des sous-bassins telles que la superficie, la perméabilité, le coefficient d'occupation du sol, la rugosité, la conductivité hydraulique et la pente.
- ✚ *Rain gages* : représente les données de précipitations qui sont définies par l'utilisateur. Elles peuvent être introduites en mm (hauteur de précipitation) ou m³ (volume).
- ✚ *Aquifer* : les écoulements souterrains sont intégrés dans cet objet. Ces écoulements dépendent de certaines caractéristiques du sol telles que : la porosité, la perméabilité du sol, l'évapotranspiration de la végétation et la capacité de rétention du sol.
- ✚ *Snow pack* : représente la hauteur de neige accumulée.
- ✚ *Climat* : la simulation des processus d'évaporation se fait grâce à l'ajout des données météorologiques.

2.5.3.2. Objets hydrauliques

Les objets hydrauliques sont les composantes liées à l'hydraulique du réseau, c'est-à-dire les nœuds, les conduites et les exutoires.

- ✚ *Junction nodes* : ce sont les jonctions du modèle (regard d'égout ou nœud).
- ✚ *Outfall nodes* : il s'agit des exutoires.
- ✚ *Conduits* : ce sont les conduites par lesquelles l'écoulement va se faire. Les paramètres nécessaires pour les définir sont leur longueur, le type de géométrie, la hauteur maximale de la conduite (diamètre pour une conduite circulaire) et la rugosité.

2.5.4. Gestion des eaux de pluie dans SWMM

Pour créer un modèle exploitable sur PCSWMM pour la gestion des eaux pluviales, il faut passer par certaines étapes qui vont de la collecte de données à l'exploitation du modèle. PCSWMM pouvant générer plusieurs résultats, il nécessite une collecte d'une large gamme de données. La méthodologie pour l'élaboration d'un modèle est la suivante :

- 1) collecte des données;
- 2) traitement des données, choix des équations;
- 3) construction d'un modèle;
- 4) calage du modèle puis validation;
- 5) utilisation du modèle.

Dans notre mémoire, nous n'allons pas traiter les quatre premières étapes, car le modèle que nous allons utiliser est déjà construit et calé.

2.5.5. Modélisation des pratiques de gestion optimale des eaux pluviales dans SWMM

La modélisation des LID dans PCSWMM est identique à celle de SWMM. Pour ce faire, de nouveaux modules/algorithmes ont été ajoutés dans les dernières versions pour permettre de simuler les LID (Ahiablame *et al.*, 2012). Dans SWMM, la simulation du fonctionnement des PGO (ou LID) consiste à la résolution d'un ensemble d'équations appliquées à des couches superposées verticalement (James & Rossman, 2012; Rossman *et al.*, 2016).

Il existe exactement huit types de LID modélisables dans SWMM (Rossman *et al.*, 2016) :

- ❖ les cellules de biorétention;
- ❖ les jardins de pluie (dans SWMM, il s'agit d'une cellule de biorétention sans couche d'emmagasinement);
- ❖ les toits verts;

- ❖ les tranchées d'infiltration;
- ❖ les pavages perméables;
- ❖ les barils de pluie;
- ❖ le débranchement des gouttières;
- ❖ les bandes de végétation.

2.5.6. Équations de modélisation

Puisque, dans ce mémoire, nous modéliserons les cellules de biorétention comme exemple de PGO, nous présentons dans cette section le principe de modélisation de ce type de PGO dans SWMM. Le principe de modélisation des cellules de biorétention est de faire un bilan entre les flux entrants et sortants de chacune des couches superposées. Ces flux sont représentés par des flèches à la Figure 3, qui présente le schéma typique de biorétention dans SWMM.

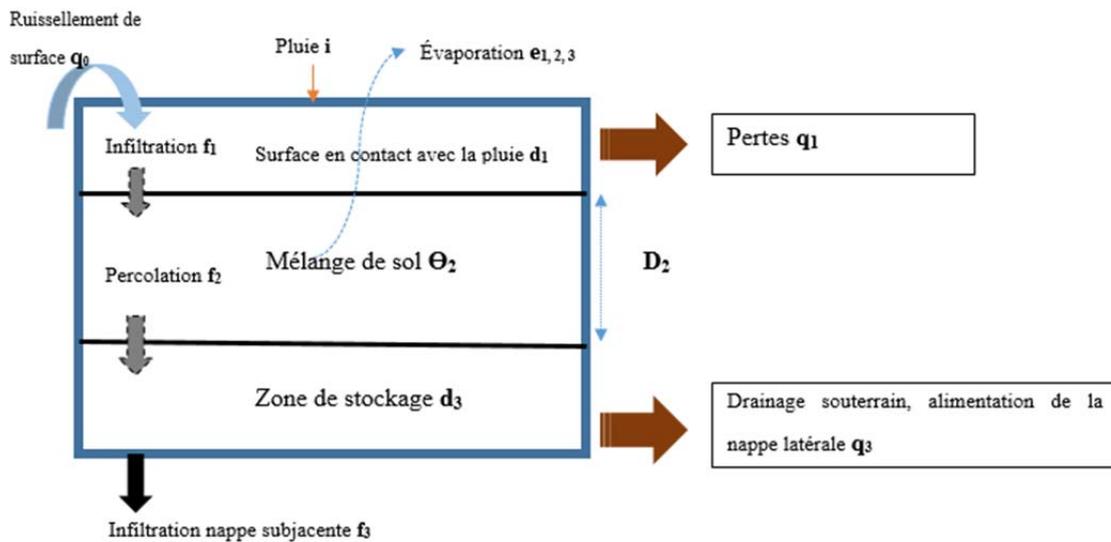


Figure 3: Schéma d'une cellule de biorétention typique (inspirée de James & Rossman, 2012; Rossman et al., 2016)

La modélisation du fonctionnement hydrologique de cette PGO est simplifiée grâce aux hypothèses suivantes :

- a. la couche transversale D2 garde la même profondeur tout au long de la simulation;
- b. les écoulements sont unidimensionnels;
- c. les infiltrations sont réparties uniformément sur toute la surface;
- d. l'humidité est uniforme dans tout le mélange du sol;
- e. la couche de stockage est considérée exclusivement comme un réservoir; toutes les forces appliquées sont négligeables.

C'est grâce à ces hypothèses que l'ensemble des équations de continuité, qui régissent l'écoulement, peuvent être résolues. Pour la modélisation des cellules de biorétention, il y a une équation générale pour chaque couche (qui fait elle-même référence à d'autres sous-équations), qui décrit les fluctuations de flux entre chaque couche. Ces équations représentent le bilan entre les entrées et les sorties de volume d'eau par unité d'aire par unité de temps, pour chacune des couches.

Les équations sont les suivantes (James & Rossman, 2012; Rossman *et al.*, 2016) :

1 En surface

$$\Phi_1 \frac{\partial d_1}{\partial t} = i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1$$

2 Mélange de sol

$$D_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_1 - e_2 - f_2$$

3 Couche de stockage

$$\Phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - f_3 - q_3$$

où :

d_1 : volume d'eau accumulée en surface (m);

θ_2 : humidité du mélange de sol (volume de l'eau/volume total du sol);

d_3 : volume d'eau dans la couche de stockage (m);
 i : intensité de la pluie tombant directement sur la surface de la PGO (m/s);
 q_0 : ruissellement provenant d'autres aires (m/s);
 q_1 : pertes de surface (ruissellement) (m/s);
 q_3 : écoulement souterrain (m/s);
 $e_{1, 2, 3}$: évapotranspiration de surface, du mélange de sol et de la couche de stockage (m/s);
 f_1 : infiltration de la couche de surface vers le mélange de sol (m/s);
 f_2 : volume d'eau percolé du mélange de sol vers la couche de stockage (m/s);
 f_3 : exfiltration de la couche de stockage vers le sol naturel (m/s);
 Φ_1 : portion de vide, sans végétation, de la couche de surface;
 Φ_3 : portion de vide de la couche de stockage (volume des vides/volume total);
 D_2 : épaisseur du mélange de sol (m);
 t : temps.

2.6. Étude du réseau de drainage par El Housni

Hind El Housni (2018), dans le cadre de son PhD en Sciences de l'eau, s'intéresse à la planification du renouvellement des réseaux de drainage urbain dans un contexte de changement climatique. Cette thèse, en cours de réalisation, nous sert de référence pour le calcul du redimensionnement des conduites. Dans sa thèse, elle se réfère à la situation actuelle puis fait une projection pour différents horizons futurs, auxquels est appliquée une évolution du climat. Cette étude permettra de conclure sur les méthodes de planification des réseaux de drainage urbain les plus adéquates dans un contexte de changement climatique. Cependant, nous sommes une pierre apportée à la réalisation cette étude, qui elle est toujours en cours.

2.7. Étude du coût du contrôle à la source par rapport au changement de conduites

La plupart des études recensées portant sur les différents types de PGO s'attaquent principalement au problème de la performance hydraulique selon l'objectif visé et le type de PGO utilisée (Sebti, 2016).

Il faut rajouter à cela que l'estimation du coût d'installation et d'entretien d'une PGO structurale reste une opération très complexe, car ce coût dépend notamment de la localité où elle sera installée, mais également des sols en place et de l'occupation du territoire. GVSDD (*Greater Vancouver Sewerage and Drainage District*, 1999, cité dans Sebti, 2016) a développé des équations qui permettent de calculer le coût de construction, pour chaque PGO, en fonction du type de site (résidentiel ou municipal). Cependant, ces équations requièrent, pour leur résolution, des informations telles que les coûts d'ingénierie, de contingence, pour le contrôle de sédiments, etc., en plus du volume d'eau qui devra être retenu.

Dugué (2010) a conclu que le coût d'investissement pour installer et entretenir des cellules de biorétention est 2,5 moins cher que celui d'un système conventionnel. Lors de cette étude d'un projet pilote, Dugué (2010) a conclu qu'il est possible d'adapter la biorétention à un climat québécois, même si la question de l'entretien hivernal persiste. L'étude a calculé le coût de construction et d'exploitation pour une cellule de biorétention pour un sous-bassin unique, et l'a comparé à celui d'un changement de conduites pour cette même zone d'étude (Dugué, 2010). Cette étude a été réalisée à l'échelle d'un stationnement; elle a l'avantage d'avoir utilisé des données récoltées sur le terrain à l'étude, mais sa limite est qu'elle a été réalisée à l'échelle d'un sous-bassin uniquement, et non pas à l'échelle d'un secteur de drainage en entier.

En 2016, une étude a été réalisée en Oklahoma pour évaluer l'impact de la substitution de la gestion traditionnelle des eaux pluviales par une gestion dite optimale (Holzbauer-Schweitzer, 2016). Cette étude s'intéresse elle aussi à l'efficacité hydraulique, à l'abattement des matières polluantes et à la diminution du volume d'eau ruisselé (Holzbauer-Schweitzer, 2016). Il en ressort deux valeurs économiques : i) le volume

d'eau ruisselé étant diminué de 50%, il y a un impact direct sur le coût d'installation du bassin d'eaux pluviales; ii) la qualité de l'eau retenue étant meilleure, le coût d'exploitation pour le traitement de l'eau est lui aussi réduit. L'axe d'étude du coût dans ce cas est étroitement lié à la performance hydraulique de la PGO sur le long terme plutôt qu'aux coûts comparatifs entre un changement de conduite et l'installation d'une PGO.

Ahiablame *et al.* (2012) recensent des études faites sur les pratiques de LID et suggèrent une liste de travaux manquants (ou axes de travaux futurs). Cette étude s'attarde, comme la plupart des autres, sur l'aspect « performance hydraulique » des PGO. L'orientation pour les travaux futurs est axée sur l'étude de la qualité et de la quantité des eaux de pluie gérées par des PGO. L'évocation de la notion de coût est relative à la diminution du coût d'exploitation des infrastructures de gestion traditionnelle des eaux pluviales.

À la lumière de nos recherches, nous nous rendons compte de la primeur des LID et PGO par rapport aux autres modes de gestion des eaux pluviales. Les possibilités de futures études concernant ce domaine sont nombreuses. Dans notre cas, nous nous attarderons sur la comparaison des coûts entre les PGO et des concepts plus traditionnels, soit l'accroissement du diamètre des conduites pour limiter les refoulements dus aux eaux de pluie. Il s'agit là d'un axe déjà exploité par Dugué (2010), cependant, dans notre étude, nous apporterons un regard neuf. En effet, nous calculerons le coût à l'échelle d'un secteur de plusieurs hectares. De plus, dans notre cas, certaines contraintes peuvent nous imposer l'agrandissement de conduites au détriment de l'application d'une cellule de biorétention, ce qui peut influencer considérablement sur le coût d'un sous-bassin à un autre.

3. Méthodologie

3.1. Modèle

Le réseau étudié est un réseau réel, situé dans une région dont nous nous garderons d'évoquer le nom pour des raisons de confidentialité, drainant une superficie de 260,45 ha avec 97 994 m de conduites. Nous avons simulé sur ce réseau chacune des pluies qui seront mentionnées à la section suivante, avec un pas de temps de simulation maximal (temps de propagation) de 5 s, afin d'évaluer les surcharges pour ces pluies. Les sous-modèles de simulation choisis sont le modèle d'infiltration de Horton et la méthode de propagation des écoulements en conduites de l'onde dynamique. La Figure 4 présente le modèle utilisé :

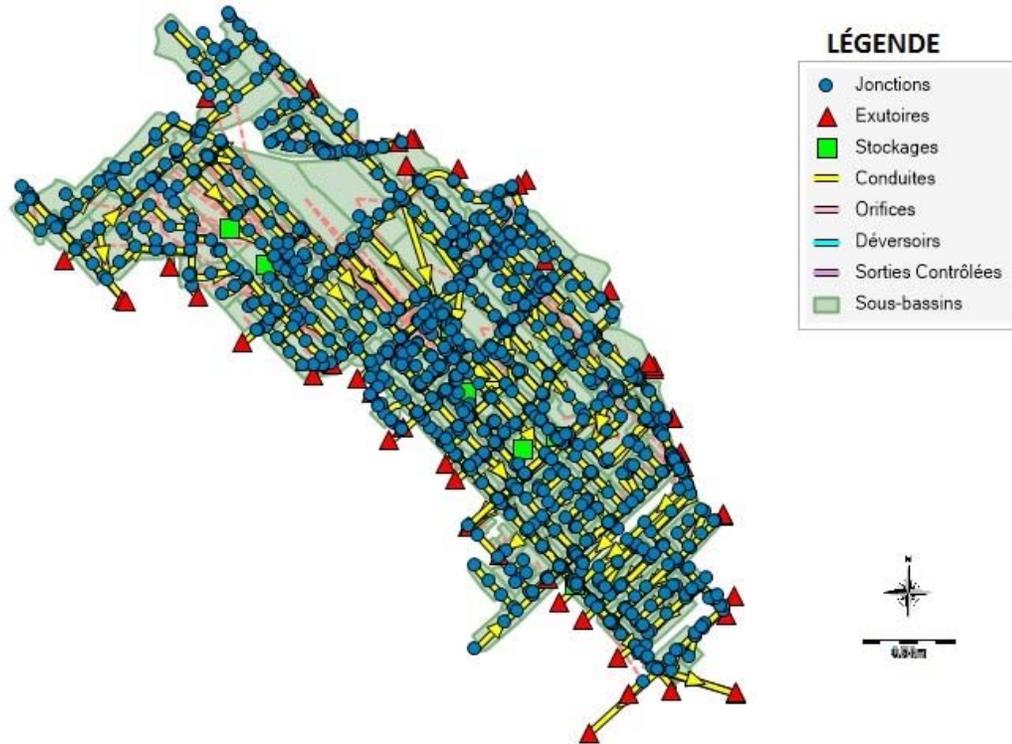


Figure 4: Carte du réseau étudié

3.2. Évènements pluvieux

Dans le cadre de notre étude, nous avons sélectionné six évènements pluvieux parmi une liste d'évènements pluvieux réels (El Housni, 2018). Nos critères de sélection, outre la nécessité que l'évènement génère obligatoirement des surcharges, étaient principalement basés sur les périodes de retour en fonction de la durée de l'évènement (établies selon les courbes IDF, intensité-durée-fréquence). Pour les évènements choisis, nous ne nous intéressons exclusivement qu'aux évènements ayant une récurrence de 0 à 5 ans pour toutes les durées considérées (5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 6 h, 12 h et 24 h), et ayant une récurrence supérieure à 2 ans pour au moins une de ces durées. Ce critère est basé sur le fait que, pour les réseaux à l'étude, on considère que les refoulements sont acceptables pour les évènements qui ont une période de retour supérieure à 5 ans. De plus, les pluies choisies couvrent différentes durées, hauteurs totales et intensités maximales, et présentent diverses allures de leur courbe d'intensité/volume en fonction du temps.

Les pluies choisies ont une durée qui varie entre 1 h et 24 h, ont une hauteur totale allant de 20 mm à 53 mm, et une intensité maximale sur 5 min de 47 mm/h à 104 mm/h. Ce sont des pluies réelles non modifiées, observées dans la région.

Pour résumer ces évènements, nous avons établi le Tableau 1 et la Figure 5.

Tableau 1: Récapitulatif des évènements choisis (tiré de El Housni, 2018)

Evts	H totale (mm)	I max sur 5 min (mm/h)	Durée (h)	Récurrence par durée (ans)								
				5 min	10 min	15 min	30 min	1 h	2 h	6 h	1 2h	24 h
1	20,05	92	0,92	2 à 5	2 à 5	2 à 5	2 à 5	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
2	28,94	104	1,67	2 à 5	2 à 5	2à 5	2 à 5	2 à 5	< 2	< 2	< 2	< 2
3	52,99	55	9,17	< 2	< 2	< 2	2 à 5	2 à 5	2 à 5	2 à 5	< 2	< 2
4	29,42	61	2,08	< 2	< 2	< 2	2 à 5	2 à 5	2 à 5	< 2	< 2	< 2
5	42	63	24	< 2	< 2	< 2	2 à 5	2 à 5	2 à 5	2 à 5	< 2	< 2
6	48,65	48	23,42	< 2	< 2	< 2	< 2	2 à 5	2 à 5	2 à 5	2 à 5	< 2

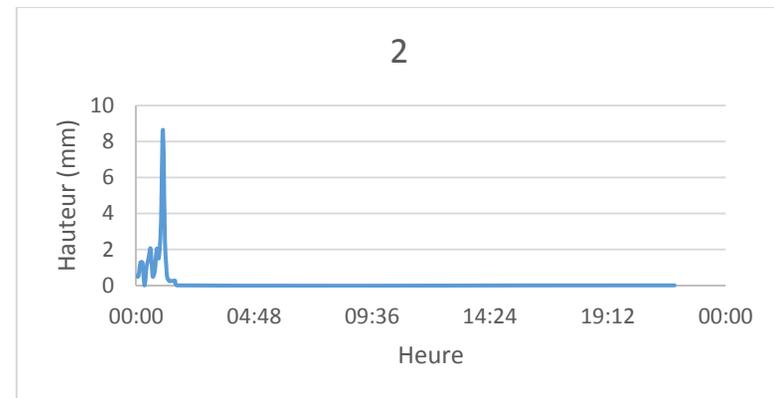
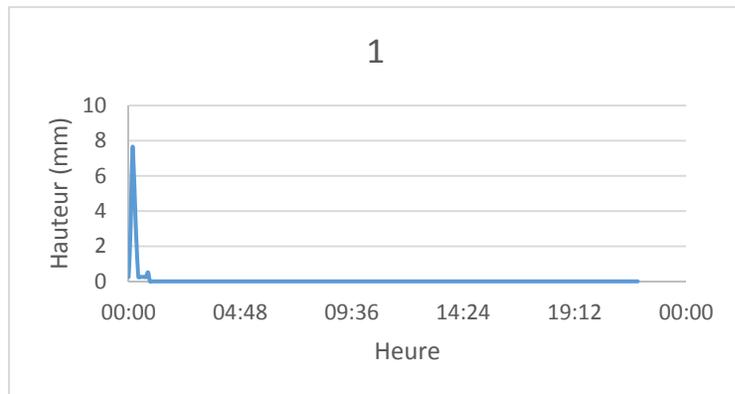


Figure 5a : Graphiques des hauteurs de pluie en fonction du temps (pas de temps de 5 min) pour les évènements 1 et 2

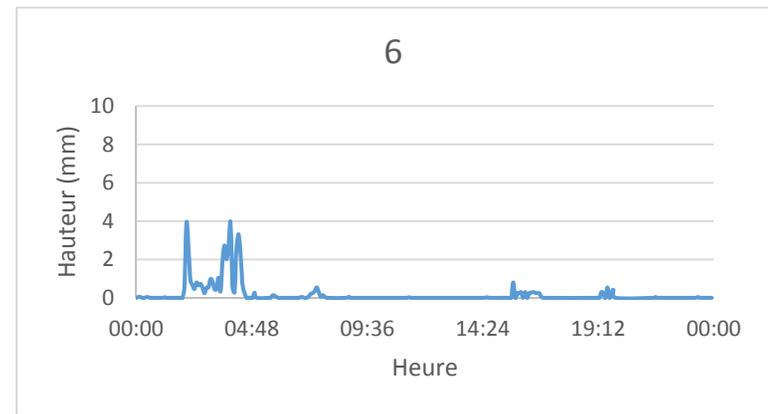
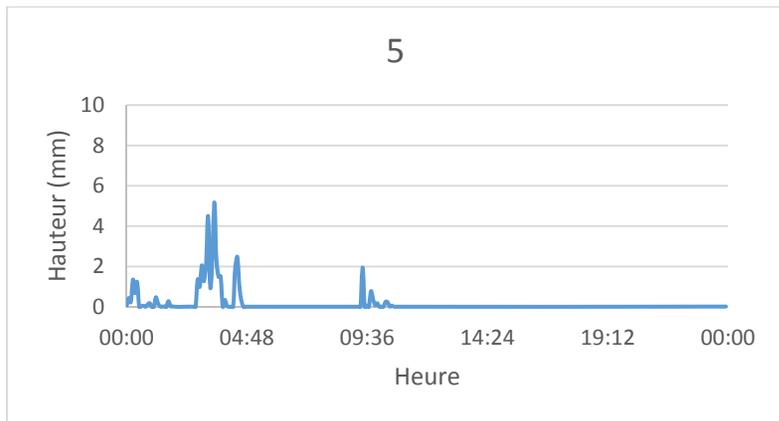
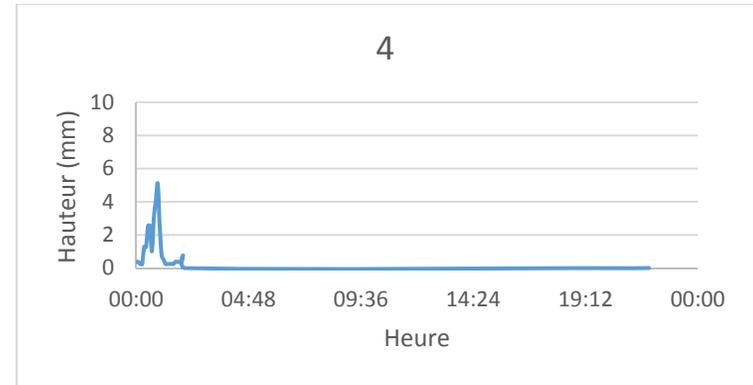
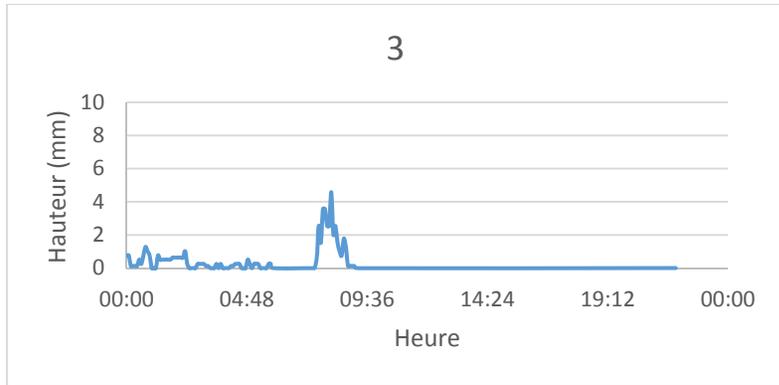


Figure 5b : Graphiques des hauteurs de pluie en fonction du temps (pas de temps de 5 min) (suite) pour les évènements 3 à 6

3.3. Configuration de la PGO

La PGO que nous utilisons dans notre projet est la biorétention. Le logiciel PCSWMM permet d'entrer les paramètres de la surface, du sol, du stockage et du drain de la cellule de biorétention. Pour optimiser la configuration, nous avons fait une analyse de la sensibilité de la performance de la PGO, tout en utilisant les valeurs fournies par le support de CHI (2017b).

Toutes les valeurs utilisées plus bas pour l'analyse de sensibilité puis le choix du paramétrage sont exclusivement extraites du support mis à la disposition de l'utilisateur du logiciel PCSWMM sur le site de CHI (2017b).

3.3.1. Analyse de sensibilité

Dans ce mémoire, le type de PGO appliqué est la cellule de biorétention. Selon CHI (2017a), pour ce type de PGO, seules trois couches superposées sont obligatoirement configurées, la quatrième étant facultative. Le Tableau 2 suivant fait un résumé des types de PGO paramétrables dans PCSWMM ainsi que les couches qui s'y appliquent en fonction des cas.

Tableau 2 : Caractéristiques des LIDs dans PCSWMM (traduit de CHI, 2017a)

Type de PGO	Surface	Pavage	Sol	Stockage	Drain	Matériel de drainage
Cellule de biorétention	x		x	x	o	
Baril de pluie	x		x	o		
Toit vert	x		x			x
Tranchées d'infiltration	x			x	o	
Pavages perméables	x	x	o	x	o	
Déconnection des toitures	x				x	
Noue engazonnée	x					

x paramétrage obligatoire

o possible

Les tests d'analyse de sensibilité se sont déroulés sur un seul sous-bassin (S51_Pseudo) avec l'application d'une seule pluie (pluie 3), pour des résultats observés sur une seule conduite (C109); nous n'y avons appliqué qu'une seule cellule de biorétention. Un test consiste à changer la valeur d'un seul paramètre à la fois en se référant aux valeurs proposées dans CHI (2017b); une fois que la valeur qui nous semble la plus optimale, selon la réduction du débit sortant, est choisie pour ce paramètre, il s'agit de passer au paramètre suivant et ainsi de suite. Les différents résultats observés sont compilés au Tableau 3. Chacun des paramètres simulés est expliqué et développé dans la section suivante.

Tableau 3: Test de sensibilité des paramètres

Sim	H. Berm (mm)	Vég.	n Man.	Pente	Ép. sol (mm)	Poro.	C. cap.	Point flet.	Cond. (mm/h)	P. cond.	Ten. Cap. (mm)	Ép. Stock. (mm)	Tx de fuite (mm/h)	Débit max. (m ³ /s)
1	100	0	0,1	1	100	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,359
2	200	0	0,1	1	100	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,357
3	50	0	0,1	1	100	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,360
4	200	0,1	0,1	1	100	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,358
5	200	0,2	0,1	1	100	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,358
6	200	0,1	0,24	1	100	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,358
7	200	0,1	0,41	1	100	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,358
8	200	0,1	0,24	0	100	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,360
9	200	0,1	0,24	0,5	100	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,358
10	200	0,1	0,24	0,5	450	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,358
11	200	0,1	0,24	0,5	225	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,358
12	200	0,1	0,24	0,5	900	0,5	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,358
13	200	0,1	0,24	0,5	450	0,25	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,358
14	200	0,1	0,24	0,5	450	0,75	0,2	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,357
15	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,3	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,357
16	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,105	0,1	0,5	10	3,5	100	0,5	0,357
17	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,2	0,5	10	3,5	100	0,5	0,357
18	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,05	0,5	10	3,5	100	0,5	0,358
19	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	29	10	3,5	100	0,5	0,349
20	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	10	3,5	100	0,5	0,345

Sim	H. Berm (mm)	Vég.	n Man.	Pente	Ép. sol (mm)	Poro.	C. cap.	Point flet.	Cond. (mm/h)	P. cond.	Ten. Cap. (mm)	Ép. Stock. (mm)	Tx de fuite (mm/h)	Débits max. (m ³ /s)
21	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	5	3,5	100	0,5	0,345
22	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	15	3,5	100	0,5	0,345
23	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	10	49	100	0,5	0,345
24	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	10	320	100	0,5	0,345
25	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	10	120	100	0,5	0,345
26	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	10	49	150	0,5	0,344
27	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	10	49	450	0,5	0,342
28	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	10	49	450	0,5	0,343
29	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	10	49	450	1,27	0,342
30	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	10	49	450	3,81	0,341
31	200	0,1	0,24	0,5	450	0,43	0,06	0,02	120	10	49	450	11,43	0,341

De cette analyse, il ressort que la cellule typique que nous devons appliquer, en vue d'une plus grande réduction des débits maximaux à la sortie, a une épaisseur totale de 900 mm avec une hauteur de Berm de 200 mm. Elle est composée d'une végétation moyennement dense et d'un mélange sableux et limoneux. De plus, les valeurs requises pour une bonne réduction des débits maximaux sortant de la cellule de biorétention ne sont pas toujours les valeurs les plus hautes.

3.3.2. Configuration de la couche de surface

L'interface de PCSWMM permet d'entrer les données de la surface de la PGO comme illustré à la Figure 6 ci-dessous.

Editeur contrôle LID

Contrôles LID:

- LID

Nom: LID

Type LID: Cellule de biorétention

Surface Sol Stockage Drain souterrain

Hauteur Berm (mm) 0.0

Volume de végétation (fraction) 0.0

Rugosité de surface (n de Manning) 0.1

Pente de la surface (pourcent) 1.0

Ajouter Supprimer OK Annuler

Figure 6: Interface PCSWMM de la couche de surface des cellules de biorétention avec valeurs par défaut

Dans cette interface, « Hauteur Berm » désigne la hauteur des bordures autour des cellules de biorétention. La fraction du volume de végétation désigne le volume occupé par les tiges (et non la surface totale de végétation); ce paramètre fluctue entre 0,1 et 0,2 (végétation dense). Le choix du coefficient de Manning dépend du type de sol.

Le choix des valeurs retenues pour nos simulations s'est basé sur une analyse de sensibilité. Les résultats détaillés de cette analyse apparaissent dans la section 3.3.1. Les paragraphes suivants résument les résultats obtenus.

3.3.2.1. Hauteur de Berm

Nous avons analysé la sensibilité pour trois valeurs de « Hauteurs de Berm » : 100 mm, 200 mm, et 50 mm. Les résultats obtenus valident l'hypothèse qu'une plus grande hauteur de bordure permet de stocker plus d'eau.

3.3.2.2. Fraction du volume de végétation

Nous avons comparé la performance pour une végétation dense (0,2) et une végétation normale (0,1). Nous avons conclu qu'il est préférable d'avoir une végétation moins dense, même si le débit sortant ne varie pas de façon importante en fonction de la valeur de ce paramètre.

3.3.2.3. Coefficient de Manning

Dans le cas d'une végétation paysagiste, le manuel de PCSWMM propose trois différents coefficients de Manning en fonction de la densité de la végétation sur la surface. Pour le paramètre précédent (fraction du volume de végétation), nous avons choisi une végétation moins dense, donc pour être cohérent avec ce choix nous avons opté pour un coefficient de Manning de 0,24.

3.3.2.4. Pente

Le paramètre nommé « pente » ne s'applique que si nous utilisons comme LID le pavage perméable ou la noue engazonnée (en pourcentage) (CHI, 2017a). Dans les autres cas, dont le nôtre, nous utiliserons 0 comme valeur.

3.3.3. Configuration de la couche de sol

Le deuxième volet du module LID dans le logiciel permet de configurer la couche de sol et se présente comme illustré à la Figure 7.

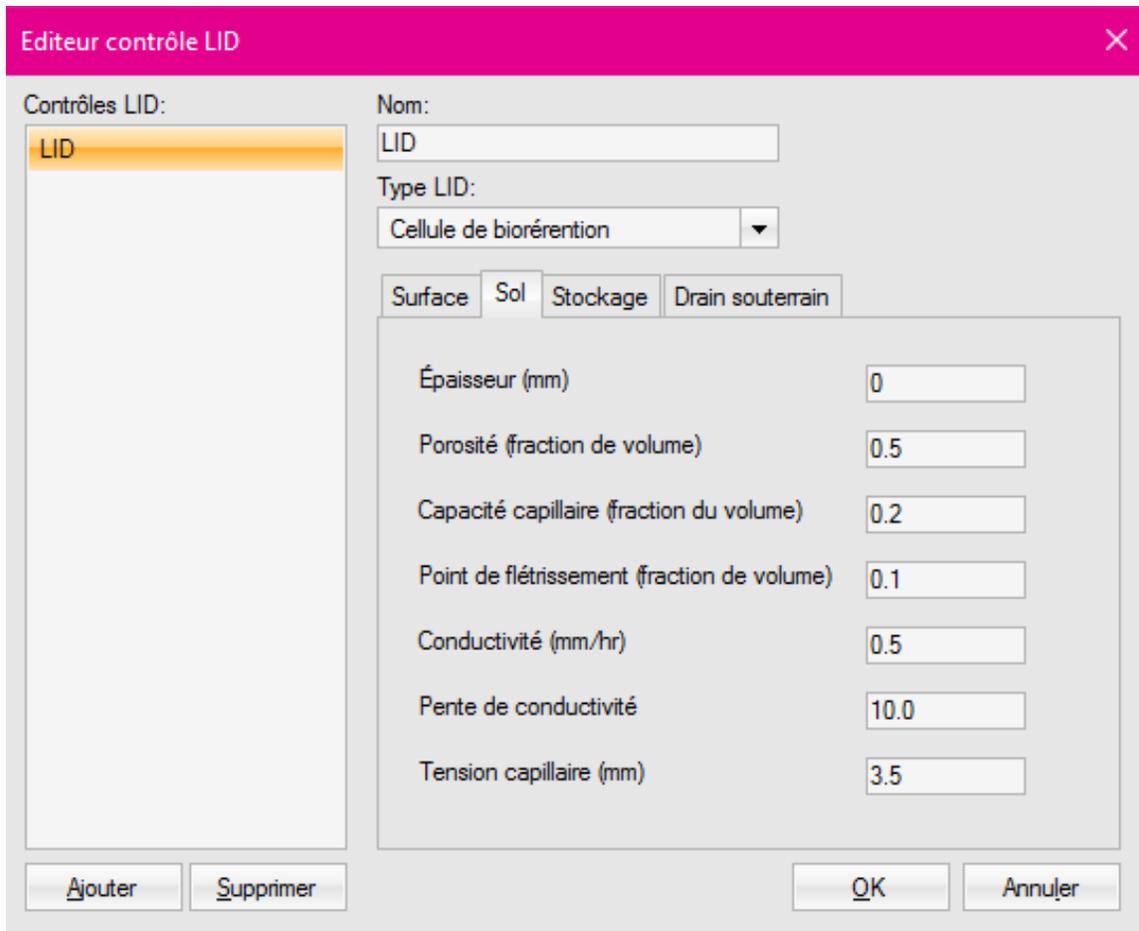


Figure 7: Interface PCSWMM de la couche de sol des cellules de biorétention avec valeurs par défaut

3.3.3.1. Épaisseur du sol

En général, l'épaisseur du sol dans les cellules de biorétention varie entre 100 mm et 900 mm. Le débit sortant de la biorétention est moins sensible à l'épaisseur du sol pour des épaisseurs supérieures à 450 mm, qui est la valeur d'épaisseur que nous avons sélectionnée.

3.3.3.2. Propriétés physiques du sol

Les cinq paramètres qui sont liés aux propriétés physiques du sol sont tous dépendants les uns des autres. Leur valeur dépend du type de sol choisi, et leur efficacité est mesurée par la réduction du débit d'eau sortant de la cellule. Le sable a la plus grande conductivité

hydraulique (120 mm/h) et l'argile la plus faible (0,25 mm/h) (CHI, 2017b). Le sable est le type de sol ayant la plus grande conductivité hydraulique, parmi les types de sol disponibles dans le module LID de SWMM, donc c'est celui qui est le plus efficace en matière de réduction des débits à la sortie. C'est pour cette raison, principalement, que nous l'avons choisi pour paramétrer notre PGO. Les valeurs des autres paramètres liés à ce type de sol sont celles apparaissant au Tableau 4.

Tableau 4: Valeurs des paramètres pour le sable (source : CHI, 2007)

Paramètres	Porosité	Capacité capillaire	Point de flétrissement	Conductivité	Tension capillaire
Valeurs	0,437	0,062	0,024	120,34 mm/h	49,02 mm

3.3.3.3. Pente de conductivité

La pente de la conductivité (*conductivity slope*) désigne la pente du logarithme de la conductivité par rapport à la teneur en humidité du sol (sans dimension). Les valeurs typiques vont de 5 pour les sables à 15 pour l'argile limoneuse (CHI, 2017a). La valeur de la pente de conductivité que nous avons choisie est la valeur par défaut paramétrée dans l'interface de PCSWMM soit 10,0.

3.3.4. Configuration de la couche de stockage

L'interface PCSWMM propose les paramètres apparaissant à la Figure 8.

Editeur contrôle LID

Contrôles LID:

- LID

Nom: LID

Type LID: Cellule de biorétention

Surface Sol **Stockage** Drain souterrain

Épaisseur (mm) 0

Ratio de vides (vides/solides) 0.75

Taux de fuites (mm/hr) 0.5

Facteur de colmatage 0

Ajouter Supprimer OK Annuler

Figure 8: Interface PCSWMM de la couche de stockage des cellules de biorétention avec valeurs par défaut

Chacune des valeurs entrées dans cette interface est extraite du support proposé par CHI (2017b).

3.3.4.1. Épaisseur de la couche

Dans le cas du stockage (voir Figure 8), la valeur de l'épaisseur varie entre 150 mm et 450 mm pour les cellules de biorétention. Après analyse de sensibilité, nous sommes arrivés à la conclusion que l'épaisseur de la couche de stockage influençait fortement le stockage de l'eau dans cette zone. Il est alors préférable d'opter pour une couche plus épaisse, donc de 450 mm.

3.3.4.1. Ratio des vides

Il s'agit ici du volume d'espace vide par rapport au volume de solides dans la couche (CHI, 2017a). La valeur du ratio des vides que nous avons choisie est la valeur par défaut paramétrée dans l'interface de PCSWMM, soit 0,75.

3.3.4.2. Taux de fuites

Ce paramètre désigne la vitesse maximale permise à laquelle l'eau s'infiltré dans le sol indigène sous la couche (en pouces/heure ou mm/heure) (CHI, 2017a). Les valeurs utilisées pour paramétrer le taux de fuites correspondent aux valeurs de la conductivité hydraulique saturée que nous propose le support de CHI (2017b). Le tableau disponible dans ce support résume la valeur de conductivité hydraulique saturée en fonction du type de sol. Il est préférable d'utiliser un matériau tel qu'un gravier ou un sable comme type de sol pour le stockage qui, selon ce tableau, ont un faible potentiel de ruissellement (en fait, ils ont la même valeur de paramétrage pour le taux de fuites, soit 11,43 mm/h, valeur que nous avons choisie).

3.3.4.3. Facteur de colmatage

Le facteur de colmatage est égal au volume total de ruissellement traité qui bouchera complètement le fond de la couche divisé par le volume de vide de cette couche (CHI, 2017a). Nous avons utilisé une valeur de 0 pour ignorer le colmatage. Le colmatage réduit progressivement le taux d'infiltration en proportion directe du volume cumulé de ruissellement traité et ne peut concerner que les tranchées d'infiltration à fond perméable et sans drain (CHI, 2017a).

3.3.5. Drain souterrain

Les couches de stockage LID peuvent contenir un système de drainage souterrain optionnel qui recueille l'eau stockée à partir du bas de la couche et la transporte vers un égout pluvial conventionnel (CHI, 2017a). Nous avons considéré que nos cellules de biorétention ne possèdent pas de drain souterrain. Par conséquent, la valeur du coefficient de drain est notée comme 0 (valeur par défaut du logiciel).

3.3.5. Récapitulatif

En résumé, le Tableau 5 présente les paramètres choisis pour la modélisation des cellules de biorétention dans notre étude.

Tableau 5: Récapitulatif des valeurs pour le paramétrage des cellules de biorétention dans le logiciel PCSWMM

Surface	Hauteur de Berm	Volume de végétation	Coefficient de Manning	Pente			
	200 mm	0,1	0,24	0%			
Sol	Épaisseur	Porosité	Capacité capillaire	Pt de flétrissement	Conductivité	Pente de conductivité	Tension capillaire
	450 mm	0,437	0,062	0,024	120,34 mm/h	10	49,02 mm
Stockage	Épaisseur	Ratio de vides	Taux de fuites	Facteur de colmatage			
	450 mm	0,75	11,43 mm/h	0			
Drain	Coefficient du drain	Exposant	Hauteur décalage				
	0	0,5	6 mm				

3.4. Application de PGO pour réduire les surcharges

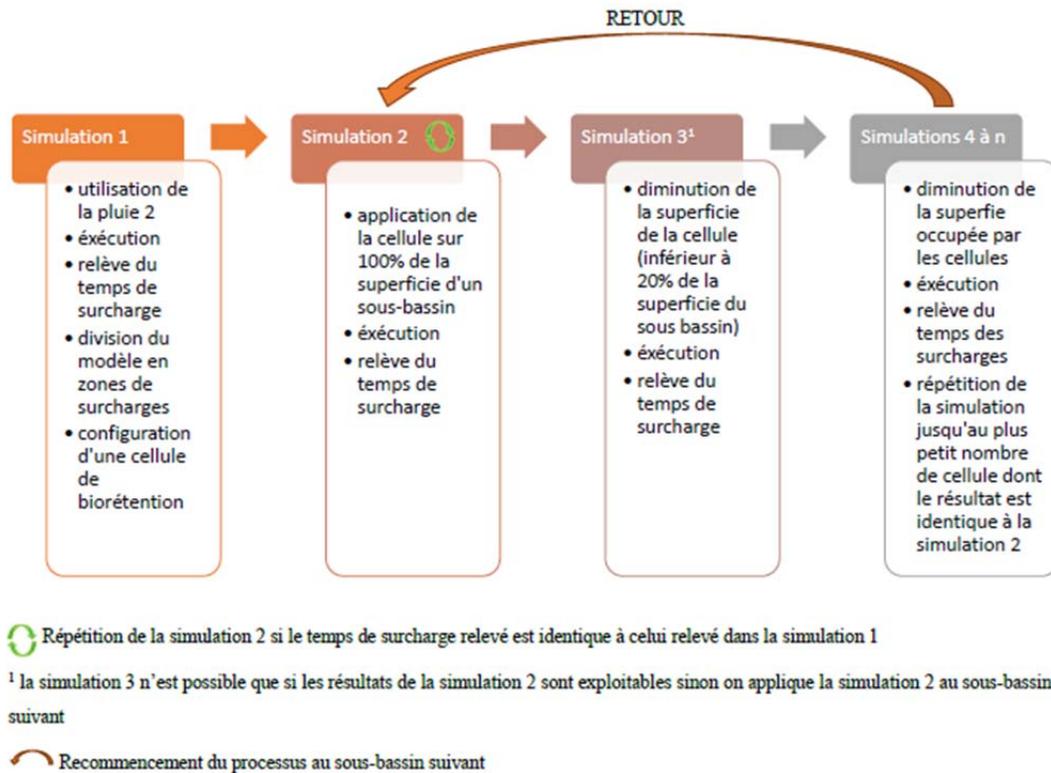


Figure 9 : Schéma de l'application de la PGO

Cette section décrit comment nous avons identifié le nombre et la localisation des PGO qui permettent de réduire les surcharges aux nœuds pour les six pluies à l'étude. La pluie n°2 cause 54 surcharges, ce qui est le plus de surcharges de nœuds sur le secteur à l'étude. Par conséquent, nous l'avons utilisée comme pluie de référence pour une première évaluation de la quantité et de la localisation des cellules de biorétention nécessaires pour réduire les surcharges dans le réseau. Cependant, suite à cette première évaluation, il pourra s'avérer nécessaire de faire certains ajustements pour les autres pluies. En effet, rappelons que le but est d'éliminer les surcharges du réseau pour toutes les pluies à l'étude. Ainsi, nous vérifierons si les résultats obtenus avec la pluie n°2 permettent d'éliminer toutes les surcharges pour les 5 autres pluies et, dans le cas contraire, il faudra ajouter des PGO dans certains sous-bassins et/ou remplacer une ou plusieurs conduites supplémentaires.

Selon la méthodologie proposée dans le cadre de ce mémoire, nous avons tout d'abord divisé le réseau en zones de surcharge, puis traité chacune de ces zones successivement, en commençant par les zones les plus en amont. En effet, en traitant certaines zones en amont, nous avons constaté une influence (réduction de l'importance des surcharges) sur certaines zones situées plus en aval.

La configuration de chacune des cellules de biorétention est identique au paramétrage énoncé dans la section 3.3. Pour ajouter des cellules à un sous-bassin, on doit entrer, dans le module LID de PCSWMM, l'aire de chaque unité, leur nombre, la largeur d'une unité et le pourcentage de surface imperméable qui sera drainée par la PGO. La valeur de ces paramètres a été choisie dépendamment de la superficie du sous-bassin. En outre, pour les sous-bassins dont l'aire est supérieure à 1 ha, nous avons choisi des cellules dont la superficie est de 7 m² (avec une largeur de 3 m; ce paramètre ayant peu d'influence sur les résultats de la simulation). Pour les sous-bassins dont l'aire est inférieure à 1 ha, nous avons choisi des aires variant de 3 m² à 5 m² pour chaque cellule de biorétention. La superficie totale du cumul des cellules de biorétention placées sur un sous-bassin est celle qui aura une influence sur la réduction des débits sortants. Cependant, pour simplifier notre application, nous avons choisi comme critère de décision le temps de surcharge des nœuds. Enfin, pour que nos résultats soient réalistes et applicables, nous avons pris comme critère que les cellules de biorétention sur chaque sous-bassin ne couvrent pas plus de 20 % de sa superficie.

Afin de déterminer la superficie minimale de PGO qui permet de réduire les surcharges sur le secteur à l'étude, nous avons appliqué la méthodologie suivante (voir Figure 9 ci-dessus) :

1. Détermination des sous-bassins se drainant vers chaque zone de surcharge. PCSWMM permet de lister les nœuds de sortie des sous-bassins et ainsi d'obtenir une liste de tous les sous-bassins en relation avec les nœuds en surcharge. C'est en se fiant à cette liste que nous avons choisi de travailler sur un premier sous-bassin, que l'on nommera ici X. Nous avons appliqué une cellule de biorétention de façon à ce que le sous-bassin X devienne entièrement une cellule de biorétention (nous appellerons cette simulation « simulation 2 »). Cette simulation

présente une situation irréaliste, mais elle permet de vérifier l'impact réel du sous-bassin X sur chacune des zones de surcharge. Le résultat des nouveaux nœuds en surcharge (simulation 2) est comparé aux nœuds qui surchargeaient sans biorétention sur le sous-bassin X (simulation 1), et si des changements jugés majeurs (c'est-à-dire soit une diminution importante du temps de surcharge ou soit une élimination complète de la surcharge) sont observés, nous concluons que l'ajout de cellules de biorétention sur ce sous-bassin X a un impact positif significatif sur la réduction des surcharges du réseau.

2. Identification du nombre le plus efficient de PGO, en restant en deçà de 20 % de couverture de chaque sous-bassin. Nous avons abaissé la couverture en PGO sur le sous-bassin X (simulations de 3 à n) jusqu'à ce que les variations observées soient différentes du résultat de la simulation 2. Par exemple, en couvrant à 100 % nous avons observé une variation du temps de surcharge de 2 h à 1 h. Alors, nous ajustons le nombre de cellules pour qu'elles ne couvrent que 20 % de la superficie du sous-bassin (le maximum que nous nous sommes fixés). Si nous constatons toujours que le temps de surcharge est de 1 h, nous allons couvrir à 10 %. Si nous observons toujours que le temps de surcharge est de 1 h, nous allons couvrir à 5 %. Si le temps de surcharge stagne à 1 h, nous couvrons à 2 %. Si nous constatons cette fois que le temps de surcharge est à 1h20, nous allons alors couvrir à 3 %. Si le temps de surcharge est de 1 h, nous couvrons à 2,5 %. Si le temps de surcharge est toujours à 1 h, nous pouvons alors conclure que le nombre le plus efficient se trouve entre une couverture du sous-bassin de 2 % et 2,5 %.
3. Optimisation du nombre de PGO sur chaque sous-bassin. Pour l'exemple donné précédemment, nous allons alors faire varier entre une couverture de 2 % et une couverture de 2,5 % jusqu'à ce qu'une différence entre la simulation n et la simulation 2 soit observée.
4. Application de la méthodologie au sous-bassin suivant (nommé U). Ce sous-bassin est choisi d'après la liste précédemment extraite des sous-bassins drainés par chaque nœud en surcharge. La même méthodologie que celle décrite pour le sous-bassin X est maintenant appliquée au sous-bassin U. Il est probable qu'en mettant une cellule couvrant 100 % du sous-bassin U, nous n'observions aucun

changement majeur sur les nœuds en surcharge, c'est-à-dire qu'il n'y a dans ce cas aucune surcharge qui est éliminée et/ou que le temps de surcharge varie très peu (par exemple, de 21 min à 20 min). Dans ce cas, nous ne mettons pas de cellules de biorétention sur ce sous-bassin U. L'étape 4 est répétée pour tous les sous-bassins qui se drainent vers les nœuds encore en surcharge.

5. Élimination des surcharges persistantes. Certaines surcharges ne peuvent pas être éliminées, pour la pluie 2, par l'ajout de PGO sur les sous-bassins. Trois causes principales expliquent ces surcharges persistantes : i) des problèmes de conception du réseau (une conduite qui se jette dans une conduite de plus petit diamètre et/ou ayant une pente plus faible); ii) des entrées du réseau constituées de conduites de petit diamètre; et enfin iii) des exutoires conçus pour retenir l'eau donc pour être en surcharge. Pour les deux premiers cas, nous avons décidé d'opter pour un remplacement des conduites par des conduites de plus grand diamètre. Pour choisir le nouveau diamètre des conduites, nous avons appliqué la méthodologie développée par El Housni (2018) (exposée à la section suivante). Pour le troisième cas, la surcharge étant acceptée et normale, nous n'avons pas jugé nécessaire de faire de changement.

Dans cette description de la méthodologie, nous avons seulement pris l'exemple du temps de surcharge, mais, dans la pratique, il faut que les résultats de la simulation 2 soient strictement identiques (élimination complète des surcharges et/ou diminution du temps de surcharge) aux résultats de la simulation n suivante pour que le nombre des PGO installés dans la simulation n soit retenu comme seuil critique.

3.5. Méthodologie pour l'identification des conduites à remplacer

Dans cette section, nous nous intéressons au deuxième scénario d'intervention, soit celui qui a pour objectif de redimensionner de façon optimale les conduites qui sont à l'origine des nœuds en surcharge. Le but de cette méthode étant de nous permettre de faire une comparaison des coûts entre ce scénario et celui décrit dans la section 3.4 précédente.

La méthode pour identifier les conduites à remplacer que nous appliquons dans le cadre de notre mémoire a été développée par l'étudiante au doctorat Hind El Housni (2018). Pour arriver au choix optimal des conduites à remplacer, et de leur diamètre, elle a développé un algorithme sur Matlab qui calcule par itération les valeurs de diamètre des conduites à remplacer afin d'éliminer les surcharges tout en s'assurant que : i) le nombre de conduites à remplacer soit le plus faible possible; et ii) le diamètre des conduites à remplacer soit minimal.

Le choix des conduites à changer est un processus complexe que nous pouvons résumer comme suit (voir El Housni, 2018, pour plus de détails) :

- Les zones de surcharge sont regroupées en périmètres d'influence; un périmètre d'influence est délimité par les premières conduites (amont et aval) qui ne surchargent pas.
- On détermine laquelle ou lesquelles des conduites du réseau causent la surcharge dans chacun de ces périmètres d'influence. Le diamètre de ces conduites est augmenté jusqu'à ce que la surcharge disparaisse.

3.6. Calcul des coûts

Pour estimer le coût de chaque installation, nous avons eu recours à divers documents écrits dont ceux publiés par la Ville de Montréal (2008) et Luc Gérardin (2017), mais aussi à certaines conversations orales avec Professeur Duchesne et ses collaborateurs. Nous avons pu en tirer différents coûts de construction pour les cellules de biorétention et le remplacement de conduites, dépendamment de plusieurs facteurs (notamment le lieu d'implantation). C'est l'étendue des valeurs recensées qui nous a conduits à choisir une fourchette de valeurs minimales et maximales, plutôt qu'une valeur unique de coûts pour chaque type d'intervention. De notre recherche bibliographique (Gérardin, 2017; Service de l'Eau Montreal, 2014; Ville de Montréal, 2008), nous avons extrait les coûts suivants :

- Cellules de biorétention
 - o 381 \$/m² et 415 \$/m² (Ville de Montréal, 2008)

- 357 \$/m² et 825 \$/ m² (Gérardin, 2017)
- 360 \$/ m² (Service de l'Eau Montreal, 2014)
- Changement de conduites
 - 1 500 \$/m linéaire à 5 250 \$/m linéaire (Ville de Montréal, 2008 ; communications personnelles)

Ainsi, nous avons choisi comme échelle : 360\$/m² à 825\$/ m² pour les cellules de biorétention et 1 500 \$/m lin à 5 250 \$/m lin pour le changement de conduites.

4. Résultats et discussions

4.1. Sommaire des résultats

4.1.1. Nœuds en surcharge sur le réseau non modifié

Les simulations sur PCSWMM du réseau non modifié, c'est-à-dire sans ajout de PGO, donnent des résultats différents avec chacune des six pluies. Le nombre de nœuds en surcharge varie selon la pluie (selon son intensité et sa durée). Pour résumer les résultats, nous avons établi les Figures de 10 à 15 suivantes mettant en avant les zones de surcharge des nœuds. Sur ces figures, les nœuds en surcharge sont encerclés par groupes de nœuds avec un cercle jaune.

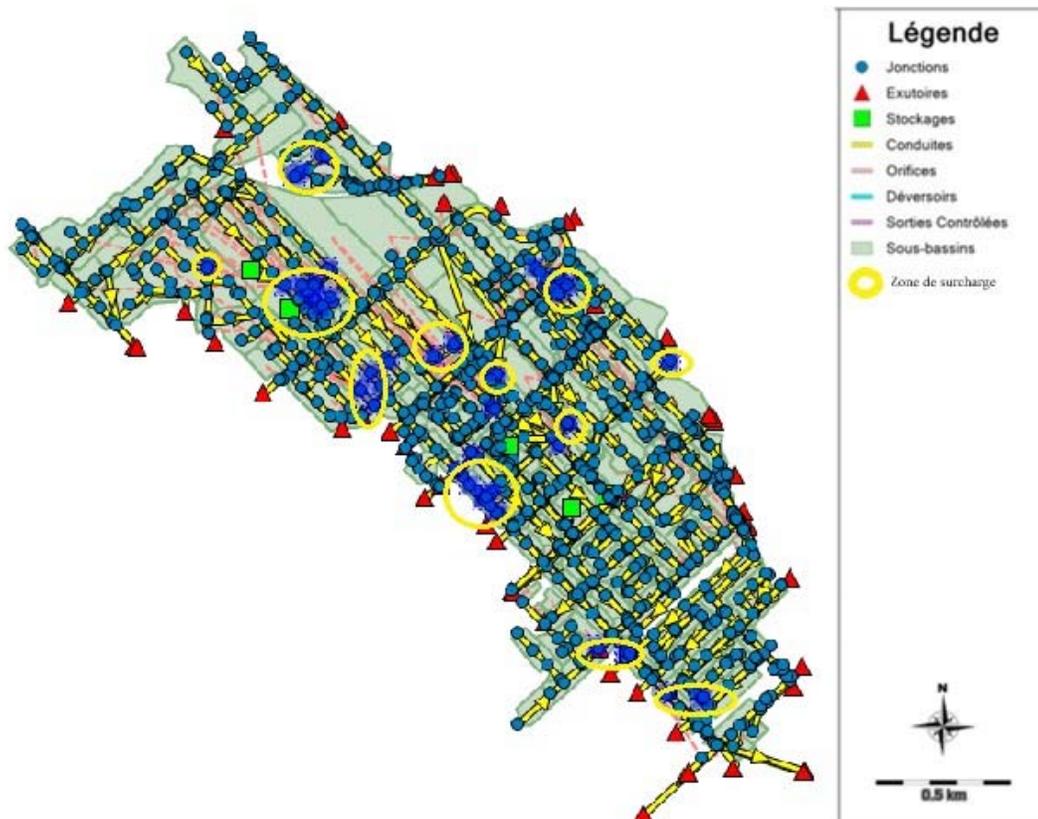


Figure 10: Nœuds en surcharge pour la pluie 1

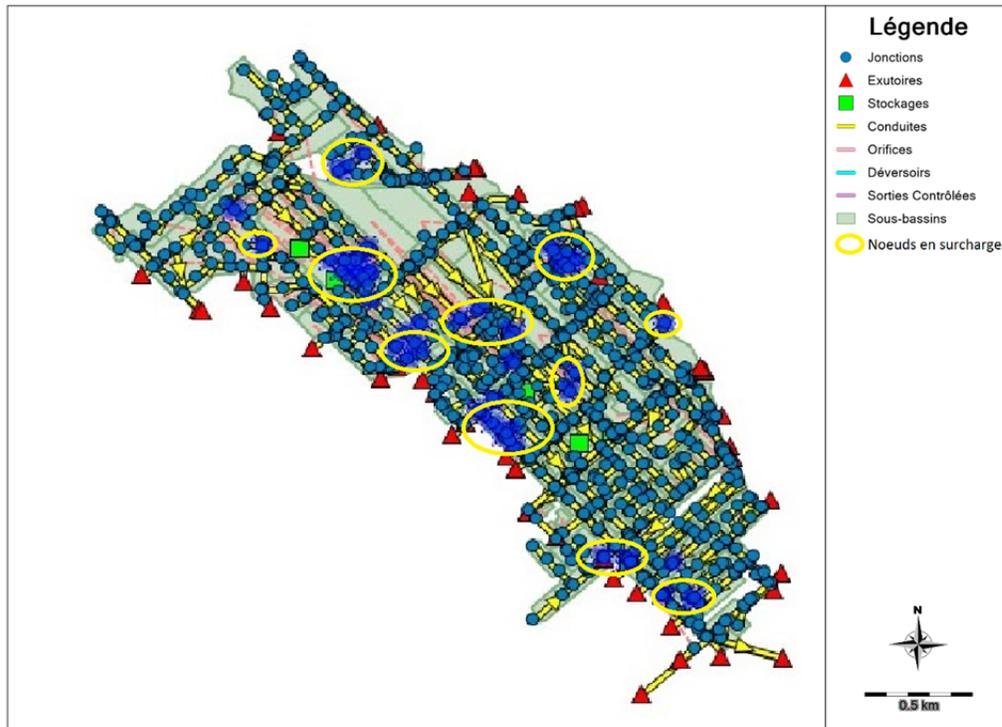


Figure 11: Nœuds en surcharge pour la pluie 2

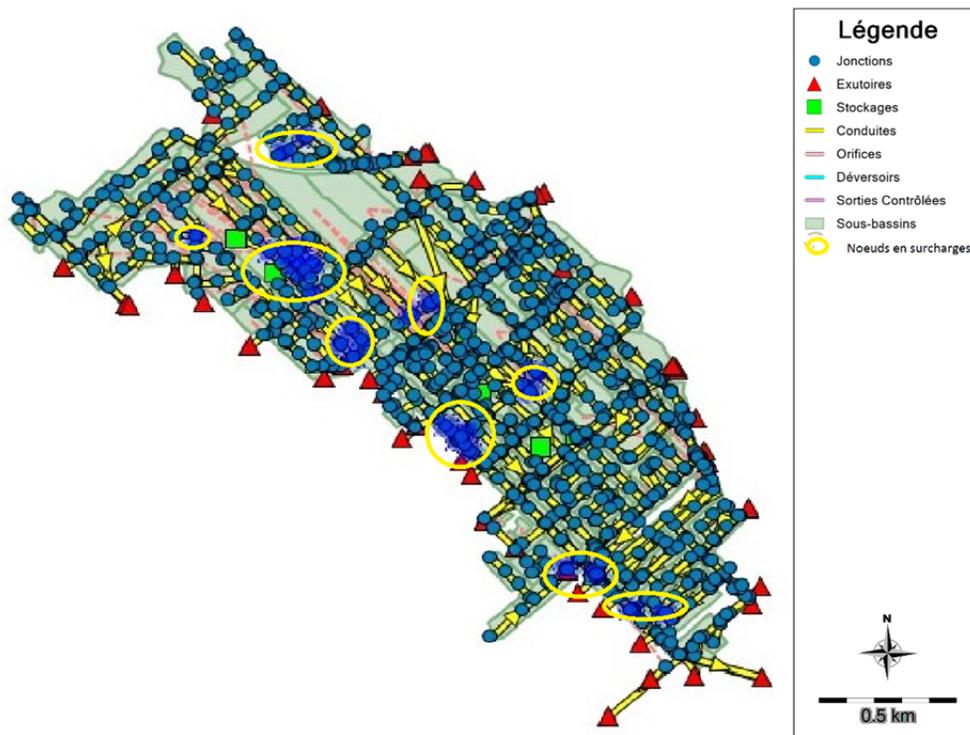


Figure 12: Nœuds en surcharge pour la pluie 3

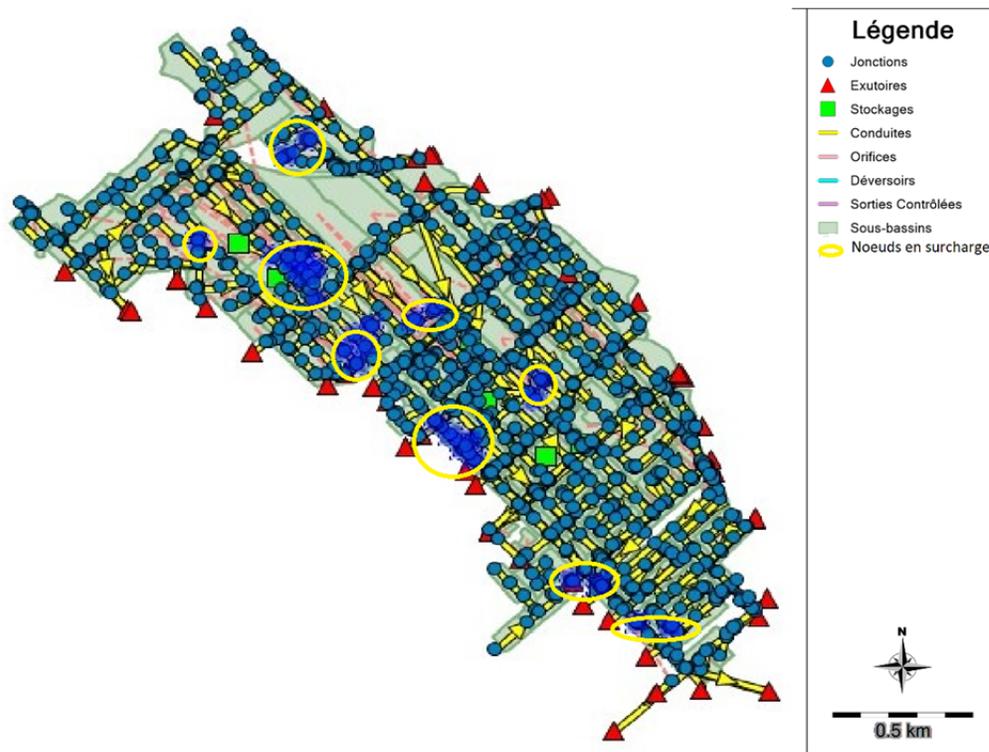


Figure 13: Nœuds en surcharge pour la pluie 4

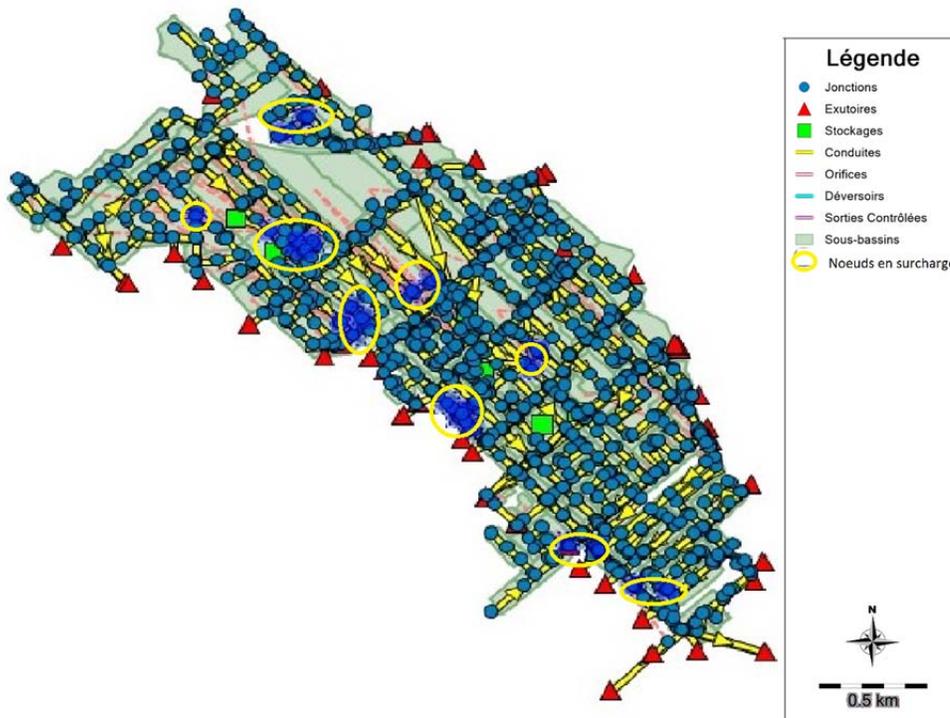


Figure 14: Nœuds en surcharge pour la pluie 5

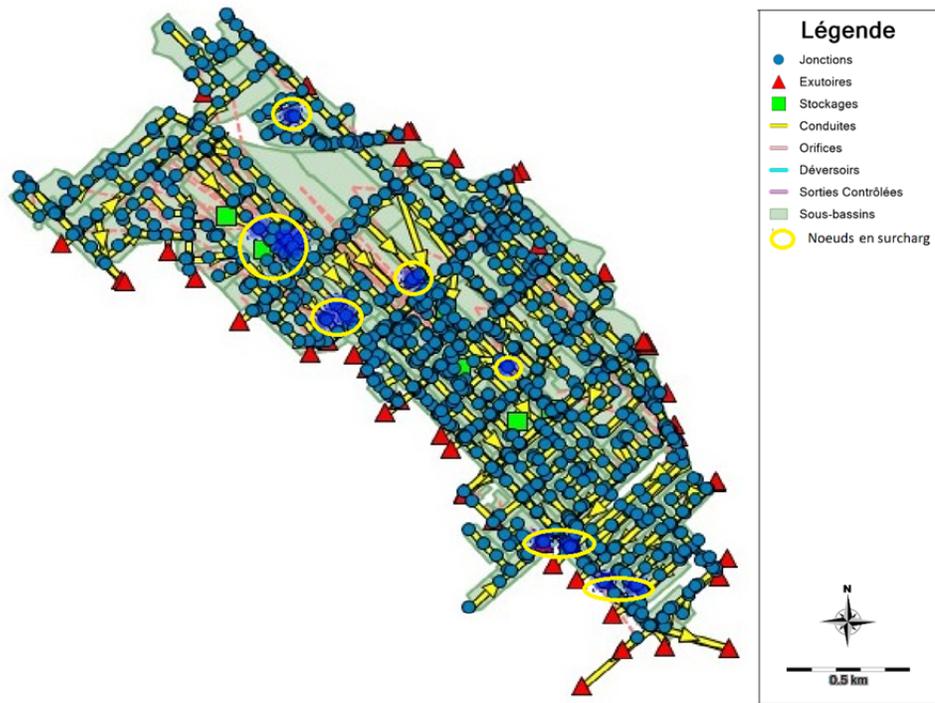


Figure 15: Nœuds en surcharge pour la pluie 6

Le Tableau 6, quant à lui, présente le nombre total de nœuds en surcharge pour chacun des évènements.

Tableau 6: Nombre de nœuds en surcharge

N° d'évènement	Nombre de nœuds en surcharge
1	45
2	54
3	38
4	34
5	25
6	15

Au vu de ces six schémas et de ce tableau, nous remarquons que :

- les zones de surcharge et les nœuds en surcharge sont plus nombreux pour la pluie 2;
- le plus petit nombre de nœuds en surcharge est toujours inclus dans les surcharges plus grandes provoquées par une pluie plus importante.

Nous en concluons alors que les nœuds surchargés pour les cinq pluies autres que la pluie 2 sont presque tous contenus dans la liste des nœuds en surcharge pour la pluie 2. Ainsi, nous utiliserons la pluie 2 comme pluie de base, dans un premier temps, pour identifier le nombre et la localisation des PGO pour éliminer les surcharges. Dans un second temps, nous identifierons les PGO supplémentaires nécessaires, le cas échéant, afin d'éliminer les surcharges pour les autres pluies.

4.1.2. Nombre et localisation des PGO pour éliminer les surcharges

Le Tableau 7 suivant est une synthèse des résultats obtenus après l'application de la méthodologie présentée à la section 3.4. La deuxième colonne résume les nœuds qui surchargent avant l'installation de cellules de biorétention et la troisième donne un résumé de ceux qui surchargent après la mise en place des cellules de biorétention. Nous remarquons que le nombre de surcharges restantes varie selon les pluies.

Tableau 7: Récapitulatif de l'impact des PGO

N° d'évènement	Nb de nœuds en surcharge sans PGO	Nb de nœuds en surcharge après l'ajout de cellules de biorétention
1	45	11
2	54	18
3	38	12
4	34	12
5	25	12
6	15	9

Lors de nos simulations, il n'a pas été possible d'éliminer la totalité des surcharges; le nombre de nœuds restant en surcharge est résumé dans le Tableau 7, ci-dessus. Pour la pluie 2, l'élimination de la surcharge pour 36 des 54 nœuds surchargés requiert l'utilisation de 5 391 m² de cellules de biorétention, ce qui représente une superficie couvrant 0,21 % du secteur à l'étude. Le bassin de drainage sur lequel nous travaillons est composé de 378 sous-bassins; des cellules de biorétention ont dû être ajoutées à seulement 25 d'entre eux (soit 6 % du nombre total). La position de ces cellules a été déterminée selon la méthodologie décrite au Chapitre 3; un exemple détaillé sera exposé plus bas, à la section 4.2.

Les sous-bassins sur lesquels des bassins de biorétention ont été ajoutés sont illustrés à la Figure 16. Le Tableau 8 résume les résultats obtenus.

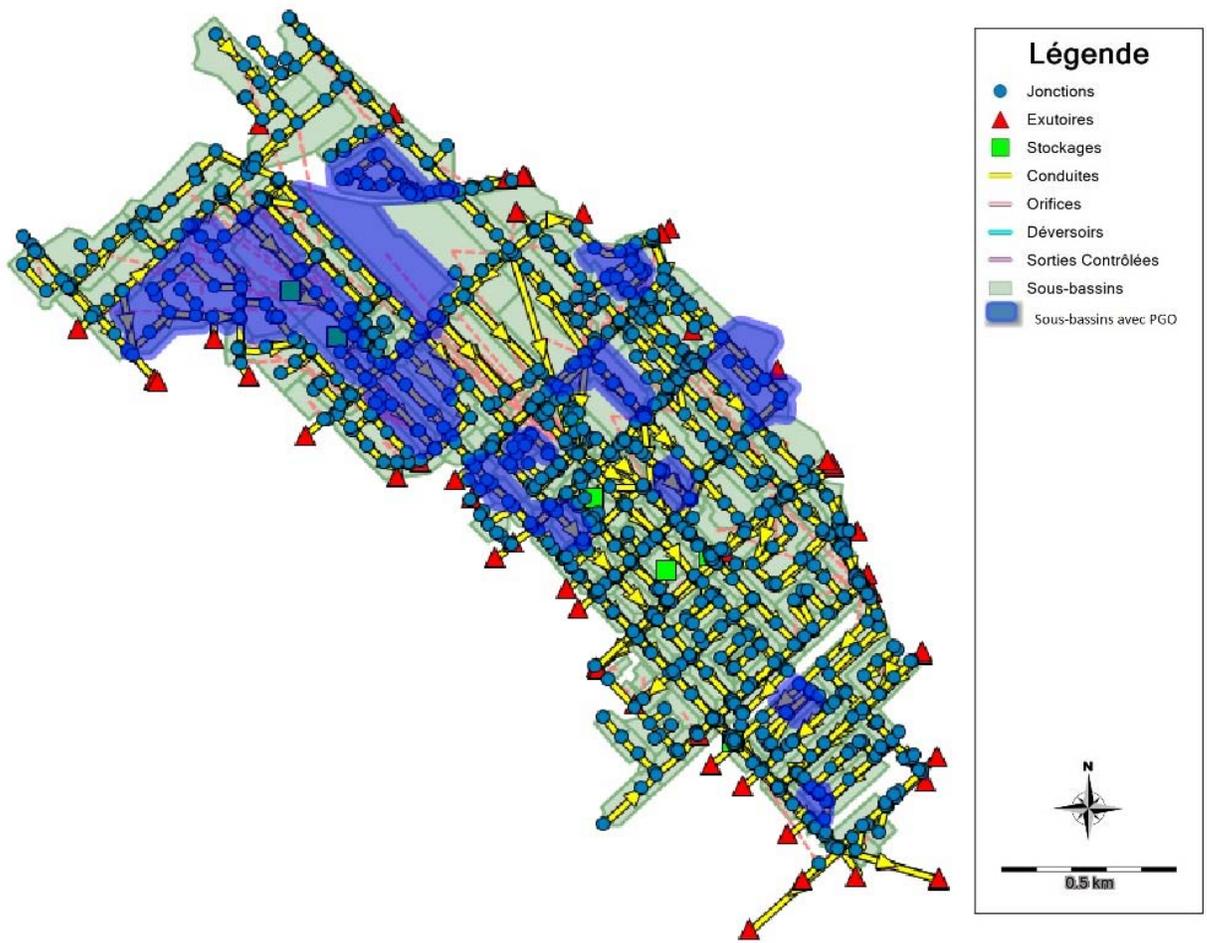


Figure 16: Sous-bassins sur lesquels des cellules de biorétention ont été ajoutées pour toutes les pluies

Tableau 8: Liste des PGO ajoutées au secteur pour réduire les surcharges

Nom du sous-bassin	Nombre d'unités	Aire d'une unité (m ²)	Largeur d'une unité (m)	% de l'aire du sous-bassin couvert par les PGO	Aire totale des cellules sur le sous-bassin (m ²)
S10	78	7	3	1,71	546
S102	55	7	3	3,41	385
S103	60	7	3	3,02	420
S104	20	7	3	1,2	140
S108_Pseudo	6	3	1	6,42	18
S115	21	7	3	0,96	147
S118	80	7	3	2,71	560
S119_Pseudo	8	7	3	9,18	56
S125	20	7	3	2,44	140
S126	20	7	3	2,29	140
S129_Pseudo	6	3	1	4,68	18
S132	24	7	3	1,98	168
S151_Pseudo	7	3	1	5,79	21
S153_Pseudo	18	7	3	4,62	126
S16	103	7	3	1,96	721
S204	13	7	3	0,95	91
S212	13	7	3	1,9	91
S213	5	7	3	1,32	35
S230	23	7	3	3,71	161
S30	35	7	3	1,41	245
S50_Pseudo	83	7	3	4,03	581
S58_Pseudo	10	7	3	13,21	70
S7	40	7	3	0,66	280
S97	10	7	3	1,68	70
S98_Pseudo	23	7	3	6,02	161
Total					5 391

Nous avons considéré les cellules comme une succession de petits rectangles établis le long d'une voie de circulation, ce qui justifie les différences d'aires de certaines cellules. Les éléments de la cinquième colonne du Tableau 8 montrent que les PGO couvrent en moyenne 3,4 % de chaque sous-bassin où des PGO ont été ajoutées avec une médiane de 2,4 % (minimum de 0,7 % et maximum de 6,2 %). Cependant, deux valeurs aberrantes sont à noter; elles représentent deux exceptions de notre échantillon et leur valeur n'a pas été prise en compte pour le calcul des tendances centrales (ni du minimum et maximum) de notre échantillon. Quelques explications au sujet de ces deux valeurs extrêmes (obtenues pour les sous-bassins S119_Pseudo et S58_Pseudo) sont données ici-bas.

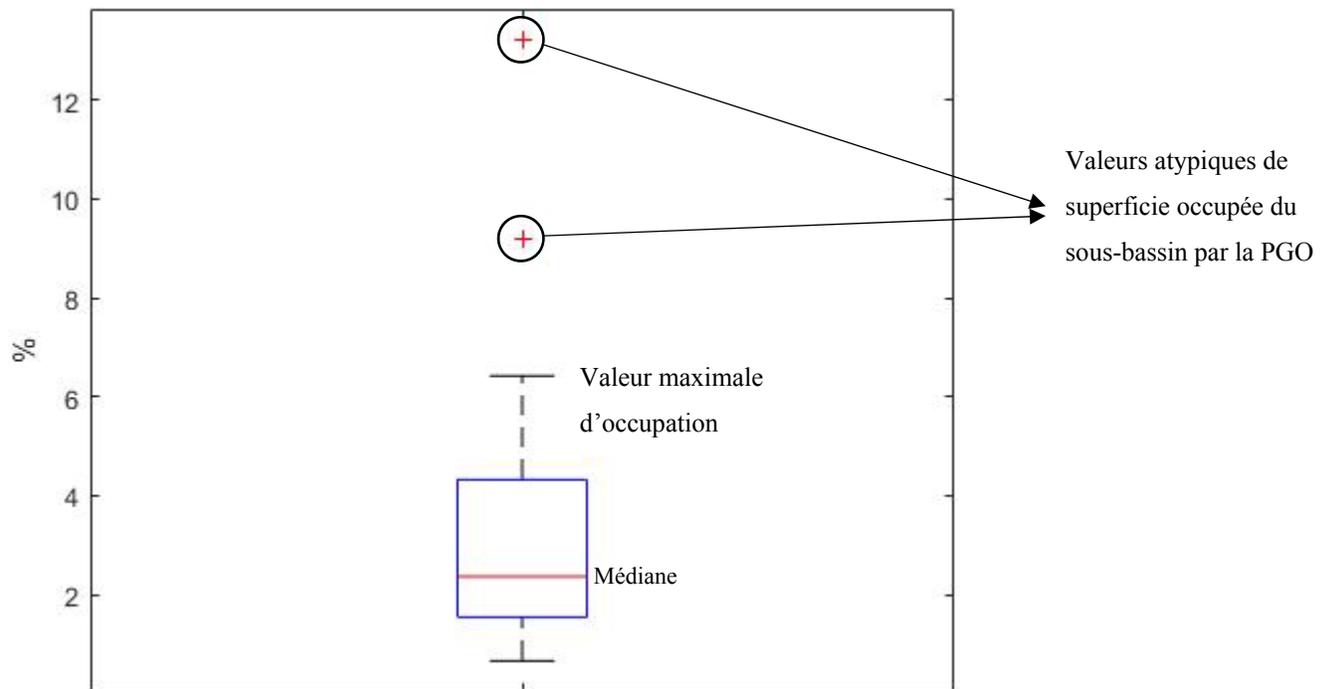


Figure 17: Distribution des pourcentages de la superficie de chaque sous-bassin couverts par les cellules de biorétention

La distribution du pourcentage de chaque sous-bassin couvert par les cellules de biorétention est illustrée à la Figure 17. Ce diagramme en boîte ne contient que les résultats pour les 24 sous-bassins sur lesquels des cellules de biorétention ont été ajoutées. Ces résultats montrent le respect du critère de sélection, qui était qu'un sous-bassin ne peut pas être couvert à plus de 20 % par les PGO. Pour ce qui en est des deux valeurs atypiques, en nous référant au Tableau 8, nous nous rendons compte qu'il s'agit de :

- Huit unités de biorétention du sous-bassin S119_Pseudo, de 56 m² au total et couvrant 9,8 % de la superficie du sous-bassin (ce sous-bassin a une aire d'environ 600 m²). La Figure 18, ci-dessous, montre qu'il s'agit d'une zone résidentielle avec possibilité de faire évoluer la couverture végétale en installant des cellules de biorétention. Cependant, un pourcentage d'imperméabilité de 100 % a été affecté à ce sous-bassin dans le modèle SWMM fourni par le gestionnaire du réseau.



Figure 18 : Aperçu de l'occupation du sol du sous-bassin S119_Pseudo (Source : PCSWMM)

- Les dix unités de biorétention du sous-bassin S58_Pseudo, couvrant 70 m² et représentant 13,21 % de la superficie du sous-bassin (ce sous-bassin a une aire d'environ 500 m²). La Figure 19 suivante montre que le sous-bassin, malgré un pourcentage d'imperméabilité de 100 % dans le modèle, a une occupation de sol qui permet de faire des changements végétalisés. Il semble donc y avoir une erreur de conception dans le modèle.



Figure 19: Aperçu de l'occupation du sol du sous-bassin S58_Pseudo (source : PCSWMM vue avec Google maps hybrid)

Les deux observations précédentes démontrent que les valeurs que nous avons exclues du calcul des tendances centrales (et des min. et max.) sont atypiques par leur manque de cohérence entre l'imperméabilité du sol (dans le modèle SWMM) et l'occupation réelle du sol. Cette incohérence justifierait le besoin d'un plus grand nombre de cellules sur ce sol et, par conséquent, d'un pourcentage d'occupation plus important.

4.1.3. Changement de conduites avec ajout de PGO

Pour les 5 391 m² de cellules de biorétention ajoutées sur le secteur, selon la méthodologie expliquée au Chapitre 3, nous obtenons une diminution importante des nœuds en surcharge pour les pluies 1 à 6, tel que résumé au Tableau 7 ci-dessus.

Cependant, nous remarquons au Tableau 7 qu'un minimum de 9 nœuds continuent à surcharger pour chaque pluie malgré l'ajout de PGO. Pour ces nœuds, les cellules de biorétention ne permettent pas de solutionner le problème. En effet, il est préférable d'augmenter le diamètre de certaines conduites afin d'éliminer les surcharges. Pour éliminer ces surcharges, nous avons modifié le diamètre de huit conduites, qui ont été

choisies grâce à la méthodologie présentée par El Housni (2018). Chacune de ces conduites a un impact sur les surcharges restantes. Pour le choix du nouveau diamètre de ces conduites, nous avons appliqué la méthodologie de El Housni (2018).

Le Tableau 9 suivant résume les changements de diamètre qui ont été faits.

Tableau 9: Liste des conduites dont le diamètre a dû être changé malgré l'utilisation de PGO sur les sous-bassins

Conduites	Diamètre actuel (m)	Diamètre modifié (m)	Nb nœuds touchés
C35	0,375	1,125	1
DOM_153648	0,375	0,600	1
PLU_1060514	0,150	0,375	1
PLU_1432353	0,200	0,450	2
PLU_156702	0,375	0,875	7
PLU_156745	0,300	0,550	2
PLU_156981	0,375	0,625	1
UNI_1407719	0,300	1,550	1

Au total, le changement de diamètre pour ces huit conduites permet d'éliminer 16 des 18 surcharges restantes pour la pluie 2 (celle causant le plus de surcharges). Néanmoins, deux nœuds surchargent toujours pour la pluie 2. L'un d'entre eux (nœud R211845) est une entrée vers un déversoir, et on considère que la surcharge à cet endroit est normale et tolérée. L'autre (nœud R048333) surcharge à peine (une durée de 36 secondes et une hauteur maximale de 0,320 m) et on considère que cette surcharge peut être tolérée. Pour ces deux nœuds, on considère qu'il n'est pas nécessaire d'entamer de grands travaux pour des problèmes qui peuvent être jugés comme mineurs.

4.1.4. Changement de conduites sans ajout de PGO

Afin de comparer les coûts du scénario d'ajout de PGO à celui du remplacement traditionnel de conduites, nous avons identifié les conduites à remplacer, et leur diamètre, selon la méthodologie décrite à la section 3.5.

Selon cette méthodologie, afin d'éliminer les surcharges pour les pluies 1 à 6, 65 conduites doivent être remplacées, ce qui correspond à 4,35 % des conduites du réseau. La liste des conduites et de leur diamètre respectif (actuel et modifié) est donnée à l'Annexe 1.

4.2. Exemple d'élimination de la surcharge pour une zone

Pour illustrer la méthodologie et ses résultats, nous présentons l'élimination des surcharges dans une zone spécifique et pour la pluie 2. Il s'agit de 14 nœuds, plutôt proches les uns des autres, qui font partie de la liste des nœuds qui surchargent avec la pluie 2. La Figure 20 illustre la zone, les nœuds, les sous-bassins où des PGO ont été installées et la conduite changée. Le Tableau 10, quant à lui, expose les détails au sujet des nœuds ainsi que de la durée et de la hauteur de leur surcharge.

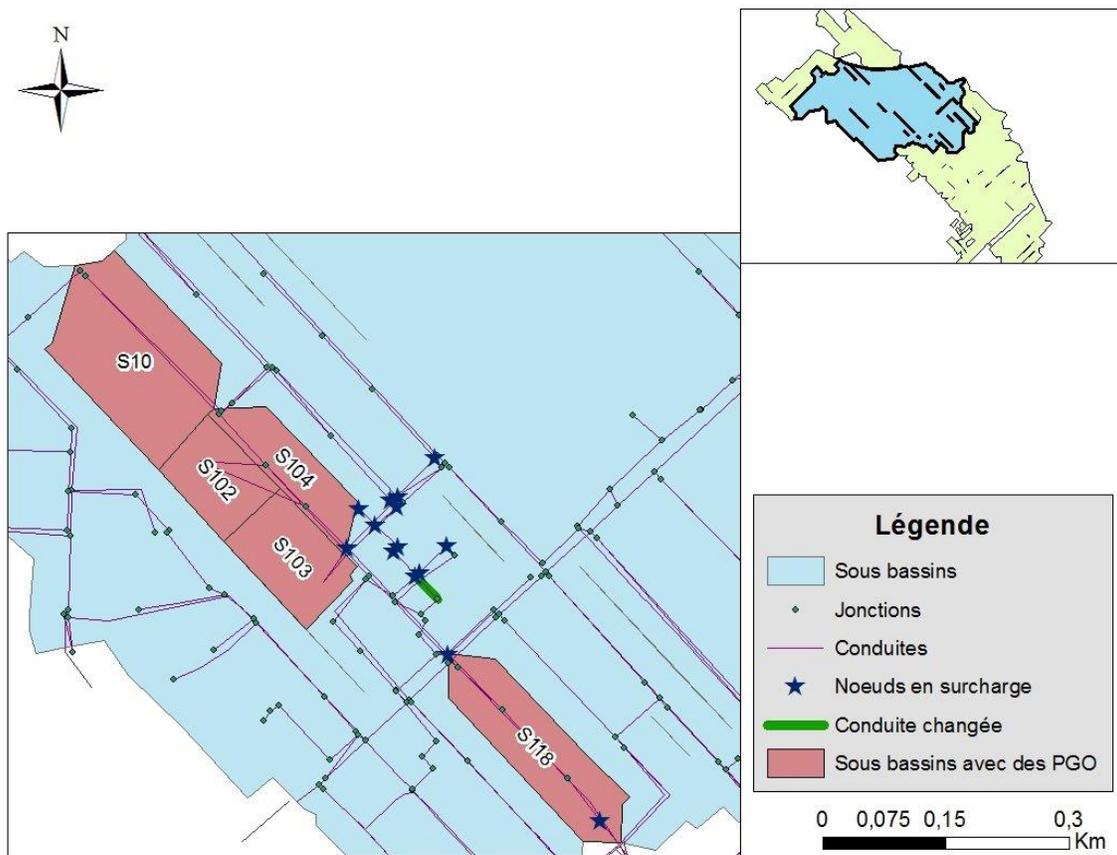


Figure 20: Carte de la zone prise en exemple avec les détails des modifications

Tableau 10: Surcharges des nœuds avant l'utilisation des PGO pour la zone prise en exemple avec la pluie 2

N° nœuds	Nb de minutes de surcharge	Hauteur maximale au-dessus des couronnes des conduites (m)
R046357	26	1,910
R046358	26	1,920
R046395	10	1,076
R048368	4	0,416
R048371	17	0,118
R048378	34	1,820
R048380	32	2,520
R048383	17	0,183
R048384	9	1,043
R048385	4	1,084
R048569	13	0,621
R048570	10	1,062
RA_273289	5	0,592
RA_273799	24	0,814

En mettant 542 m² de cellules de biorétention sur le sous-bassin S10, nous éliminons les surcharges pour 3 nœuds tout en réduisant le nombre d'heures de surcharge pour les 11 autres. Ces 11 nœuds sont exposés dans le Tableau 11 suivant.

Tableau 11: Surcharges des nœuds après ajout de cellules de biorétention sur le sous-bassin S10 avec la pluie 2

N° de nœud	Nb de minutes de surcharge	Hauteur maximale au-dessus des couronnes des conduites (m)
R046357	25	1,016
R046358	25	1,021
R046395	7	0,168
R048371	14	0,074
R048378	33	0,929
R048380	31	1,633
R048383	16	0,125
R048384	5	0,122
R048569	11	0,628
R048570	6	0,158
RA_273799	23	0,811

Les 420 m² de cellule de biorétention mis sur le sous-bassin S103 éliminent les surcharges pour 3 autres nœuds; les nœuds en surcharge restants sont exposés dans le Tableau 12.

Tableau 12: Surcharges des nœuds après ajout de cellules de biorétention sur les sous-bassins S10 et S103 pour la pluie 2

N° de nœuds	Nb de minutes de surcharge	Hauteur maximale au-dessus des couronnes des conduites (m)
R046357	25	1,016
R046358	25	1,021
R046395	7	0,168
R048378	33	0,929
R048380	31	1,633
R048384	5	0,122
R048570	6	0,158
RA_273799	17	0,751

L'installation des 385 m² de cellules sur le sous-bassin S102, des 140 m² de cellules sur le sous-bassin S104 et des 560 m² de cellules sur le sous bassin S118 permettent d'arriver au bout de la surcharge du nœud RA_273799. Les cellules sur le sous-bassin S102 réduisent le temps de surcharge de ce nœud à 0,18 h puis celles sur le sous-bassin S104 le réduisent à 0,15 h. Et enfin, celles sur le sous-bassin S118 font disparaître complètement la surcharge du nœud RA_273799. Les sept nœuds surchargeant encore sont présentés dans le Tableau 13 et la Figure 21 suivants.

Tableau 13: Surcharges des nœuds après ajout de cellules de biorétention sur les sous-bassins S10, S103, S102, S104 et S118 avec la pluie 2

N° de nœud	Nb d'heures de surcharge	Hauteur maximale au-dessus des couronnes des conduites (m)
R046357	25	1,016
R046358	25	1,021
R046395	7	0,168
R048378	33	0,929
R048380	31	1,633
R048384	5	0,122
R048570	6	0,158

Malgré l'utilisation de PGO sur les sous-bassins en amont de la zone prise en exemple, sept nœuds continuent de surcharger avec la pluie 2. Ces nœuds sont identifiés à la Figure 21 suivante.

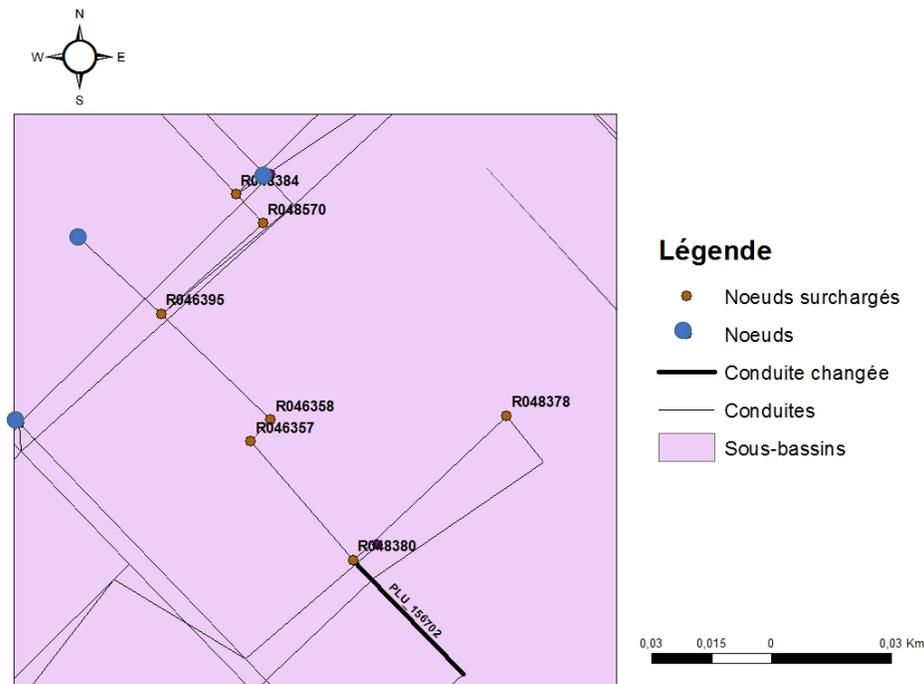


Figure 21: Nœuds restants en surcharge et conduite changée

En regardant les conduites de plus près, nous remarquons que les conduites en amont des premiers nœuds surchargés ont 1 000 mm de diamètre et qu'elles se jettent dans deux conduites de 300 mm de diamètre, ce qui est un problème de conception et est la cause directe des surcharges de ces sept nœuds pour la pluie 2. L'ajout de PGO ne devrait donc pas permettre de réduire les surcharges de façon efficace en cet endroit et il faut dans ce cas modifier le diamètre des conduites. Selon la méthodologie développée par El Housni (2018), expliquée brièvement à la section 3.5, le remplacement de la conduite PLU_156702, de 375 mm de diamètre, par une conduite de 875 mm élimine les surcharges pour les sept nœuds problématiques. Le profil en long du réseau aux alentours de la conduite PLU_156702 ainsi que les niveaux d'eau et hauteurs piézométriques, à 1h20 de la pluie 2, sont illustrés à la Figure 22 suivante.

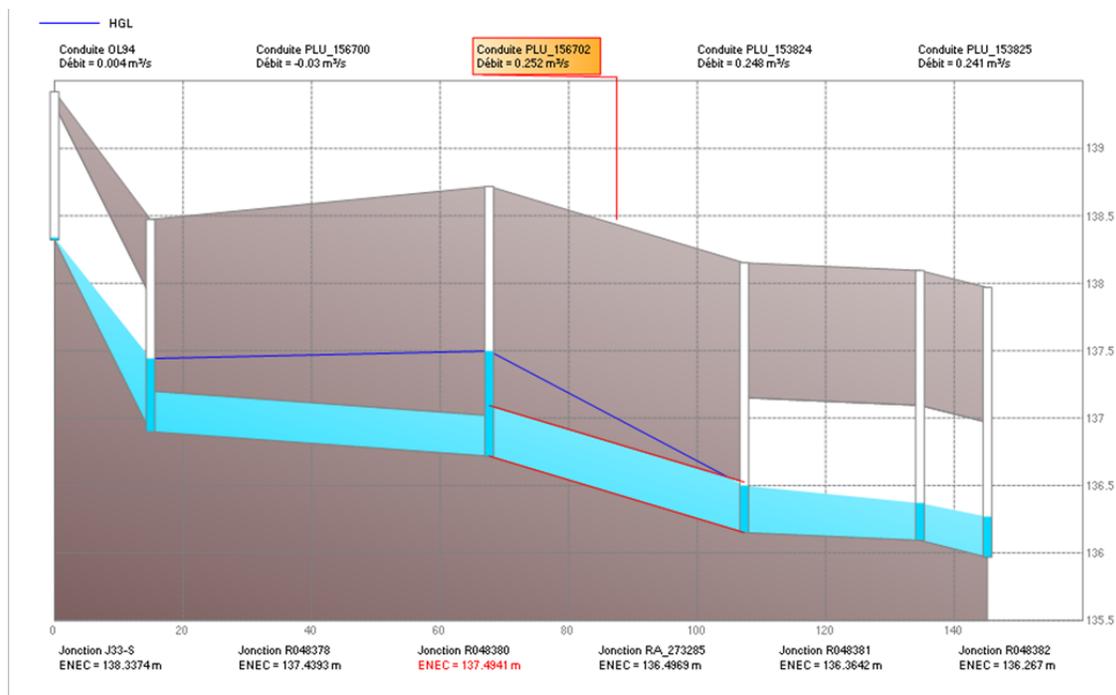


Figure 22: Profil de la conduite PLU_156702 et des conduites encadrantes

Dans ce profil, nous constatons clairement qu'il y a une différence de pente et de diamètre des conduites. Par instinct, nous changerions le diamètre des deux conduites PLU_156700 et PLU_156702. Cependant, la méthodologie de El Housni (2018) identifie la conduite PLU_156702 comme seule conduite pour laquelle il est nécessaire

d'augmenter le diamètre. Grâce à cette seule modification, les sept nœuds ont arrêté de surcharger.

4.3. Comparaison des coûts de construction

Le calcul des coûts est dépendant à la fois des matériaux et de la main d'œuvre. Dans la section 3.6 précédente, nous avons fait un recensement exhaustif (Annexe 2) des coûts de construction pour chacune des solutions possibles. Dans cette section, nous présentons deux tableaux : le premier (Tableau 14) représente les calculs faits en ayant comme base des coûts unitaires de construction minimaux, le second (Tableau 15), quant à lui, est basé sur des coûts unitaires maximaux.

Tableau 14 : Coût total de construction avec les valeurs minimales de coûts unitaires

Scénario	Type d'installation	Prix unitaire	Quantité	Prix total	Totaux
1	PGO	360 \$/m ²	5 391 m ²	1 940 760 \$	2 338 716 \$
	Conduites	1 500 \$/m	265 m	397 956 \$	
2	Conduites	1 500 \$/m	4 506 m	6 758 646 \$	6 758 646 \$

Dans le Tableau 14 ci-dessus, nous avons calculé le coût de construction pour les deux scénarios exposés précédemment dans la section 4.1. Dans ce tableau, nous remarquons que l'installation et la construction de la combinaison de PGO et de conduites est environ trois fois moins chère que le changement exclusif des conduites qui posent problème.

Tableau 15 : Coût total de construction avec les valeurs maximales de coûts unitaires

Scénario	Type d'installation	Prix unitaire	Quantité	Prix total	Totaux
1	PGO	825 \$/m ²	5 391 m ²	4 447 575 \$	5 840 421 \$
	Conduites	5 250 \$/m	265 m	1 392 846 \$	
2	Conduites	5 250 \$/m	4 506 m	23 655 261 \$	23 655 261 \$

Dans le Tableau 15 ci-dessus, le calcul du prix maximal pour chacun des deux cas nous ramène à la même conclusion que le Tableau 14. Cependant, nous remarquons dans ce cas que l'écart entre le coût des deux types d'intervention se creuse encore plus. En effet, pour ce calcul, nous avons un rapport entre le coût des deux scénarios supérieur à 4. De plus, même en comparant le prix maximal de la combinaison de PGO et de conduites (5 840 421 \$; voir Tableau 15) au prix minimal du changement exclusif de conduites (6 758 646 \$; voir Tableau 14), nous remarquons qu'il y a une différence d'environ 1 million de dollars (\$) en faveur de l'installation de PGO.

5. Conclusions

Face aux problèmes d'inondation dus au débordement et à la surcharge des conduites, nous avons comparé dans ce mémoire deux méthodes de gestion de l'eau pluviale en milieu urbain. À l'aide du logiciel PCSWMM, nous avons fait plusieurs simulations afin de comparer l'utilisation de deux méthodes. Ainsi, nous avons développé deux méthodologies afin d'identifier, dans un premier temps, le nombre et la localisation des PGO à installer sur chaque sous-bassin ainsi que, dans un deuxième temps, les conduites à changer afin, dans les deux cas, d'éliminer les surcharges de conduites pour les pluies à l'étude. La PGO choisie pour cette évaluation est la biorétention, chaque cellule ayant une épaisseur totale de 1,1 m et étant composée d'une superposition de trois couches. Les paramètres permettant de représenter ce type de PGO dans PCSWMM ont été déterminés sur la base d'une analyse de sensibilité.

Les résultats obtenus sont dépendants des pluies; nous avons utilisé six pluies, ayant une période de retour de 2 à 5 ans. Les premières simulations concluent que 18 à 54 nœuds surchargent, selon la pluie utilisée, si aucune modification n'est apportée au réseau à l'étude. Dans le scénario où nous procédons exclusivement à l'augmentation du diamètre des conduites causant les surcharges, il faudrait changer 65 conduites, soit 4,35 % des conduites du réseau. Dans celui où nous installons des cellules de biorétention sur certains sous-bassins, il a fallu couvrir notre bassin à l'étude d'une superficie totale de 5 391 m² de cellules de biorétention, soit 0,21 % de la superficie totale du secteur, mais cette solution réduit de 50 % à 70 % le nombre de surcharges, selon la pluie simulée. Pour les nœuds restants, il a fallu résoudre des problèmes structuraux (différences de pentes, conduites en aval trois à quatre fois plus petites que celles en amont, etc.). La solution a été d'augmenter le diamètre de certaines conduites en appliquant la même méthodologie que pour le changement de conduite exclusif. Notons que notre zone d'étude est à forte densité végétale, ce qui offre la possibilité d'y installer des cellules de biorétention à plusieurs endroits. Notons également que le redimensionnement des

conduites n'est pas non plus une solution ultime. En effet, dans ce scénario, il est possible de déplacer le problème plus en aval dans le réseau voire dans le milieu récepteur.

Nous avons comparé les coûts de construction pour chacun des deux scénarios, soit celui du changement exclusif de conduites et celui combinant l'installation de PGO au changement du diamètre de quelques conduites. Il en est ressorti que ce dernier scénario est environ trois fois moins onéreux que le premier.

Notre hypothèse de départ, selon laquelle une méthode s'inscrivant dans une logique de développement durable s'avère être moins coûteuse, a ainsi été validée, et ce à l'échelle d'un grand bassin de drainage de 260,4 ha. Cependant, il reste à valider les résultats sur le terrain. Néanmoins, la fiabilité du logiciel PCSWMM nous permet d'avoir une bonne confiance dans les résultats obtenus; ceux-ci demeurent toutefois spécifiques au cas d'étude présenté dans ce mémoire.

Les perspectives qui s'ouvrent pour ce sujet sont nombreuses, notamment : la possibilité de faire un projet pilote qui permettrait d'appuyer les conclusions sur des données prises sur le terrain, ou encore l'application de la méthodologie à d'autres cas d'études afin de valider l'hypothèse pour différents types de secteurs drainés et de réseaux de drainage, la prise en compte des différents coûts d'entretien, mais aussi la possibilité de prendre en compte des PGO autres que la biorétention ou même l'utilisation de plusieurs PGO en série.

6. Références

- Abi Aad MP, Suidan MT & Shuster WD (2009) Modeling techniques of best management practices: rain barrels and rain gardens using EPA SWMM-5. *Journal of Hydrologic Engineering* 15(6):434-443.
- Ahiablame LM, Engel BA & Chaubey I (2012) Effectiveness of Low Impact Development Practices: Literature Review and Suggestions for Future Research. *Water, Air, & Soil Pollution* 223(7):4253-4273.
- Azzout Y, Barraud S & Cres F-N (1994) Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception, réalisation et entretien. *Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception, réalisation et entretien*, Technique et Documentation Lavoisier.
- Barlow D, Burrill G & Nolfi J (1977) Research report on developing a community level natural resource inventory system: Center for Studies in Food Self-Sufficiency.).
- CHI (2017a) *LID control editor*. <https://support.chiwater.com/77680/lid-control-editor> (Consulté en fév. 2018)
- CHI (2017b) *Support PCSWMM*. <https://support.chiwater.com/77657/reference-tables> (Consulté le 2018-01-03)
- County Prince George's (1999) Low-impact development design strategies: An integrated design approach. *Department of Environmental Resources, Programs and Planning Division, Prince George's County, Maryland*.
- Davis AP, Hunt WF, Traver RG & Clar M (2009) Bioretention technology: Overview of current practice and future needs. *Journal of Environmental Engineering* 135(3):109-117.
- De Paola F, Galdiero E, Giugni M & Pugliese F (2015) Sustainable Development of Storm-water Systems in African Cities Considering Climate Change. *Procedia Engineering* 119:1181-1191.
- GVSDD (Greater Vancouver Sewerage and Drainage District) (1999) *Best Management Practices, Guide for Stormwater*. Greater Vancouver Sewerage and Drainage District, Vancouver, Colombie-Britannique
- Dugué M (2010) *Conception d'un jardin de pluie: théorie et étude de cas*. Maitre en Science appliquée (École Polytechnique de Montréal, Montréal). 126 p
- El Housni H (2018) *Prise en compte des aspects structural et hydraulique dans la planification du renouvellement des réseaux de drainage urbain dans un contexte de changement climatique*. Thèse de doctorat en préparation. Thèse en doctorat (INRS Québec, Canada).
- Environmental Protection Agency (2000) Low Impact Development (LID): a literature review. (United States Environmental Protection Agency Washington, DC, Washington DC), p i-ii.

Fletcher TD, Shuster W, Hunt WF, Ashley R, Butler D, Arthur S, Trowsdale S, Barraud S, Semadeni-Davies A, Bertrand-Krajewski J-L, Mikkelsen PS, Rivard G, Uhl M, Dagenais D & Viklander M (2014) SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal* 12(7):525-542.

Fuamba M, Walliser T, Daynou M, Rousselle J & Rivard G (2010) Vers une gestion durable et intégrée des eaux pluviales : Application des propositions d'action publique au Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering* 37(2):209-223.

Gérardin L (2017) *Suivi de la mise en place de pratiques de gestion optimale des eaux pluviales*. Maîtrise en gestion des infrastructures urbaines (École Technologie Supérieure, Université du Québec, Montréal). 85 p

Gironás J, Roesner LA, Rossman LA & Davis J (2010) A new applications manual for the Storm Water Management Model (SWMM). *Environmental Modelling & Software* 25(6):813-814.

Glorieux M (2010) *Gestion de l'eau de pluie en milieu urbain: intégration des arbres dans les systèmes de biorétention*. (École de technologie supérieure). 127 p. <http://espace.etsmtl.ca/id/eprint/641>

Holzbauer-Schweitzer B (2016) *Evaluating Low Impact Development Best Management Practices as an Alternative to Traditional Urban Stormwater Management*. Master of Environmental Science (University of Oklahoma, Norman, Oklahoma). 131 p. https://shareok.org/bitstream/handle/11244/44594/2016_Brandon_Holzbauer-Schweitzer_Thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Huber WC (2001) New options for overland flow routing in SWMM. *Urban drainage modeling*. p 22-29.

Huber WC, Dickinson RE, Barnwell Jr TO & Branch A (1988) Storm water management model; version 4. *Environmental Protection Agency, United States*.

Ice G (2004) History of innovative best management practice development and its role in addressing water quality limited waterbodies. *Journal of Environmental Engineering* 130(6):684-689.

Idaho Department of Environmental Quality (2005) *Catalog of Stormwater Best Management Practices for Idaho Cities and Counties*. <http://www.deq.idaho.gov/media/618074-9.pdf>

InfraGuide (2003) *Coordinating infrastructure works a best practice by the national guide to sustainable municipal infrastructure*. © Guide national pour des infrastructures municipales durables (InfraGuide), Ottawa

James R & Rossman L (2012) Modelling LIDs using PCSWMM and EPA SWMM5. (CHI), p 57.

Kuichling E (1889) The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* 20(1):1-56.

- Mailhot A, Bolduc S, Duchesne S & Villeneuve J-P (2008) *Adaptation aux changements climatiques (cc) en matière de drainage urbain au Québec: revue de littérature et analyse critique des mesures de contrôle à la source: version finale*. INRS, Centre Eau, Terre et Environnement,
- Mailhot A, Bolduc S, Talbot G & Khedhaouiria D (2014) Gestion des eaux pluviales et changements climatiques (Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec), p 412.
- Marsalek J & Chocat B (2002) International report: stormwater management. *Water science and technology* 46(6-7):1-17.
- Martin P, Turner B, Waddington K, Pratt C, Campbell N, Payne J & Reed B (2000) Sustainable urban drainage systems: design manual for Scotland and Northern Ireland. C521. CIRIA, London, UK.
- McCarthy J (2008) *New Hampshire Stormwater Manual : VOLUME 1 Stormwater and Antidegradation*. 1, Comprehensive Environmental Inc., Comprehensive Environmental Inc. <http://des.nh.gov/organization/commissioner/pip/publications/wd/documents/wd-08-20a.pdf>
- MDDEP (2011) *Guide de gestion des eaux pluviales*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), Québec, Canada. 386 p
- Miller JD, Kim H, Kjeldsen TR, Packman J, Grebby S & Dearden R (2014) Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology* 515:59-70.
- Mulvaney T (1851) On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. *Proceedings of the institution of Civil Engineers of Ireland* 4(2):18-33.
- Ontario Ministry of the Environmental (2003) *Stormwater Management Planning and Design Manual*. Ministry of the Environment, Ottawa, ON, CAD. 379 p
- Renard F & Volte E (2009) Étude des débordements de temps de pluie du système d'assainissement du Grand Lyon. *TSM* (7/8):30-38.
- Rivard G (2009) Aménagement et gestion des eaux pluviales: concepts, réglementation et applications. in *Aquapraxis* (Aquapraxis, Saint-Hyacinthe).
- Rivard G, Rimbault G, Barraud S, Freni G, Ellis B, Zaizen M, Quigley M & Strecker E (2005) Stormwater Source Control as a Strategy for Sustainable Development: State of the Practice and Perceived Trends. *10th ICUD (International Conference on Urban Drainage)*. (Copenhagen, Aout 2005) International Water Association, p 1-8.
- Rossmann L, Huber WC, Laboratory NRM & Agency UEP (2016) *Storm Water Management Model Reference Manual Volume III – Water Quality*. 136 p. www.epa.gov/water-research

- Rossman LA (2010) *Storm water management model user's manual, version 5.0*. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environmental Protection Agency Cincinnati, OH
- Schueler TR (1987) *Controlling urban runoff: A practical manual for planning and designing urban BMPs*. Water Resources Publications,
- Sebti A (2016) *Optimisation de l'implantation des pratiques de gestion optimales (PGO) dans les réseaux de drainage urbain*. PhD (École Polytechnique de Montréal). 159 p. <http://publications.polymtl.ca/2076/> (Consulté le 12 juil. 2016 16:16)
- Service de l'Eau Montreal (2014) Quelles infrastructures vertes pour la gestion des eaux de ruissellement? (Service de l'Eau, Montreal), p 45.
- Vaucelle S (1999) Bordeaux: de la lutte contre les inondations à la dépollution des eaux pluviales. *Burdeos: de la lucha contra las inundaciones a la depuración de las aguas pluviales*.) *Revue Sud Ouest* (4):61-76.
- Ville de Montréal (2008) Évaluation des coûts unitaires des mesures d'adaptation aux changements climatiques en drainage urbain. (Montréal), p 11.
- Watt WE, Waters D & McLean R (2003) Report 2003–1: Climate Change and Urban Stormwater Infrastructure in Canada: Context and Case Studies. *Hydrology Research Group, Department of Civil Engineering, Queen's University*.
- Whelans C, Maunsell HG & Thompson P (1994) Planning and management guidelines for water sensitive urban (residential) design. *Department of Planning and Urban Development of Western Australia, Perth, Australia*.
- Wong TH (2006) Water sensitive urban design-the journey thus far. *Australian Journal of Water Resources* 10(3):213-222.
- Wyoming Department of Environmental Quality & Water Quality Division (2013) *Urban Best Management Practice Manual*. Wyoming Department of Environmental, Wyoming

Annexes

Annexe I

Changement de conduites

Dans les résultats présentés, nous avons changé au total 65 conduites dans le cas du scénario de l'agrandissement du diamètre des conduites. Pour établir ces nouveaux diamètres, nous avons appliqué la méthodologie de El Housni (2018). La liste détaillée de ces 65 conduites ainsi que leurs diamètres initiaux et modifiés sont regroupés dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Nouveau diamètre appliqué

Nom de la conduite	Diamètre initial (m)	Diamètre modifié (m)	Nom de la conduite	Diamètre initial (m)	Diamètre modifié (m)
C35	0,375	1,125	PLU_156745	0,3	0,55
C92	0,3	0,6	PLU_156981	0,375	0,625
DOM_1428195	0,45	0,7	PLU_296060	0,2	0,95
DOM_1428196	0,45	0,7	PLU_30763	0,15	0,375
DOM_1428198	0,375	0,7	UNI_1105962	0,2	0,25
DOM_1428203	0,375	0,7	UNI_1168354	0,525	0,6
DOM_1428206	0,375	0,7	UNI_1407719	0,3	1,55
DOM_1428208	0,375	0,7	UNI_1428834	0,375	0,7
DOM_153648	0,375	0,6	UNI_1432383	0,3	0,375
DOM_153811	0,3	0,45	UNI_153693	0,45	0,6
DOM_153812	0,375	0,45	UNI_153694	0,45	0,6
DOM_154699	0,25	0,375	UNI_153960	0,525	0,6
DOM_156392	0,45	0,7	UNI_154053	0,45	0,6
DOM_156411	0,45	0,7	UNI_154191	0,3	0,375
DOM_156499	0,375	0,45	UNI_154198	0,525	0,6
DOM_156698	0,375	0,45	UNI_154202	0,525	0,6
DOM_157016	0,3	0,45	UNI_154697	0,45	0,6
DOM_157018	0,375	0,45	UNI_154720	0,3	0,375
DOM_157019	0,3	0,45	UNI_154725	0,525	0,6
DOM_157235	0,25	0,375	UNI_154747	0,2	0,25
DOM_422792	0,45	0,7	UNI_156398	0,375	0,45
DOM_422793	0,45	0,7	UNI_156401	0,375	0,45
DOM_423426	0,45	0,7	UNI_156403	0,375	0,7
DOM_423427	0,45	0,7	UNI_156421	0,375	0,7
DOM_513001	0,375	0,6	UNI_156422	0,375	0,7
DOM_X1	0,45	0,7	UNI_156423	0,375	0,7
PLU_1060514	0,15	0,375	UNI_157083	0,375	0,7
PLU_1188195	0,375	0,45	UNI_157242	0,375	0,45
PLU_1188198	0,2	0,45	UNI_157244	0,375	0,7
PLU_1432353	0,2	0,45	UNI_163416	0,25	0,3
PLU_1432356	0,2	0,45	UNI_163643	0,525	0,6
PLU_1432357	0,2	0,45			
PLU_156486	0,3	0,55			
PLU_156702	0,375	0,875			

Annexe II

Coûts de construction

Dans cette annexe, nous exposons les différents coûts de construction que nous avons relevés dans la littérature. Ce sont eux qui nous ont permis d'obtenir les fourchettes de valeurs qui sont les bases de nos calculs des coûts.

Tableau 17: Coûts de construction pour bassins de biorétention et jardins de pluie (extrait de Gérardin, 2017)

Province ou État	Type de PGO	Nom et description du système	Source	Coût de construction	Surface (m ²)	Coût de construction (\$/m ²)	Coût d'entretien par année	Coût d'entretien par année (\$/m ² /année)
Colorado (USA)	Jardin de pluie	21st and Iris BMP, Off-line bioretention area—Placed next to swale at lower elevation to increase storage	BMP Data base	87 000,00 \$	105,45	825,04	200	1,90 \$
Montréal(QC)	Bassin biorétention	Bassin du nouveau Havre	Ville de Montréal	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
BMP Data base	Bassin biorétention	Une quinzaine d'études ((Geosyntec Consultants Inc. et Wright Water Engineers Inc., 2012)	Geosyntec Consultants Inc. et Wright Water Engineers Inc., 2012	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Brome-Missiquoi (QC)	Bassin biorétention	3 cellules de biorétentions dans un stationnement	MRC Brome-Missiquoi	95 250,00 \$	267	356,74	2000	7,49 \$
Moyenne				182 250,00 \$	372,45	489,33 \$	2200	5,91 \$

Tableau 18: Coûts de conception pour différentes mesures de gestion des eaux pluviales (extrait de (Ville de Montréal, 2008))

Mesure	Conception type telle que définie dans le mandat	Total conception sans entretien	Total capacité
Mesure 1 Remplacement des conduites principales	mm	/m linéaire	/(gain de débit en m ³ /s)
	300	1 500 \$	--
	375	1 750 \$	7 200 \$
	450	1 933 \$	4 600 \$
	525	2 000 \$	1 050 \$
	675	2 500 \$	6 800 \$
	750	2 625 \$	1 450 \$
	900	3 015 \$	1 800 \$
	1 050	3 225 \$	725 \$
	1 200	3 940 \$	1 950 \$
	1 350	4 102 \$	360 \$
	1 500	4 805 \$	1 300 \$
	1 800	5 250 \$	320 \$
Mesure 2 Bassin de rétention souterrain	Unité	/m ²	/m ³
	Type 1	375 \$	375 \$
	Type 2	280 \$	280 \$
	Type 3	260 \$	260 \$
Mesure 3 Bassin de rétention de surface	Unité	/m ²	/m ³
	Type 1	100 \$	200 \$
	Type 2	60 \$	79 \$
	Type 3	55 \$	76 \$
Mesure 4 Bassin de biorétention	Unité	/m ²	/m ³
	Type 1	380 \$	2 540 \$
	Type 2	415 \$	380 \$
Mesure 5 Barils et réservoirs de captation des eaux de toit	Unité	/unité	/m ³
	Type 1	150 \$	750 \$
	Type 2	730 \$	640 \$
	Type 3	2 150 \$	380 \$
Mesure 6 Toit vert	Unité	/m ²	/m ³
	Type 1	135 \$	2 300 \$
	Type 2	140 \$	1 400 \$
	Type 3	195 \$	1 040 \$
Mesure 7 Tranchée d'infiltration	Unité	/m linéaire	/m ³
	Type 1	90 \$	460 \$
	Type 2	435 \$	555 \$
	Type 3	7 652 \$	N/A
Mesure 8 Dépression végétalisée	Unité	/m linéaire	/m ³
	Type 1	185 \$	185 \$
	Type 2	475 \$	290 \$