

Titre: Performances hydraulique et microclimatique des saillies de trottoir végétalisées conçues pour la rétention des eaux pluviales
Title: végétalisées conçues pour la rétention des eaux pluviales

Auteur: Didier Rochette Deslauriers
Author:

Date: 2018

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Rochette Deslauriers, D. (2018). Performances hydraulique et microclimatique des saillies de trottoir végétalisées conçues pour la rétention des eaux pluviales [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/3299/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/3299/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Musandji Fuamba
Advisors:

Programme: Génie civil
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

PERFORMANCES HYDRAULIQUE ET MICROCLIMATIQUE DES SAILLIES DE
TROTTOIR VÉGÉTALISÉES CONÇUES POUR LA RÉTENTION DES EAUX PLUVIALES

DIDIER ROCHETTE DESLAURIERS

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

AOÛT 2018

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

PERFORMANCES HYDRAULIQUE ET MICROCLIMATIQUE DES SAILLIES DE
TROTTOIR VÉGÉTALISÉES CONÇUES POUR LA RÉTENTION DES EAUX PLUVIALES

présenté par : ROCHETTE DESLAURIERS Didier

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. MAHDI Tew-Fik, Ph. D., président

M. FUAMBA Musandji, Ph. D., membre et directeur de recherche

Mme BICHAÏ Françoise, Ph. D., membre

REMERCIEMENTS

Il est important de souligner le support et l'aide que j'ai reçus de nombreuses personnes durant la réalisation de ce projet de recherche. Je remercie mon directeur de recherche Musandji Fuamba pour sa disponibilité et ses conseils tout au long du projet.

Je n'aurais pu réaliser ce projet sans la collaboration du personnel de la Ville qui m'a donné l'occasion d'étudier un projet réel et qui a répondu efficacement à mes questions. Il faut également mentionner la grande disponibilité du personnel responsable à nous accompagner pour la collecte de données dans les égouts.

Je remercie également Étienne Bélanger pour son aide et ses conseils dans la collecte des données terrain.

J'ai grandement apprécié l'apport des stagiaires Daniel Kelvin Fezeu Nzeutcho, Inotes Simeon, Youssef Ali Myaz et Étienne Ntobe bunkete qui ont participé à ce projet et qui ont permis d'alléger le travail de modélisation à réaliser.

Je remercie les autres étudiants du département que j'ai côtoyés pour les idées et leurs commentaires sur mon projet. Je tiens à souligner plus particulièrement l'aide de mes collègues de bureau Carl Gagnon-Ouellette, Essoyeke Batchabani et Maryam Safari qui m'ont aidé tout au long de ma maîtrise.

Je remercie mes parents et mon frère pour leur soutien ainsi que pour leurs commentaires et la correction du français.

RÉSUMÉ

Les pratiques de gestion optimales (PGO) des eaux pluviales sont devenues essentielles à mettre en œuvre afin de limiter les impacts de l'urbanisation et des changements climatiques. L'une d'entre elles, la biorétention, est une PGO permettant d'assurer le contrôle qualitatif et quantitatif de l'eau de ruissellement. Celle-ci est implantée dans les dépressions en amont des bassins versants.

Une des façons d'intégrer cette PGO dans l'aménagement urbain est de l'implanter dans des saillies de trottoirs végétalisées. Ces aménagements très populaires sont un élargissement du trottoir visant avant tout à améliorer la sécurité des piétons, notamment en ralentissant la circulation automobile. En incluant un espace végétalisé, il est possible d'en tirer des bénéfices en gestion des eaux pluviales (GEP) en créant un aménagement multifonctionnel qui permet la rétention de l'eau. Avec une conception appropriée, ces saillies peuvent inclure une aire de biorétention qui permet également le contrôle qualitatif de l'eau de ruissellement.

On retrouve plusieurs exemples de tels aménagements déjà construits, surtout aux États-Unis. Cependant, jusqu'à maintenant, peu d'études ont permis d'évaluer leur efficacité d'un point de vue hydraulique. Également, davantage de recherches sont nécessaires pour mieux évaluer les bénéfices secondaires des PGO comme l'amélioration du microclimat. Ce mémoire tente d'améliorer les connaissances sur ces deux aspects. L'objectif principal de cette étude était de déterminer la performance sur les plans hydraulique et microclimatique des saillies de trottoir végétalisées.

Ce projet de recherche est basé sur un cas réel de saillies de trottoir végétalisées avec conception pour la rétention des eaux pluviales dont la construction est prévue à l'été 2018. Une campagne de mesure a d'abord été menée dans le réseau d'égout unitaire en place. Des mesures de température et d'humidité ont également été récoltées dans une zone avec saillies de trottoir végétalisées. Un modèle numérique hydraulique SWMM a été développé et calibré avec les données récoltées *in situ* afin de mesurer la performance des saillies existantes et de tester certaines modifications permettant d'améliorer leur performance. Une modélisation microclimatique avec le logiciel ENVI-MET a également été utilisée afin de mesurer la performance microclimatique des saillies étudiées.

Les résultats obtenus à l'issue de cette étude montrent d'une part une diminution du débit de pointe dans l'égout variant de 22,7 % à 40,4 % selon l'événement de pluie considéré et d'autre part une réduction du volume ruisselé variant de 24,6 % à 29,3 dans un bassin versant dont 5 % de la surface de drainage est occupé par des saillies végétalisées. Différents scénarios d'étude ont également été élaborés afin de trouver des modifications aux aménagements permettant d'améliorer leur performance. L'augmentation de la hauteur d'accumulation en surface ainsi que l'utilisation d'un substrat plus grossier, adapté au climat froid ont été modélisés. Parmi ces deux modifications, l'augmentation de la hauteur d'accumulation de 80 mm à 150 mm a le plus d'effet sur la performance hydraulique, réduisant le débit de pointe de 21,6 % par rapport au scénario avec saillies sans modification.

Le modèle microclimatique a permis d'obtenir des résultats préliminaires du point de vue de la performance microclimatique. Une réduction de la température de l'air 0,9°C est obtenue en comparant le scénario avec saillies au scénario sans saillie.

ABSTRACT

Best management practices (BMPs) have become an important part of stormwater management over the last few decades. Research has shown they can be a cost-effective option to reduce not only pollution but also peak flow and stormwater volumes. Thus, they can play an important role in the mitigation of climate change and urbanization negative effects.

Bioretention is one example of BMPs that is widely used. This practice refers to the use of engineered soil designed to treat water, to reduce peak flow and to retain volume. Bioretention is most effective when located in the upper parts of catchments, in depressions.

One way to integrate bioretention in an urban area is inside vegetated curb extensions. These measures are an extension of the sidewalk and their main objective is to reduce traffic speed and pedestrian walking distance. By including vegetation in the extra space on the sidewalk, benefits can be gained in stormwater management with notably the possibility to design them as bioretention areas.

Many examples of these types of vegetated curb extension, sometimes referred to as stormwater curb extension, are already in place, mainly in the United-States. However, few studies have really assessed their stormwater performance in terms of quantity and quality control. Also, more research is needed to measure secondary benefits of BMP's such as the potential to improve microclimate, mainly to better evaluate their cost effectiveness.

This thesis aims to improve knowledge of both of these aspects. The main objective is to evaluate the hydraulic and microclimatic performance of stormwater extension curbs.

This project uses a case study of vegetated curb extensions that are planned to be constructed in the summer of 2018 in the region of Montreal. A measurement campaign has been carried out in the combined sewer network in place to collect flow data. Temperature and humidity measurements have also been collected in areas with existing vegetated curb extension. A hydraulic and a microclimatic numerical models have been constructed with PCSWMM and ENVI-Met to study the performance of the planned curb extensions and also to test the impact of possible modifications on the hydraulic and microclimatic performance.

Simulation results have shown a peak flow decrease varying from 22.7 % up to 40.4% depending on the rain event considered and a total volume reduction varying from 24.6 % and 29.3 %, in a sewer pipe with extension curbs covering 5 % of the drainage area.

Tested modifications include increased berm height to increase surface reservoir capacity and coarser plantation soil with higher permeability. Increasing berm height from 80 mm to 150 mm has shown to be the most effective change, reducing peak flow by 21.6 % compared to “as planned” extension curbs.

A micro-climatic model has also lead to preliminary results on the evaluation of the micro-climatic performance. Simulation results indicate a 0.9°C air temperature reduction when comparing scenarios with and without curb extensions.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VIII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES FIGURES.....	XIV
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIX
LISTE DES ANNEXES.....	XX
DÉFINITIONS	XXI
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE	3
2.1 Histoire contemporaine de la gestion des eaux pluviales en milieu urbain	3
2.1.1 XIX ^e siècle	3
2.1.2 XX ^e siècle.....	4
2.1.3 Fin du XX ^e siècle jusqu'au présent	5
2.2 Impacts de l'urbanisation et des changements climatiques.....	5
2.2.1 Impacts hydrologiques de l'urbanisation	5
2.2.2 Îlot de chaleur urbain.....	7
2.2.3 Impacts des changements climatiques.....	9
2.3 Pratiques de gestion optimales	9
2.3.1 Types de contrôle	11
2.3.2 Classification.....	12

2.3.3	Types de PGO	13
2.3.4	Biorétention	14
2.4	Règlementation en vigueur.....	23
2.5	Conclusions	23
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE		25
3.1	Objectif spécifique no. 1	25
3.2	Objectif spécifique no. 2	25
3.3	Objectif spécifique no. 3	26
3.4	Objectif spécifique no. 4	26
3.5	Résumé des étapes.....	26
CHAPITRE 4 CAMPAGNE DE MESURES.....		28
4.1	Zones d'étude	29
4.2	Matériel et acquisition des données	33
4.2.1	Tests préliminaires sur les débitmètres	35
4.2.2	Collecte des données pluviométriques	40
4.2.3	Collecte des données hydrauliques	40
4.2.4	Collecte des données climatiques.....	44
4.3	Validation des données.....	45
4.3.1	Données pluviométriques	46
4.3.2	Données hydrauliques	47
4.3.3	Données climatiques	49
4.4	Incertitudes de mesure.....	51
4.5	Conclusion.....	53

CHAPITRE 5	MODÉLISATION NUMÉRIQUE.....	55
5.1	Construction du modèle hydraulique	56
5.1.1	Données disponibles.....	56
5.1.2	Initialisation du modèle.....	57
5.1.3	Analyse de sensibilité.....	62
5.2	Construction des scénarios d'étude	64
5.2.1	Pluviométrie	64
5.2.2	Durée des simulations	65
5.2.3	Aires de biorétention	66
5.2.4	Modifications aux aménagements de biorétention.....	69
5.2.5	Présentation des scénarios d'étude.....	69
5.3	Modélisation microclimatique.....	70
5.3.1	Présentation du modèle ENVI-met	70
5.3.2	Zone modélisée et initialisation du modèle.....	71
CHAPITRE 6	RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	73
6.1	Analyse de sensibilité et calibration du modèle SWMM.....	73
6.2	Validation du modèle	77
6.3	Situation actuelle et planifiée	78
6.3.1	Modèle avec saillies de trottoir	78
6.3.2	Résultats	81
6.4	Scénarios d'étude	87
6.4.1	Modification de la hauteur du réservoir en surface.....	87
6.4.2	Modification de la composition du substrat	90

6.4.3	Combinaison des deux modifications (H=225 mm + Argile = 5%)	91
6.4.4	Scénario avec saillies occupant 5 % de la superficie totale du bassin versant.....	93
6.5	Simulations microclimatiques	95
6.6	Sources d’erreurs et limites de l’étude	97
CHAPITRE 7 CONCLUSIONS		100
7.1	Synthèse des résultats	100
7.2	Recommandations	101
7.3	Améliorations et perspectives de recherche	102
RÉFÉRENCES		104
ANNEXES		108

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Influence de l’urbanisation sur le cycle hydrologique ((EPA, 1983) telle que citée dans Rivard (2005)).....	6
Tableau 2.2: Effets anticipés des changements climatiques au Québec et conséquences sur la GEP (liste non exhaustive) (Ouranos, 2015; Ville de Montréal, 2017).....	10
Tableau 2.3: Critères de conception selon (MDDELCC, 2017)	12
Tableau 2.4: Paramètres généraux de conception	17
Tableau 2.5: Paramètres de conception du réservoir de surface	18
Tableau 2.6: Paramètres de conception du substrat organique	19
Tableau 2.7: Performance quantitative des ouvrages de biorétention.....	22
Tableau 4.1: Types de données récoltées lors des deux phases de la campagne de mesures	28
Tableau 4.2 : Caractéristiques générales du secteur d’étude.....	30
Tableau 4.3: Caractéristiques des zones d’étude propres aux phases 1 et 2	32
Tableau 4.4 : Résultats du test dans le bac d’eau sur les sondes débitmétriques	39
Tableau 4.5: Propriétés des conduites monitorées	42
Tableau 4.6: Écarts de température et d’humidité sur un même montage durant les quatre journées de mesures	50
Tableau 5.1: Données utilisées pour la construction du modèle SWMM.....	56
Tableau 5.2: Paramètres des sous-bassins du modèle de ruissellement	57
Tableau 5.3: Paramètres du modèle d’infiltration (modèle de Horton)	58
Tableau 5.4: Paramètres du modèle hydraulique	58
Tableau 5.5: Paramètres des aménagements de biorétention du modèle SWMM	66
Tableau 6.1: Gradients de sensibilité du débit de pointe (rQp) et du volume de ruissellement (rVr) pour les paramètres du modèle de ruissellement.....	73

Tableau 6.2: Gradients de sensibilité liés aux paramètres du modèle d'infiltration	74
Tableau 6.3: Incertitudes liés aux paramètres du modèle hydraulique	74
Tableau 6.4: Indicateur de la qualité de la calibration, en considérant la période de 2 :00 à 3: 30	76
Tableau 6.5 : Valeurs des paramètres du modèle calibré.....	76
Tableau 6.6: Surfaces tributaires des conduites 5 et 7 et proportion de ces surfaces occupée par les saillies de trottoir	80
Tableau 6.7: Effet des saillies sur la performance du réseau en conditions actuelles et avec l'effet des changements climatiques	82
Tableau 6.8 : Performance des saillies de trottoir avec biorétention en conditions actuelles et avec l'effet des changements climatiques — Total du bassin versant	86
Tableau 6.9: Réduction du débit de pointe par rapport au scénario avec saillies non modifiées à la conduite 7, avec hauteur d'accumulation augmentée.....	89
Tableau 6.10 : Réduction du débit de pointe et du volume de ruissellement par rapport au scénario avec saillies non modifiées.....	91
Tableau 6.11 : Réduction du débit de pointe et du volume de ruissellement par rapport au scénario avec saillies non modifiées.....	92
Tableau 6.12 : Réduction du débit de pointe par rapport au scénario sans saillies à la conduite 5, avec des saillies recouvrant 5 % du bassin versant	94
Tableau B.1: Conditions initiales et frontières du modèle hydraulique de SMWW.....	113

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Comparaison des hydrogrammes générés par un événement de pluie avant et après développement	7
Figure 2.2: Exemple schématique du profil de température d'un ICU. Tiré de (Giguère, 2009)	8
Figure 2.3: Localisations possible des PGO dans le réseau de drainage pour un contrôle en chaîne. Figure tirée de (MDDEFP & MAMROT, 2012).....	13
Figure 2.4: Schémas d'un système de biorétention typique. Tiré de (Kratky et al., 2017) © Springer. Adapté avec permission.	15
Figure 3.1 : Schéma méthodologique.....	27
Figure 4.1: Zones d'étude pour la collecte de données climatiques et hydrauliques phases 1 et 2	29
Figure 4.2 : Schémas du réseau d'égout et localisation des débitmètres – Phase 1	31
Figure 4.3 : Schémas du réseau d'égout et localisation des débitmètres et du pluviomètre – Phase 2.....	32
Figure 4.4: Localisation des points de mesures de température et d'humidité relative	33
Figure 4.5: Débitmètre ISCO 2150	34
Figure 4.6: Data logger OM-92.....	34
Figure 4.7: Pluviomètre ISCO 674.....	35
Figure 4.8: Schémas du montage dans le canal d'essai pour la calibration	36
Figure 4.9: Courbes de calibration de la hauteur pour la sonde 4. h_{ref} : hauteur mesurée avec une règle; h_{mes} : hauteur mesurée avec la sonde débitométrique; h_0 : hauteur de mise à zéro ($h_0 = 0,215\text{ m}$).....	37
Figure 4.10 : Courbes de calibration des vitesses (V) pour les sondes 4 en a), 5 en b) et 6 en c). V_{ref} : vitesse de référence du canal ; V_{mes} : vitesses mesurées avec la sonde débitométrique ..	38
Figure 4.11: Installation du pluviomètre sur un toit dans la zone d'étude de la phase 2	40

Figure 4.12: Schémas de l'installation des débitmètres	41
Figure 4.13: Regard d'accès pour l'installation des sondes débitométriques (crédit photo : Daniel Kelvin Fezeu Nzeutcho et Inotes Simeon).....	43
Figure 4.14: Collecte des données de débits	43
Figure 4.15: Montage utilisé pour la prise de mesures de données climatiques	45
Figure 4.16: Comparaison des hauteurs de précipitations journalières mesurées par le pluviomètre (en orange) et par Environnement Canada (en bleu).....	46
Figure 4.17: Vitesses mesurée et calculée en fonction de la hauteur mesurée dans la conduite 5.....	47
Figure 4.18: Pluviométrie, débits et coefficients de Manning des sondes 4, 5 et 6 en fonction du temps au mois de juin 2018.....	48
Figure 4.19: Données de température obtenues le 2017-09-24.....	51
Figure 5.1: Réseau d'égout modélisé dans SWMM	62
Figure 5.2 : Hyétoqramme de la pluie qualité.....	64
Figure 5.3 : Hyétoqramme de la pluie Chicago (T=10 ans).....	65
Figure 5.4 : Coupe schématique des saillies de trottoir telles que modélisées dans SWMM	67
Figure 5.5 : Modèle micro-climatique.....	72
Figure 6.1: Hydrogramme après calibration	75
Figure 6.2: Schémas du bassin versant modélisé, incluant le sous-bassin 1 en bleu et un aggrandissement de la zone avec saillies de trottoirs	79
Figure 6.3: Hydrogramme — Conduite 5 — Pluie qualité	83
Figure 6.4: Hydrogramme — Conduite 5 — Pluie 10 ans.....	83
Figure 6.5: Hydrogramme — Conduite 7 — Pluie qualité	84
Figure 6.6 : Hydrogramme — Conduite 7 — Pluie 10 ans.....	84
Figure 6.7 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans – Sans saillie	85

Figure 6.8 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans – Avec saillies.....	85
Figure 6.9: Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec hauteur du réservoir en surface augmentée — Pluie de contrôle qualité majorée.....	88
Figure 6.10: Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec hauteur du réservoir en surface augmentée — Pluie de 10 ans majorée	88
Figure 6.11: Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec composition du substrat modifiée — Pluie de contrôle qualité majorée	90
Figure 6.12 : Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec composition du substrat modifiée — Pluie 10 ans majorée	90
Figure 6.13 : Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec composition du substrat modifiée — Pluie qualité majorée.....	91
Figure 6.14 : Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec composition du substrat modifiée — Pluie 10 ans majorée	92
Figure 6.15 : Hydrogramme à la conduite 5 — Scénarios avec saillies occupant 5% de la superficie du bassin versant — Pluie qualité majorée	93
Figure 6.16 : Hydrogramme à la conduite 5 — Scénarios avec saillies occupant 5% de la superficie du bassin versant — Pluie qualité majorée	94
Figure 6.17 : Hauteur d'eau maximale à la conduite 5 pour une pluie de 10 ans majorée, avec des saillies recouvrant 5% de la superficie du bassin versant	95
Figure 6.18 : Évolution de la température à la saillie 2.....	96
Figure 6.19 : Températures du scénario sans saillie à 15h00.....	96
Figure 6.20 : Températures du scénario avec saillie à 15h00	97
Figure A.1 Dessins technique de saillie de trottoir avec biorétention. Source : (City of San Francisco, 2016).	108
Figure A.2 : Exemple de saillie de trottoir végétalisée à Philadelphie utilisée dans la gestion des eaux pluviale. Tiré de (NACTO, 2018).....	109

Figure A.3 : Saillie de trottoir avec biorétention, Victoria. Tiré de (LID SWM Planning and Design Guide contributors, 2018)	109
Figure B.1 : Schémas des flux d'eau modélisés dans SWMM	114
Figure C.1 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie qualité – Avec saillies	116
Figure C.2 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie qualité – Sans saillies	116
Figure C.3 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans – Sans saillie	116
Figure C.4 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans – Avec saillies	117
Figure C.5 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie qualité – Sans saillie	117
Figure C.6 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie qualité – Avec saillies	117
Figure C.7 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie 10 ans – Sans saillie	117
Figure C.8 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie 10 ans – Avec saillies	118
Figure C.9: Hydrogramme – Pluie qualité majorée – Conduite 5	118
Figure C.10 : Hydrogramme – Pluie qualité majorée – Conduite 7	119
Figure C.11 : Hydrogramme – Pluie 10 ans majorée – Conduite 5	119
Figure C.12: Hydrogramme – Pluie 10 ans majorée – Conduite 7	120
Figure C.13 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie qualité majorée – Sans saillies	120
Figure C.14 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie qualité majorée – Avec saillies	120
Figure C.15 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans majorée – Sans saillies	121
Figure C.16 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans majorée – Avec saillies	121
Figure C.17 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie qualité majorée – Sans saillies	121

Figure C.18 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie qualité majorée – Avec saillies	122
Figure C.19 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie 10 ans majorée – Sans saillies	122
Figure C.20 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie 10 ans majorée – Avec saillies	122

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

GEP	Gestion des eaux pluviales
PGO	Pratiques de gestion optimales
ICU	Îlot de chaleur urbain

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A	EXEMPLES DE SAILLIES DE TROTTOIRS VÉGÉTALISÉES	108
ANNEXE B	PRÉSENTATION DU MODÈLE SWMM	110
ANNEXE C	RÉSULTATS DU MODÈLE SWMM	116
ANNEXE D	PARAMÈTRES DE SIMULATION DU MODÈLE ENVI-MET	123

DÉFINITIONS

Pratique de gestion optimale (PGO): Ensemble des techniques permettant un contrôle qualitatif et quantitatif de l'eau de ruissellement, de façon à réduire la pollution et à diminuer la fréquence des inondations (Rivard, 2005).

Biorétention : Pratique de gestion optimale structurale utilisant les plantes et le sol afin de permettre le ralentissement, la filtration et l'infiltration de l'eau (Dugué, 2010). Ces ouvrages permettent le contrôle quantitatif et qualitatif à des degrés qui varient selon la conception choisie.

Saillie de trottoir : Élargissement du trottoir visant avant tout à ralentir la vitesse des véhicules, à diminuer la distance de traverse des piétons et à augmenter leur visibilité (Bella & Silvestri, 2015) et qui peut également être envisagées comme PGO lorsque végétalisée. On distingue trois types de saillies végétalisées :

1. Saillie de type 1 : Ces saillies contiennent de la végétation mais n'ont pas été conçues dans le but de permettre un contrôle quantitatif ou qualitatif des eaux pluviales. Les pentes du terrain adjacent ne permettent donc pas d'acheminer une grande partie de l'eau de ruissellement sur ces ouvrages ce qui fait que leur impact en gestion des eaux pluviales est limité. Ce mémoire ne traite pas de ce type de saillie.
2. Saillie de type 2 : Ce type de saillie est conçu pour permettre un contrôle quantitatif de l'eau de ruissellement sans viser le contrôle qualitatif. Les saillies du cas d'étude de ce mémoire sont de ce type.
3. Saillie de type 3. Les saillies type 3 correspondent à des saillies type 2 dont on attribue un deuxième rôle : celui d'améliorer la qualité de l'eau. Dans ce travail, on les désigne comme des « saillies de trottoir avec biorétention ».

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les saillies de trottoir désignent un type d'aménagement urbain avec élargissement du trottoir vers la rue. Elles sont le plus souvent implantées aux intersections, dans les rues qui comprennent des espaces de stationnements sur le côté. Leur fonction principale est de ralentir la vitesse des véhicules, de diminuer la distance de traverse des piétons et d'améliorer leur visibilité (Bella & Silvestri, 2015).

L'augmentation de la largeur du trottoir crée un espace supplémentaire dans lequel des végétaux sont fréquemment ajoutés. En dirigeant l'eau de ruissellement vers les saillies, celles-ci peuvent être également mises à profit dans la gestion des eaux pluviales (GEP) en permettant un contrôle quantitatif et qualitatif de l'eau ruisselée. Il est notamment possible d'inclure des aires de biorétention dans ces saillies lorsque le contrôle qualitatif est visé.

La biorétention est un terme désignant les aménagements utilisant les plantes et le sol afin de permettre un ralentissement, la filtration et l'infiltration de l'eau (Dugué, 2010). Ces ouvrages font partie des pratiques de gestion optimales (PGO), qui englobent les pratiques visant un contrôle qualitatif et quantitatif de l'eau de ruissellement, de façon à réduire la pollution et à diminuer la fréquence des inondations (Rivard, 2005). Le fonctionnement de la biorétention repose sur un grand nombre de processus physiques, chimiques et biologiques dont l'infiltration de l'eau, la filtration, l'assimilation biologique et l'évapotranspiration.

Par ailleurs, l'urbanisation rapide, les changements climatiques et la préservation de la ressource en eau constituent des défis grandissants pour les milieux urbains. L'urbanisation perturbe le cycle hydrologique naturel et provoque une augmentation de la fréquence des inondations et de la pollution vers les milieux récepteurs. De plus, les milieux urbains sont vulnérables à l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU), qui occasionne de nombreuses pertes de vie humaines ainsi qu'une augmentation de la demande énergétique. Les changements climatiques accentuent ces effets en augmentant la fréquence des événements de pluie extrêmes, des sécheresses et des vagues de chaleur (Ashley, Nowell, Gersonius, & Walker, 2011). Afin de mieux faire face à ces défis, il existe un besoin de poursuivre la recherche sur l'efficacité des PGO dans la GEP et aussi de reconnaître

les différents bénéfices secondaires des PGO (Ashley et al., 2011) comme l'amélioration du microclimat, afin de rendre plus attrayant économiquement l'implantation de PGO.

Les saillies de trottoir végétalisées avec conception pour la rétention des eaux pluviales constituent un exemple de PGO qui, bien que populaires, n'ont pas fait l'objet d'études de leur performance. Ce travail vise donc à évaluer leurs performances hydraulique et microclimatique. L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité de ces saillies du point de vue de la réduction du débit de pointe et du volume de ruissellement dans un réseau d'égout unitaire ainsi que du point de vue de la diminution de la température de l'air ambiant. Ce mémoire s'attarde donc non seulement à la performance des saillies mais également à leur potentiel pour améliorer la performance d'un réseau d'égout. Les objectifs spécifiques sont les suivants:

1. Établir une méthodologie de collecte de données de hauteurs et de vitesses dans un réseau d'égout unitaire réel ainsi que de températures.
2. Construire un modèle hydraulique calibré et validé d'un réseau d'égout réel ainsi qu'un modèle microclimatique afin de mesurer le volume total d'eau ruisselé, le débit de pointe et la température.
3. Évaluer la performance hydraulique et microclimatique des saillies de trottoir en conditions projetées à l'aide de la modélisation numérique du point de vue de la réduction du débit de pointe et du volume dans le réseau, du volume d'eau retenu par les saillies ainsi que de la réduction de la température.
4. À partir des résultats, émettre des recommandations afin d'améliorer la performance hydraulique et microclimatique des saillies de trottoir.

Le premier chapitre de ce travail porte sur les objectifs de celui-ci. Le deuxième chapitre présente une revue de littérature qui inclut certaines généralités sur les PGO ainsi qu'une description plus détaillée de la biorétention. Le troisième chapitre fait référence à la méthodologie générale de ce travail. Le quatrième chapitre précise la zone d'étude et le matériel utilisé pour la collecte de données. Le cinquième chapitre traite des modèles utilisés dans cette étude et des étapes de modélisation. Le sixième chapitre contient les résultats et une discussion. Le chapitre 7 présente la conclusion.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

Cette revue de littérature porte sur la gestion des eaux pluviales et plus particulièrement sur les PGO et la biorétention. Elle permet d'atteindre l'objectif spécifique no. 3 comme défini au chapitre 3. Il faut préciser que ce chapitre ne traite pas spécifiquement des saillies de trottoir, dont la fonction principale n'est pas liée à la GEP comme défini au chapitre 1. Certaines illustrations de saillies sont tout de même présentées à l'annexe a. De plus, comme la littérature portant sur les saillies de trottoir avec conception pour la GEP est très limitée, ce chapitre se consacre davantage à la biorétention en général ce qui permet tout de même de déterminer comment améliorer le contrôle quantitatif des saillies étudiées.

2.1 Histoire contemporaine de la gestion des eaux pluviales en milieu urbain

Les nombreuses découvertes scientifiques et avancées techniques du XIX^e siècle ont permis une évolution importante des pratiques en GEP. On dit d'ailleurs de ce siècle qu'il marque le début des pratiques modernes (Burian & Edwards, 2002) puisque certaines approches développées durant cette période comme la méthode rationnelle sont encore utilisées de nos jours. Cette section présente un bref historique de la GEP depuis cette période jusqu'à aujourd'hui.

2.1.1 XIX^e siècle

Au début du XIX^e siècle, les efforts de recherche qui ont suivis les épidémies de choléra ont permis d'associer la propagation des maladies aux eaux usées. Ces nouvelles découvertes ont eu un impact sur les objectifs en GEP, qui se sont orientés vers l'évacuation rapide des eaux sanitaires et pluviales hors des centres urbains, vers les cours d'eau afin d'éviter les épidémies. Cette approche est aujourd'hui appelée « approche hygiéniste » (Chocat, Abirached, Delage, & Faby, 2008).

C'est également durant le XIX^e siècle que de nombreuses méthodes de calcul pour la conception des réseaux d'égout ont été développées (Burian & Edwards, 2002). Regroupant dans un premier temps des équations empiriques et très variées, les techniques de calcul ont évolué pour inclure les notions de temps de concentration et d'événement de pluie de conception. Ces deux dernières

notions ont amené le développement de la méthode rationnelle dans la deuxième moitié du XIX^e siècle.

Il faut aussi souligner que des matériaux comme le mortier de ciment et les formes ovoïdales de conduites ont commencé à être employés afin de transporter plus efficacement les débits sanitaires plus faibles (Rivard, 2005). La réglementation a également évolué afin de permettre les raccordements privés au réseau d'égout public (Rivard, 2005). Cette nouvelle pratique a transformé les réseaux d'égout habituellement pluvial en réseaux combinés.

2.1.2 XX^e siècle

Les techniques utilisées à partir du milieu du 20^e siècle jusque dans les années 1980 consistaient exclusivement à évacuer l'eau pluviale efficacement afin d'éviter les inondations. Cette approche a cependant fini par montrer ses limites de plusieurs façons. Notamment au début des années 1980 en France, la capacité des réseaux existants est devenue insuffisante (Chocat et al., 2008). Durant la même période, la montée des préoccupations environnementales aux États-Unis a poussé les décideurs à s'intéresser aux effets des eaux de ruissellement sur les milieux récepteurs. Une vaste étude de la *United States Environmental Protection Agency* (EPA) menée à cet effet a montré que les eaux de ruissellement en milieu urbain contenaient des quantités importantes de polluants (MDDEFP & MAMROT, 2012). Ces nouvelles problématiques ont nécessité un renouvellement des approches en GEP, ce qui a mené au concept de PGO décrit au Chapitre 1.

D'un point de vue technique et scientifique, de nombreuses avancées ont permis d'améliorer les pratiques de GEP dans la deuxième moitié du 20^e siècle. On peut notamment citer les trois avancées suivantes :

- Pluies synthétiques – (1957-1967) (Rivard, 2005)
- Développement des modèles informatiques (ex : SWMM, HYMO, ILLUDAS) – (À partir de 1967) (Rivard, 2005)
- Notion de réseaux majeurs et mineurs (MDDEFP & MAMROT, 2012)

2.1.3 Fin du XX^e siècle jusqu'au présent

Les objectifs de la GEP en milieu urbain se sont diversifiés depuis les années 1980. L'eau pluviale n'est plus seulement vue comme une problématique à gérer mais bien comme une ressource dont on peut tirer profit en tant que source additionnelle d'eau, en permettant une biodiversité accrue et en procurant une amélioration du microclimat (Fletcher et al., 2014). L'approche privilégiée de nos jours en GEP, dite « approche intégrée », vise la planification et la gestion des eaux pluviales à l'échelle du bassin versant, sur tout le cycle hydrologique (MDDEFP & MAMROT, 2012). L'approche est donc multidisciplinaire et nécessite l'intervention d'une multitude de spécialistes. Également, cette vision plus large de la GEP se traduit par des critères de performance des PGO qui sont plus variés. Ces critères sont décrits plus largement à la section 2.3.

Tel que soulevé par Fletcher et al. (2014), il existe dans la littérature une grande variété d'expressions pour décrire l'approche et les techniques modernes en GEP. Ces expressions varient selon la langue et l'emplacement géographique en plus d'évoluer dans le temps. Par exemple, les expressions « Low impact development », « Water sensitive urban design » sont liées aux nouvelles approches en GEP comme le terme « PGO », mais leur signification peut varier. Il existe également certaines expressions locales qui ont un sens pratiquement identique à « PGO » comme « techniques alternatives » en France et « Stormwater Control Measures » aux États-Unis. Puisqu'utilisés dans le guide de gestion des eaux pluviales (MDDEFP & MAMROT, 2012), les termes « PGO » et « approche intégrée » seront employés dans ce mémoire, parfois en tant que synonyme des autres expressions similaires.

2.2 Impacts de l'urbanisation et des changements climatiques

L'urbanisation et les changements climatiques constituent deux problématiques étroitement liées à la GEP tel que mentionné dans l'introduction. Cette section résume l'état des connaissances sur les effets de ces deux phénomènes.

2.2.1 Impacts hydrologiques de l'urbanisation

Le cycle hydrologique inclut trois parcours possible de l'eau provenant des précipitations :

- L'eau peut être interceptée ou stockée dans les dépressions de surface. Cette eau est éventuellement éliminée par évapotranspiration ou par infiltration.
- L'eau peut s'infiltrer dans le sol. On distingue l'infiltration superficielle et l'infiltration profonde, qui alimente la nappe phréatique.
- L'eau peut ruisseler en surface.

L'imperméabilisation des surfaces a comme effet de modifier la proportion de l'eau qui emprunte chacun de ces cheminements. Le tableau 2.1 détaille cette modification du cycle hydrologique pour différents niveaux d'urbanisation.

Tableau 2.1 : Influence de l'urbanisation sur le cycle hydrologique ((EPA, 1983) telle que citée dans Rivard (2005))

Type de sol	Ruissellement (%)	Évapotranspiration (%)	Infiltration peu profonde (%)	Infiltration profonde (%)
Sol naturel	10	40	25	25
10-20% pavé	20	38	21	21
35-50% pavé	30	35	20	15
75-100% pavé	55	30	10	5

La modification du cycle hydrologique a pour effet d'altérer l'hydrogramme généré par un événement de pluie, tel qu'illustré à la figure 2.1. L'hydrogramme après-développement est caractérisé par une augmentation du volume d'eau ruisselé, une augmentation du débit de pointe et une diminution du temps de concentration. Ces changements sont attribuables à l'imperméabilisation des surfaces ainsi qu'à l'altération de la topographie, ce qui a pour effet de réduire l'infiltration et d'accélérer l'écoulement.

L'urbanisation affecte également le débit de base des cours d'eau récepteur par temps sec. Cependant, cet difficile à prédire en raison des nombreux facteurs impliqués comme la réduction de l'infiltration et le débit d'eau supplémentaire provenant des fuites de conduites d'eau potable. (Hamel, Daly, & Fletcher, 2013). Davantage d'études sur le sujet sont donc nécessaires.

En terminant, il faut mentionner que l'influence de l'urbanisation ne peut pas être généralisée quantitativement à tous les cas puisque les conséquences dépendent largement de la nature du sol naturel et de l'événement de pluie considéré. Par exemple, le débit de pointe peut augmenter de 2 à 3 fois si on considère une pluie de 1 dans 100 ans tandis que cette augmentation peut atteindre 5 à 10 fois pour une pluie de 1 dans 5 ans ou de 1 dans 10 ans (Rivard, 2005).

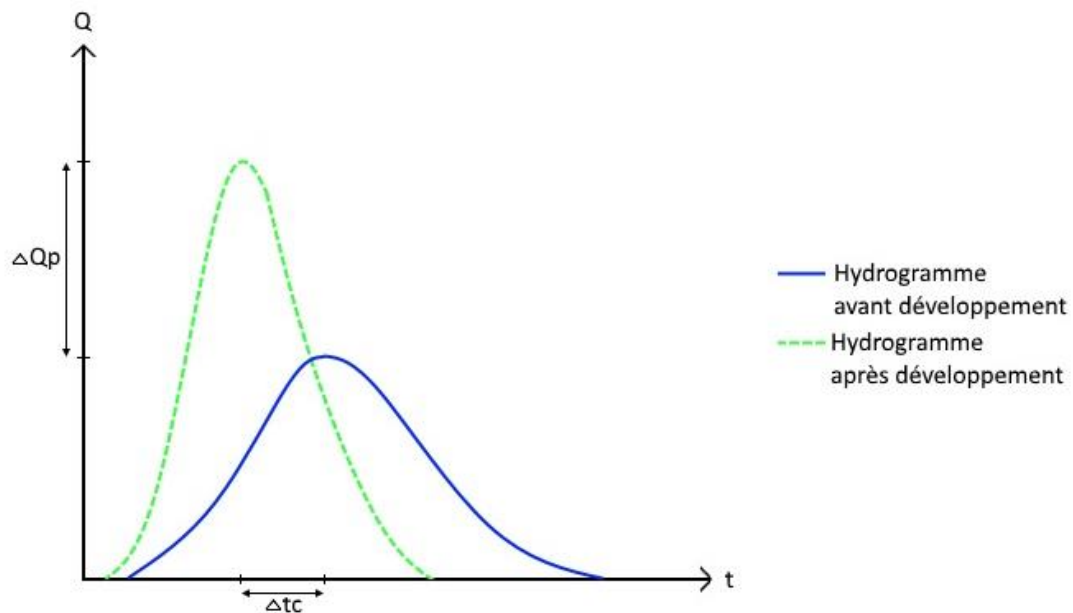


Figure 2.1: Comparaison des hydrogrammes générés par un événement de pluie avant et après développement

2.2.2 Îlot de chaleur urbain

L'îlot de chaleur urbain (ICU) désigne un secteur du milieu urbain avec des températures plus élevées que dans les zones en périphérie. Les facteurs qui contribuent à cet effet sont les gaz à effet de serre, la perte de végétation, l'utilisation accrue de matériaux imperméables, les propriétés thermiques des matériaux ainsi que la chaleur anthropique (Giguère, 2009). L'ICU peut être

observé de deux manières, soit avec la température de l'air celle des surfaces. De manière générale, l'effet est plus prononcé la nuit (Alcoforado & Andrade, 2008). La figure 2.2 illustre un exemple de profil de température d'un développement urbain avec les zones adjacentes.

Il n'est pas aisé de quantifier l'effet d'ICU puisque les méthodes pour calculer la différence de température varient grandement (Alcoforado & Andrade, 2008). Par exemple, le choix de considérer les températures uniquement de jours ou de prendre en compte celles des nuits fait varier le résultat. Selon Giguère (2009), la différence de température est comprise entre 2 et 12°C tandis que selon Mohajerani, Bakaric et Jeffrey-Bailey (2017), cette différence serait de 5 à 15°C.

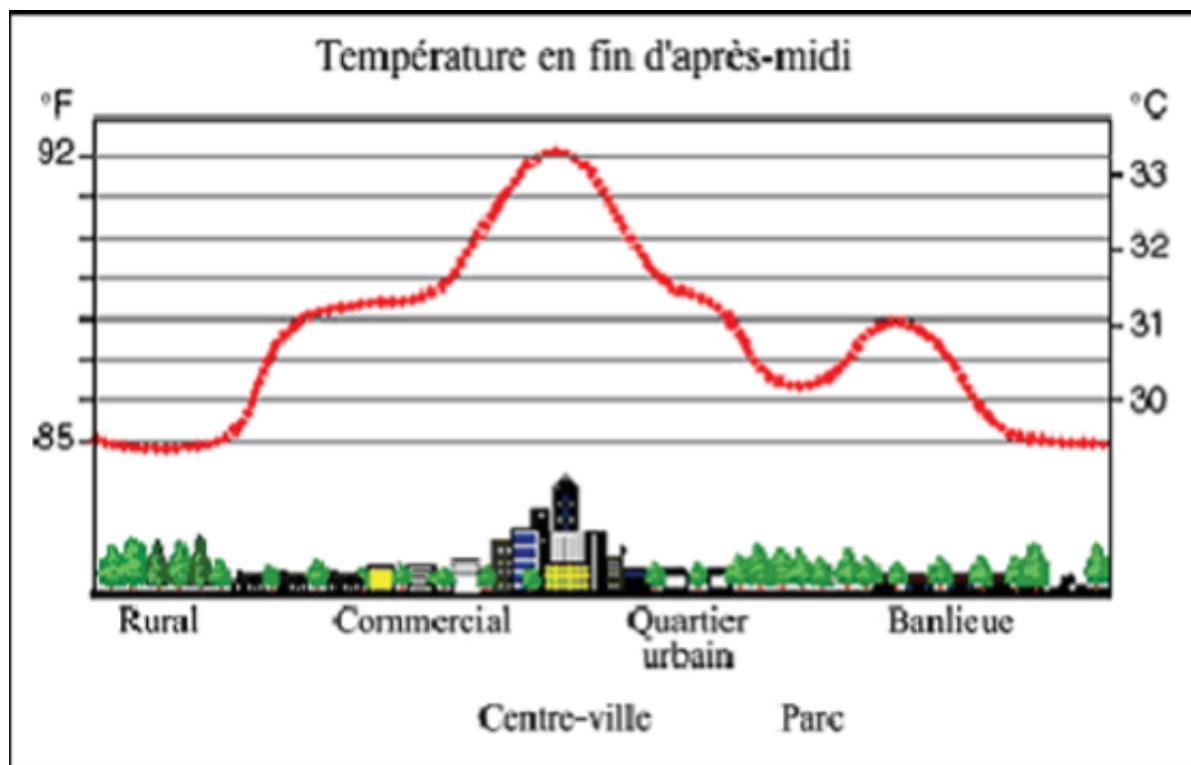


Figure 2.2: Exemple schématique du profil de température d'un ICU. Tiré de (Giguère, 2009)

En combinaison avec les changements climatiques, les conséquences de l'ICU sont susceptibles d'être amplifiées. Cependant, il n'est pas clair si les changements climatiques vont accentuer la différence de température entre le milieu urbain et rural. Par exemple, l'instabilité accrue de l'atmosphère associée à l'air plus chaud pourrait contribuer à éliminer la chaleur au sol. (Alcoforado & Andrade, 2008).

Différentes mesures de mitigation sont proposées dans la littérature afin de lutter contre l'ICU. Ces stratégies sont divisées en quatre groupes (Giguère, 2009) :

- L'ajout de végétation
- Les mesures en lien avec les infrastructures, l'architecture et l'aménagement du territoire
- Les mesures de GEP (PGO)
- La réduction de la chaleur anthropique

Selon une étude de Saito, Ishihara et Katayama (1991) citée par Chocat et al. (2008), la température des espaces végétalisés peut être de 3°C inférieure à celle des espaces environnants. Les PGO qui incluent de la végétation comme la biorétention sont donc particulièrement efficaces. L'influence sur la température qu'elles procurent est due à (1) l'évapotranspiration, qui absorbe l'énergie de l'atmosphère ainsi qu'à (2) la création d'ombre qui diminue l'énergie absorbée par radiation (Chocat et al., 2008).

2.2.3 Impacts des changements climatiques

Il est à prévoir que les changements climatiques vont avoir de nombreuses conséquences dans les années à venir, tant sur le plan socio-économique qu'environnemental. Le tableau 2.2 présente certaines de ces conséquences liées à la GEP.

2.3 Pratiques de gestion optimales

Tel que défini au chapitre 1, les PGO regroupent les techniques permettant un contrôle de l'eau pluviale soit quantitatif, soit qualitatif ou les deux. Ces pratiques peuvent être de différentes natures et incluent autant les ouvrages comme les bassins de rétention que les plans d'aménagement ou les campagnes de sensibilisation de la population. De manière générale, l'objectif des PGO est de

reproduire le plus fidèlement possible les conditions hydrologiques pré-développement (Eckart, McPhee, & Bolisetti, 2017; MDDEFP & MAMROT, 2012). L'atteinte de cet objectif nécessite plusieurs types de contrôle, qui ne se limitent plus à la réduction du débit de pointe comme c'était le cas auparavant. Cette section du chapitre traite plus en profondeur des types de contrôle, des différentes techniques utilisées ainsi que des bénéfices secondaires associés aux PGO.

Tableau 2.2: Effets anticipés des changements climatiques au Québec et conséquences sur la GEP (liste non exhaustive) (Ouranos, 2015; Ville de Montréal, 2017).

Catégorie de l'effet	Effets à prévoir	Conséquences liées à la GEP
Précipitations	<ul style="list-style-type: none"> - Intensité accrue des précipitations pour une même période de retour - Prolongement des périodes de sécheresse l'été 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la fréquence des inondations - Augmentation de la fréquence des surverses - Augmentation de la pollution dans les cours d'eau (lessivage des surfaces) - Érosion des berges accrue - Disponibilité réduite des sources d'eau souterraine
Régime hydrique	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation des débits moyens mensuels en hiver - Diminution des débits moyens mensuels en été - Formation d'embâcles et de frazil favorisés 	<ul style="list-style-type: none"> - Augmentation de la fréquence des inondations - Érosion des berges accrue

2.3.1 Types de contrôle

On distingue quatre catégories de contrôle pour la GEP: le contrôle quantitatif, le contrôle de l'érosion des cours d'eau, le contrôle qualitatif ainsi que le contrôle de l'alimentation de la nappe phréatique (Fuamba, Walliser, Daynou, Rousselle, & Rivard, 2010; MDDEFP & MAMROT, 2012) Ces contrôles sont présentés dans ce qui suit.

Contrôle quantitatif

Le contrôle quantitatif vise à éviter les inondations dans le réseau de drainage et dans les cours d'eau récepteurs en réponse aux événements de pluies rares (périodes de retour allant jusqu'à 100 ans). L'approche consiste à réduire le débit de pointe afin de ne pas excéder la capacité des éléments du réseau de drainage. Les techniques utilisées incluent le stockage de l'eau sur les toits, dans des conduites surdimensionnées ou en surface, ainsi que les bassins de rétention (contrôle en fin de réseau) en plus de certaines PGO présentées à la section 2.3.3.

Contrôle de l'érosion

L'approche pour assurer le contrôle de l'érosion consiste à réduire le débit de pointe comme pour le contrôle quantitatif « pur ». Dans ce cas-ci, c'est le potentiel d'érosion dans les cours d'eau récepteurs qui est étudié. Ce type de contrôle concerne les événements de pluie un peu moins rares que pour le contrôle de l'inondation. La période de retour considérée est de 1 à 10 ans (MDDEFP & MAMROT, 2012)

Contrôle qualitatif

Le contrôle qualitatif vise à enlever les charges en polluants de l'eau de ruissellement lors d'événement de pluie assez fréquents, avec une récurrence inférieure à un an. Les polluants qui sont visés par ce contrôle incluent les MES, les nutriments (azote et phosphore), les sels de déglacage et les métaux (Dugué, 2010).

Recharge de la nappe phréatique

Le contrôle du niveau de la nappe phréatique est effectué en favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol. Ce type de contrôle ne concerne que les quelques premiers millimètres de pluie et non la totalité des pluies importantes. La récurrence considérée est donc inférieure à un an comme pour

le contrôle qualitatif. Contrairement au contrôle quantitatif qui vise à réduire le débit de pointe, la variable d'importance est le volume total de ruissellement. Les PGO à la source avec infiltration sont adaptées (Hamel et al., 2013) pour assurer ce contrôle tel que décrit à la section 2.3.3.

Le tableau 2.3 résume les critères de conception recommandés par le MDDELCC (2017) pour ces différents contrôles :

Tableau 2.3: Critères de conception selon (MDDELCC, 2017)

Type de contrôle	Critère	Valeur
Contrôle qualitatif	Hauteur de pluie à traiter	25 mm
Contrôle de l'érosion	Débit ou temps d'évacuation de la pluie de contrôle de l'érosion	Débit calculé à partir d'un volume d'érosion. Temps d'évacuation calculé à partir de la pluie de contrôle de l'érosion
Contrôle quantitatif	Débit de pointe	Débit calculé pour les périodes de retour 10 ans et 100 ans

2.3.2 Classification

Les PGO peuvent être regroupées de différentes manières tel que présenté dans le guide de gestion des eaux pluviales (MDDEFP & MAMROT, 2012). Une de ces classifications consiste à regrouper les PGO selon leur position dans le réseau comme l'illustre la figure 2.3. Cette même figure illustre également une stratégie efficace en GEP liée à ce regroupement, qui consiste à combiner différentes PGO en série ou en parallèle afin d'atteindre les objectifs visés (Eckart et al., 2017).

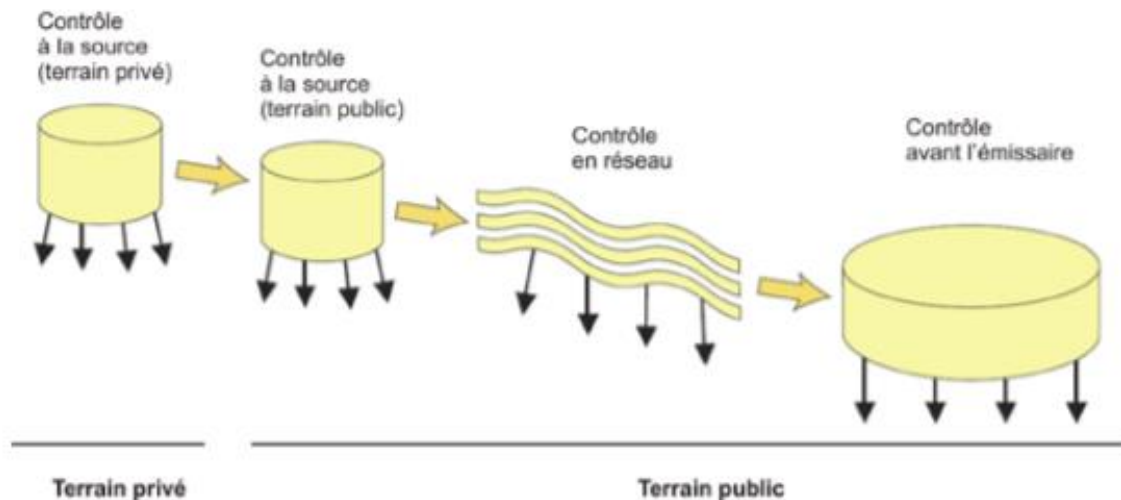


Figure 2.3: Localisations possible des PGO dans le réseau de drainage pour un contrôle en chaîne. Figure tirée de (MDDEFP & MAMROT, 2012)

2.3.3 Types de PGO

Cette section fournit quelques exemples de PGO qui peuvent être mises en œuvre. Les techniques énumérées se limitent aux pratiques structurales, sur lesquelles ce travail se concentre. Les PGO sont regroupées ici selon leur mécanisme de contrôle principal : l'infiltration ou la rétention. La première catégorie regroupe les ouvrages de contrôle permettant une recharge de la nappe et une réduction du volume total d'eau de ruissellement. Les PGO de la deuxième catégorie permettent de limiter les débits de pointe, mais ont une efficacité limitée pour réduire le volume total de ruissellement. La rétention qu'elles offrent est due à l'effet de stockage, à l'évapotranspiration (rétention permanente) ou à la collecte de l'eau de pluie pour utilisation (Fletcher, Andrieu, & Hamel, 2013). Les différentes PGO sont présentées dans ce qui suit:

PGO avec infiltration :

- Noues et fossés
- Tranchées d'infiltration
- Biorétention

- Filtre à sable
- Pavés poreux

PGO avec rétention :

- Marais et étang
- Étangs
- Toits verts

2.3.4 Biorétention

Tel que défini au chapitre 1, la biorétention désigne l'utilisation du sol et des plantes afin d'effectuer un contrôle quantitatif et qualitatif de l'eau de ruissellement. Cette technique fait partie des PGO dites « à la source » et est typiquement implantée dans les dépressions en amont des bassins versants (PGC, 2007). Les contrôles s'effectuent par le biais d'un grand nombre de processus physiques, chimiques et biologiques, comme l'infiltration, l'évapotranspiration et la décantation. La figure 2.4 illustre schématiquement une aire de biorétention typique.

Différents types de conception peuvent être envisagés selon les objectifs poursuivis et les contraintes propres aux sites. On retrouve notamment les variantes suivantes: (PGC, 2007) :

Biorétention avec infiltration

Un aménagement avec infiltration n'inclut pas de drain de fond et permet une recharge de la nappe phréatique et la filtration de l'eau. Ce type d'aménagement est adapté pour les sols perméables. (Dugué, 2010).

Biorétention sans recharge ou recharge partielle

Ce type de conception inclut un drain perforé au fond de l'aménagement qui recueille l'eau filtrée par le substrat. Le drain de fond permet d'obtenir une capacité de filtration élevée (PGC, 2007). Il est également possible d'empêcher toute recharge de la nappe en installant une

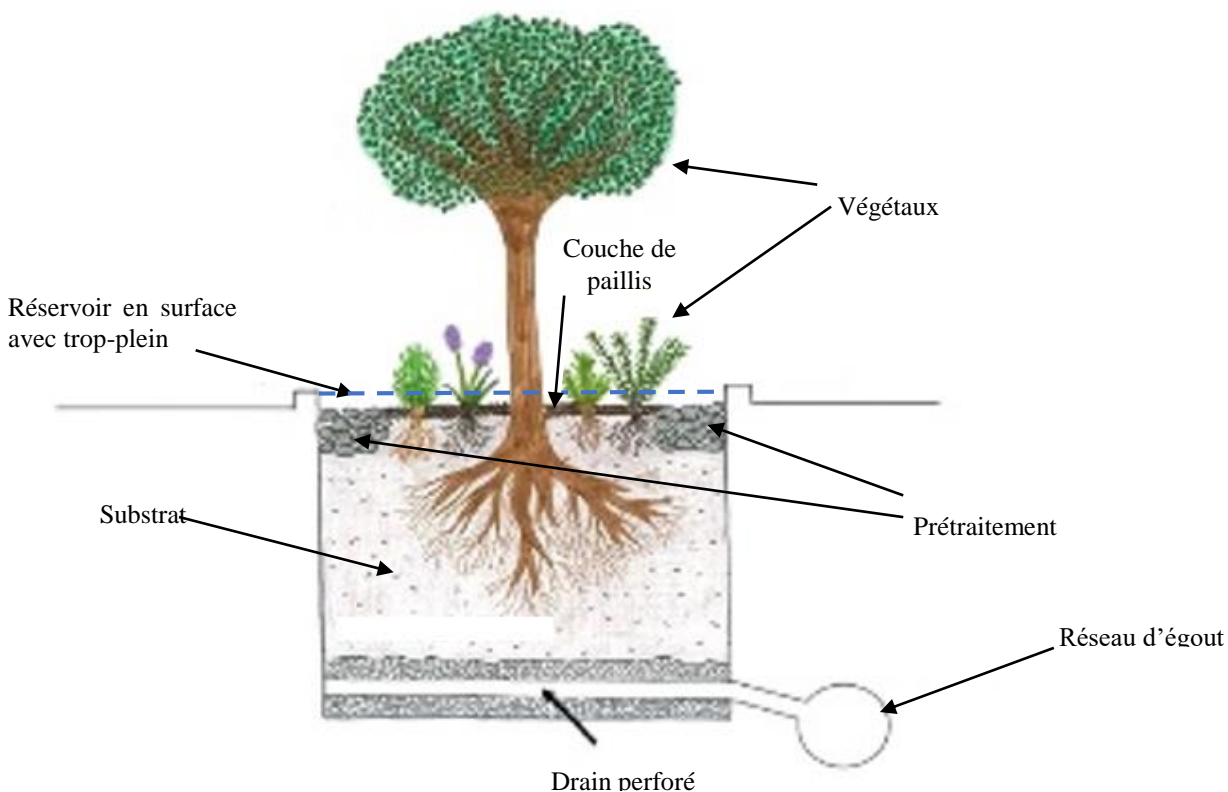


Figure 2.4: Schémas d'un système de biorétention typique. Tiré de (Kratky et al., 2017) © Springer. Adapté avec permission.

membrane imperméable au fond. Cet ajout est souhaitable lorsqu'il existe un risque de contamination de la nappe phréatique.

Biorétention avec zone anaérobie

La biorétention avec zone anaérobie comprend un drain surélevé par rapport au fond de la pierre nette. La zone du fond devient anaérobique et favorise la dénitrification (Dugué, 2010).

2.3.4.1 Lignes directrices de conception et description des composantes

De nombreux guides et études fournissent des lignes directrices pour la conception des systèmes de biorétention (Mailhot, Bolduc, Duchesne, & Villeneuve, 2008; MDDEFP & MAMROT, 2012; PGC, 2007). Il est à noter que de manière générale, les aires de biorétention sont dimensionnées

avant tout pour le contrôle de la qualité, plus spécifiquement pour traiter une pluie de qualité. Cette section du mémoire présente certains critères tirés de la littérature qui seront utilisées afin de construire les saillies fictives à modéliser. Comme ce mémoire se concentre sur l'application au contexte local, l'accent est mis sur les guides québécois et sur la conception adaptée au climat froid.

Paramètre généraux de conception

Le tableau 2.4 présente certains paramètres généraux de conception recommandés dans la littérature et certains guides. Les paramètres touchent la surface contributrice, la surface de l'ouvrage et le temps de vidange.

Prétraitement :

Le prétraitement a comme fonctions de répartir le débit d'entrée afin de minimiser l'érosion et de capter les matières en suspension et d'éviter ainsi le colmatage. Ce processus peut être réalisé en séparant les débits avec MES (ex : rues) des débits sans MES (ex : toits) ou avec une combinaison de mécanismes de prétraitement comme une bande filtrante ou une bande de gravier (MDDEFP & MAMROT, 2012).

Réservoir de surface :

Les systèmes de biorétention doivent permettre une accumulation d'eau en surface afin de favoriser l'infiltration et l'évaporation de l'eau. Une structure de trop plein est ajoutée afin de rediriger l'eau vers l'égout ou le réseau majeur, si la capacité du système est excédée. Les paramètres de conception et les valeurs recommandées sont montrés au tableau 2.5.

Substrat organique :

Le sol ou substrat organique doit permettre la croissance des plantes de l'ouvrage de biorétention. Le type et l'épaisseur de la couche de sol sont choisis selon le type de conception de l'ouvrage et selon les objectifs. Le tableau 2.6 présente certaines recommandations.

Tableau 2.4: Paramètres généraux de conception

Paramètre	Valeur recommandée	Cas	Source
Surface contributrice	≤ 0.810 ha (2 acre) ≤ 0.405 ha imperméable (1 acre)	Système avec drain de fond	(PGC, 2007)
	≤ 0.405 ha (1 acre) ≤ 0.202 ha imperméable ($\frac{1}{2}$ acre)	Système sans drain de fond	
	≤ 1 ha	Tous	(MDDEFP & MAMROT, 2012)
Surface de l'ouvrage	5 à 10 % de la surface imperméable contributrice	Tous	(MDDEFP & MAMROT, 2012)
	Calculé avec la loi de Darcy : $A = \frac{V_Q \times d_f}{i \times (h_f + d_f) \times t_f}$ A: Surface de l'ouvrage V_Q : Volume pour contrôle qualité (peut être calculé selon MDDELCC (2017)) d_f : Hauteur du substrat i : Coefficient de perméabilité h_f : Hauteur d'accumulation t_f : Temps de vidange	Contrôle qualitatif	

Tableau 2.4 : Paramètres généraux de conception (suite)

Paramètre	Valeur recommandée	Cas	Source
Temps de vidange de l'ouvrage	≤ 72 h 24 – 48 h préférable	Tous	(Mailhot et al., 2008)
	≤ 48 h	Tous	(MDDELCC, 2017) (MDDEFP & MAMROT, 2012) (PGC, 2007)

Tableau 2.5: Paramètres de conception du réservoir de surface

Paramètre	Valeur recommandée	Cas	Source
Hauteur maximale d'accumulation d'eau en surface	150 - 300 mm ($\approx 6 - 12$ po.)	Tous	(Mailhot et al., 2008) (PGC, 2007)
	150 - 225 mm	Tous	(MDDEFP & MAMROT, 2012)

Tableau 2.6: Paramètres de conception du substrat organique

Paramètre	Valeur recommandée	Cas	Source
Épaisseur de la couche de sol	≥ 600 mm	Tous	(Mailhot et al., 2008)
	≥ 750 mm	Pour le captage des polluants	
	≥ 1300 mm	Pour arbustes ou région aride	
	760 - 1220 mm (2.5 - 4 pi)	Tous	(PGC, 2007)
Taux d'infiltration à l'équilibre (ou conductivité hydraulique à saturation)	≥ 25 mm / h (1 po/ h)	Tous	(PGC, 2007)
	≤ 250 mm/h	Contrôle qualitatif	(MDDELCC, 2017)

Végétaux :

La végétation d'un aménagement de biorétention peut être composée d'arbres et de plantes. Les végétaux ont comme fonctions principales de réduire les volumes d'eau de ruissellement par évapotranspiration et de d'éliminer certains polluants. De plus, les racines et la production de matière organique associée aux plantes aident à préserver une bonne porosité du sol à long terme (Mailhot et al., 2008).

Drain de fond : Le drain de fond est mis en place lorsque l'infiltration dans le sol naturel est impossible ou non souhaitable. Ce cas peut se présenter lorsque le sol est argileux ou lorsqu'il y a un risque de contamination de la nappe phréatique par les polluants. Le drain a comme fonction

de drainer l'accumulation d'eau vers l'égout ce qui permet de régénérer la capacité d'infiltration des ouvrages entre les événements de pluie et d'éviter le gel en bloc de l'eau pour une application en climat froid.

2.3.4.2 Adaptations pour le climat climat froid

La mise en œuvre de la biorétention en climat froid amène certains défis supplémentaires. Selon (Kratky et al., 2017), les principales difficultés d'implantation liées au climat froid sont les suivantes :

- Ralentissement des processus biologiques
- Diminution de la capacité d'infiltration du sol du au gel
- Concentration élevée en polluants lors de la fonte des neiges
- Compaction du sol avec la neige
- Blocage de glace à l'entrée de l'ouvrage

Les plus récentes études montrent qu'il est possible de conserver un bon niveau de performance durant l'hiver, du moins pour ce qui est du contrôle quantitatif (Géhéniau, Fuamba, Mahaut, Gendron, & Dugué, 2015). Davantage d'études sont nécessaires pour évaluer correctement la performance qualitative (Kratky et al., 2017). Afin d'adapter la conception, les deux solutions techniques suivantes sont proposées dans la littérature et les guides (Kratky et al., 2017; Mailhot et al., 2008; MDDEFP & MAMROT, 2012).

Utilisation d'un drain afin d'évacuer l'eau avant les épisodes de gel :

L'utilisation d'un drain permet d'éviter que l'eau gèle en bloc tel que mentionné à la section 2.3.4.1. En climat froid, il est donc souhaitable d'utiliser un drain de 200 mm et d'ajouter une vanne si on souhaite favoriser l'infiltration (MDDEFP & MAMROT, 2012). De plus, la pente devrait être supérieure à 1% et le drain devrait être assez profond afin d'être protégé du gel (Mailhot et al., 2008).

Utilisation d'un substrat plus grossier :

La teneur en eau d'un sol lors d'un épisode de gel a une influence importante sur la conductivité hydraulique de ce sol une fois saturée. D'une part, si le sol est saturée d'eau lors du gel, la glace se forme en bloc et obstrue l'écoulement. D'autre part, le gel du sol en conditions non-saturées permet de conserver et même de surpasser la conductivité hydraulique du sol sans gel en raison des écoulements préférentiels (Kratky et al., 2017). Le substrat d'un ouvrage de biorétention en climat froid devrait donc être assez grossier pour assurer un drainage adéquat.

2.3.4.3 Performance

De nombreuses études se sont penchées sur la performance des ouvrages de biorétention. Le tableau 2.7 donne des exemples de résultats tirés d'études sur le terrain.

Comme on le voit dans ce tableau, des écarts importants sont observés entre les performances obtenues dans les différentes études, autant pour la réduction du débit de pointe (Q_p) que pour le volume de ruissellement (V_R). Ceci peut être expliqué par les différentes variantes de conception ainsi que d'autres facteurs comme le climat, le type de sol et le substrat utilisé.

Tableau 2.7: Performance quantitative des ouvrages de biorétention

Source	Conception	Présence de gel	Indicateur de performance	Valeur
(Ermilio & Traver, 2006)	Conception avec infiltration.	Non	V_R^1 V_R^2	80 % 52 %
(Davis, 2008)	Deux aires des biorétention en parallèle. Conception sans infiltration.	Non	V_R^2	18 %
(Hatt, Fletcher, & Deletic, 2009)	Conception avec membrane imperméable, sans infiltration.	Non	Q_p^3 V_R^3	80 % 33 %
(Muthanna, Viklander, & Thorolfsson, 2008)	Conception avec infiltration partielle. Dimensionnement basé sur (PGC, 2007).	Non Oui	Q_p^3	42 % 27 %
(Hunt, Jarrett, Smith, & Sharkey, 2006)	Conception avec infiltration partielle	Non Oui	V_R^3	93 % 46 %
(Géhéniau et al., 2015)	Conception avec infiltration partielle	Non Oui	V_R^4	59,7 % 35,0 %

1 : Réduction du volume annuel total

2 : Proportion des pluies totalement retenues

3 : Valeur moyenne calculée à partir plusieurs événements de pluie (n=44)

4 : Valeur totale pour la saison chaude (sans gel) et froide (avec gel)

2.4 Règlementation en vigueur

La Loi sur la qualité de l'environnement (LQE) constitue le cadre législatif provincial pour tout projet de GEP en milieu municipal au Québec. L'article 32 de cette loi stipule que tout projet incluant des travaux d'égout doit être soumis préalablement au ministre et avoir fait l'objet d'un certificat d'autorisation.

En 2017, la LQE a été mise à jour avec la *Loi modifiant la Loi sur la qualité de l'environnement afin de moderniser le régime d'autorisation environnementale et modifiant d'autres dispositions législatives notamment pour réformer la gouvernance*. Ces modifications, entrées en vigueur en mars 2018, visent à clarifier et simplifier le processus d'obtention du certificat d'autorisation environnemental requis pour certains travaux (MDDELCC, 2018). Un aspect important de cette mise à jour est que certaines activités peuvent maintenant être soustraites à une autorisation environnementale par « déclaration de conformité », si un ingénieur certifie que les travaux sont réalisés en conformité avec la réglementation de la LQE. Pour la GEP, le nouveau Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales (MDDELCC, 2017) fournit les exigences à remplir afin de soustraire tous travaux d'installation ou de prolongement d'un réseau d'égout pluvial à un certificat d'autorisation ministérielle. Ce manuel constitue une référence importante pour ce travail puisqu'il cadre les choix de modélisation et de scénarios à étudier.

2.5 Conclusions

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de cette revue de littérature :

- La biorétention peut être envisagée pour le contrôle de la qualité, la réduction du débit de pointe et la réduction du volume d'eau de ruissellement total.
- La méthode générale de conception des différents guides consiste à (1) déterminer le volume d'eau à traiter ou à contenir et (2) effectuer le dimensionnement selon ce volume et les critères de conception présentés à la section 2.3.4.1. On peut constater que cette approche ne tient pas compte du choix des végétaux et de certaines caractéristiques du

substrat comme la capacité au champ, qui sont deux paramètres influençant grandement l'évapotranspiration et donc la réduction de volume d'eau.

- La biorétention peut fonctionner efficacement en période hivernale avec certaines adaptations, bien que la performance soit réduite.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie générale développée pour atteindre les objectifs de ce mémoire. Seules les grandes étapes sont élaborées dans ce chapitre, les détails étant précisés dans les chapitres 4 et 5.

3.1 Objectif spécifique no. 1

Dans un premier temps, un inventaire des données existantes est effectué afin de déterminer les besoins en données terrain. Cette étape permet par la suite d'établir une méthode de collecte de données et ainsi de réaliser l'objectif spécifique no. 1.

La collecte des données terrains est effectuée dans la zone d'étude modélisée, afin de calibrer et de valider le modèle numérique. Il est donc nécessaire de récolter des données de pluie, de débits et de température minimalement. Cette étape est traitée plus en profondeur dans le chapitre 4.

3.2 Objectif spécifique no. 2

Dans ce travail, le logiciel PCSWMM est utilisé pour la construction du modèle hydraulique tandis que le logiciel ENVI-met permet la construction du modèle microclimatique. L'estimation initiale des paramètres est effectuée afin d'obtenir un modèle initial réaliste. Cette estimation s'appuie sur les données disponibles et les informations tirées de la littérature. Cette étape est préalable à la calibration du modèle hydraulique, puisqu'elle permet de restreindre le processus à calibration à des valeurs réalistes.

Préalablement à la calibration du modèle hydraulique, une analyse de sensibilité est réalisée. Cela permet de choisir des paramètres de calibration qui influencent suffisamment l'hydrogramme à l'exutoire, sur lequel se base la calibration.

Les paramètres du modèle hydraulique sont par la suite ajustés afin de minimiser les écarts entre les débits mesurés et les débits observés, ce qui constitue la calibration. Cette étape complète l'atteinte de l'objectif spécifique no. 2 et est détaillée dans le chapitre 5.

3.3 Objectif spécifique no. 3

Les scénarios d'étude sont établis en ajoutant des saillies de trottoir fictives au modèle calibré. Les paramètres de conception sont d'abord choisis pour représenter les aménagements réels prévus, puis sont modifiés selon les valeurs possibles tirées de la littérature. Certains ajustements pour tenir compte des conditions futures avec changement climatique sont également intégrés aux scénarios d'étude. Cette étape est traitée plus en détails au chapitre 5.

La simulation des scénarios d'études permet d'évaluer les performances des saillies de trottoir dans différentes conditions, d'un point de vue théorique. Leur effet sur le débit de pointe et sur la réduction du volume d'eau ruisselé à l'exutoire du bassin versant ainsi qu'à certains points intermédiaires du réseau est étudié de même que la performance des saillies individuelles. Pour le modèle climatique, la réduction de la température est étudiée de manière théorique, en comparant les résultats aux données de température récoltées pour une journée choisie. Par la suite, les aménagements les plus performants sont déterminés en fonction des résultats, ce qui permet de finaliser l'atteinte de l'objectif spécifique 3.

3.4 Objectif spécifique no. 4

Pour conclure ce travail, des recommandations sont émises suite à la réalisation des étapes de la méthodologie. Ces recommandations sont présentées au chapitre 7.

3.5 Résumé des étapes

Cette section résume la séquence des différentes étapes requise pour atteindre les 4 objectifs spécifiques. On peut regrouper les activités en quatre étapes :

1. Collecte des données terrains, des données existantes et élaboration revue de la littérature
2. Construction des modèles numérique
3. Évaluation de la performance des saillies
4. Recommandations

Ces étapes sont présentées plus en détails dans le schéma méthodologique de la figure 3.1.

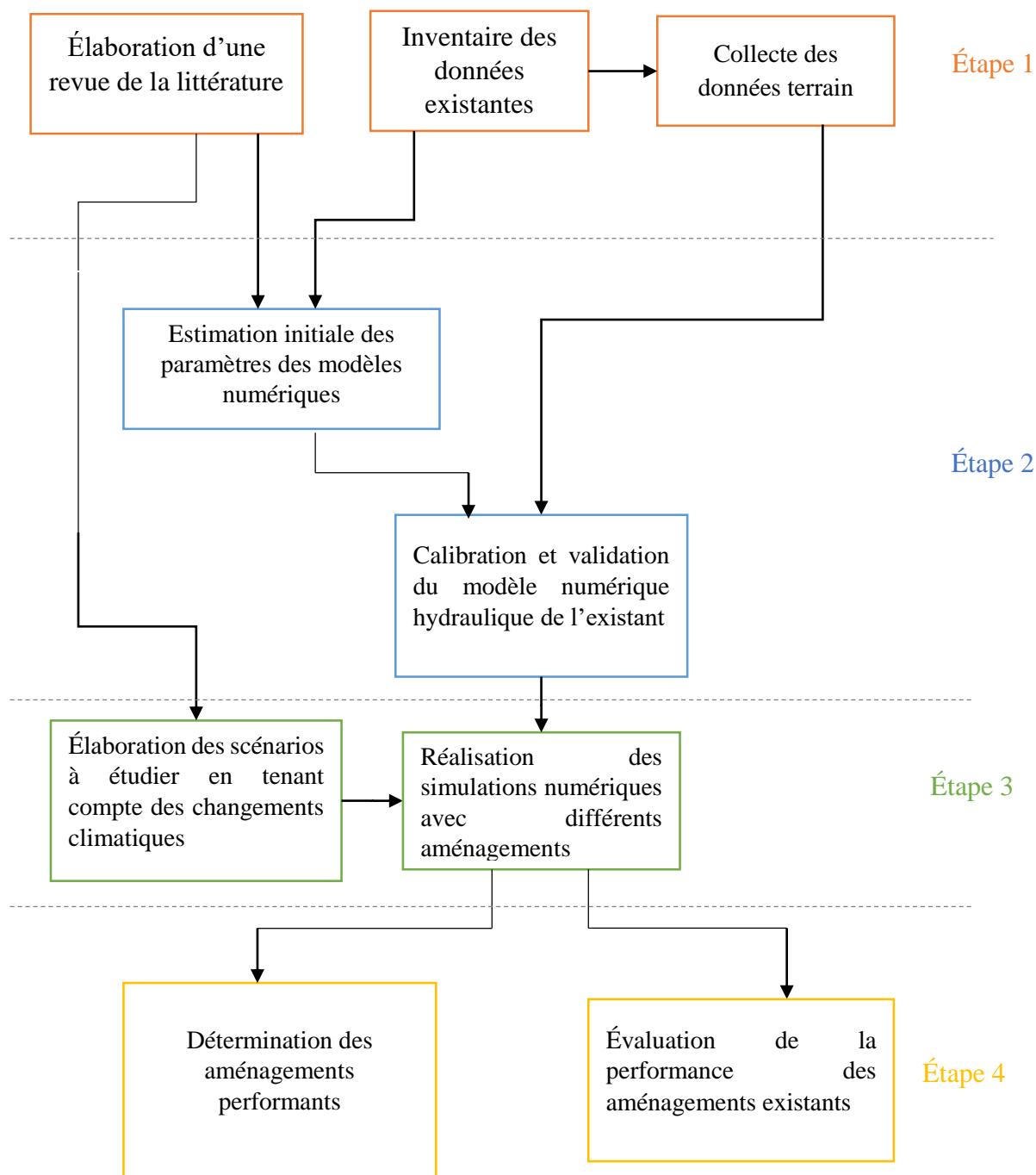


Figure 3.1 : Schéma méthodologique

CHAPITRE 4 CAMPAGNE DE MESURES

Dans le but d'étudier un cas réel, une campagne de mesures a été menée dans un secteur de la grande région de Montréal. Ce chapitre se rapporte donc à l'objectif spécifique no. 1.

La campagne de mesure s'est étalée de l'été 2017 jusqu'à l'été 2018 et s'est déroulé en deux phases, dans lesquelles des données hydrauliques, pluviométriques et climatiques ont été récoltées. Le tableau 4.1 présente les types de données recueillies lors de chacune des deux phases.

Tableau 4.1: Types de données récoltées lors des deux phases de la campagne de mesures

Phase	Type de données récoltées	Période
Phase 1	Données hydrauliques <ul style="list-style-type: none"> • Hauteurs d'eau • Vitesses d'écoulement Données pluviométriques <ul style="list-style-type: none"> • Hauteur de pluie Données climatiques <ul style="list-style-type: none"> • Température • Humidité relative 	Juillet à décembre 2017
Phase 2	Données hydrauliques <ul style="list-style-type: none"> • Hauteurs d'eau • Vitesses d'écoulement Données pluviométriques <ul style="list-style-type: none"> • Hauteur de pluie 	Mai à juin 2018

Les données ont été récoltées dans le but de calibrer et de valider les modèles numériques et également afin d'obtenir une estimation de l'incertitude associée aux données utilisées dans la modélisation. La suite de ce chapitre présente les zones d'étude, les instruments et les méthodes employées pour la collecte de données ainsi que les données obtenues. Bien que ce chapitre traite des deux phases de la campagne de mesures, l'accent est mis sur la phase 2 étant donné que seule la zone d'étude de cette phase a pu être modélisée pour les raisons énumérées au chapitre 5. Les informations de ce chapitre se rapportent donc à la phase 2 de la campagne de mesure lorsque non spécifié.

4.1 Zones d'étude

Les données climatiques ainsi que les données hydrauliques des phases 1 et 2 ont été récoltées dans trois zones d'étude distinctes afin d'étudier la performance des saillies de trottoir à différentes échelles. La figure 4.1 illustre les trois zones d'étude et le tableau 4.2 présente les caractéristiques générales du secteur englobant les trois zones d'étude.

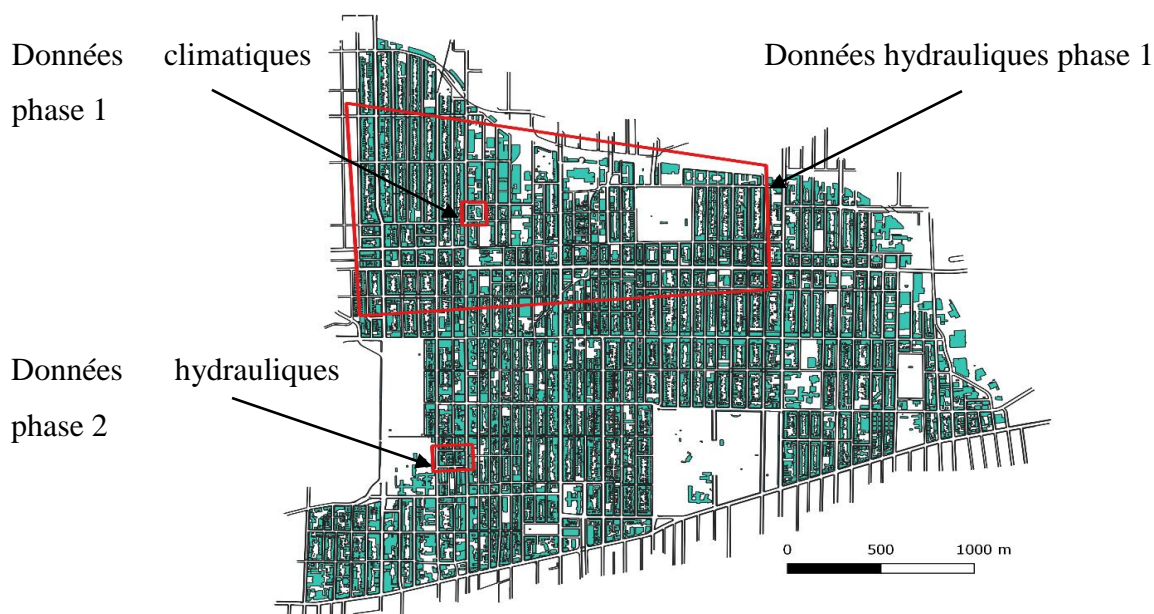


Figure 4.1: Zones d'étude pour la collecte de données climatiques et hydrauliques phases 1 et 2

Tableau 4.2 : Caractéristiques générales du secteur d'étude

Caractéristique	Description
Utilisation du sol	Zones résidentielles et commerciales à densité élevée
Type de réseau d'égout	Combiné
Drainage des toits	Gouttières branchées directement à l'égout
Nature du sol	Sol naturel argileux

Les deux zones d'étude pour la collecte des données hydrauliques ont été choisies en raison du fort pourcentage de surface imperméable combiné à la présence d'un réseau d'égout unitaire. En plus du grand débit de pointe généré par les surfaces imperméables, la combinaison de celles-ci avec la présence d'un égout unitaire contribue à augmenter le volume d'eau à traiter à l'usine d'épuration.

Plus spécifiquement, la phase 1 de la collecte des données hydrauliques a été effectuée dans un bassin versant urbain de la grande région de Montréal. La zone d'étude inclut certaines saillies de trottoir végétalisés existantes et d'autres qui sont planifiées. Le bassin versant sélectionné se prête bien à l'étude puisqu'il contient peu d'apport en eau provenant des conduites en amont, ce qui permet de minimiser les incertitudes associées à des apports inconnus. La phase 2 de la campagne de mesures s'est déroulée dans un secteur plus restreint situé à environ 1,5 km du premier, dont les limites coïncident avec celles d'un bassin versant comme dans le cas précédent. La zone d'étude de la phase 2 a été choisie afin de mesurer l'effet d'un projet de verdissement des rues incluant des saillies de trottoir avec rétention des eaux pluviales. La figure 4.2 et la figure 4.3 illustrent les deux zones d'étude pour la collecte des données hydrauliques avec la position des sondes débitmétriques et le tableau 4.3 présente leurs caractéristiques.

La collecte des données climatiques a été effectuée dans un sous-secteur de la zone d'étude, qui a été choisie dans le but d'étudier les écarts de température entre les différentes intersections et de

valider la modélisation numérique. Ce sous-secteur comporte une intersection problématique avec peu d'ombre et un pourcentage élevé de surfaces imperméables ce qui accroît l'effet d'îlot de chaleur urbain. La zone contient une saillie végétalisée existante ainsi qu'une autre planifiée, ce qui devait permettre de comparer les données avant et après la construction. Quatre intersections possédant des caractéristiques variées (végétation, % de surface à l'ombre, etc.) sont comprises dans le sous-secteur, ce qui assure un certain écart entre leur température. Elles contiennent également des zones ombragées, ce qui permet de minimiser l'influence du rayonnement solaire sur les mesures. De plus, la taille restreinte de la zone d'étude facilite une modélisation microclimatique, qui serait trop coûteuse en calculs avec une zone de taille importante. Par exemple, il n'aurait pas été possible de prendre la même zone d'étude pour la modélisation hydraulique et microclimatique. La zone d'étude et les points de mesures sont présentés à la figure 4.4.

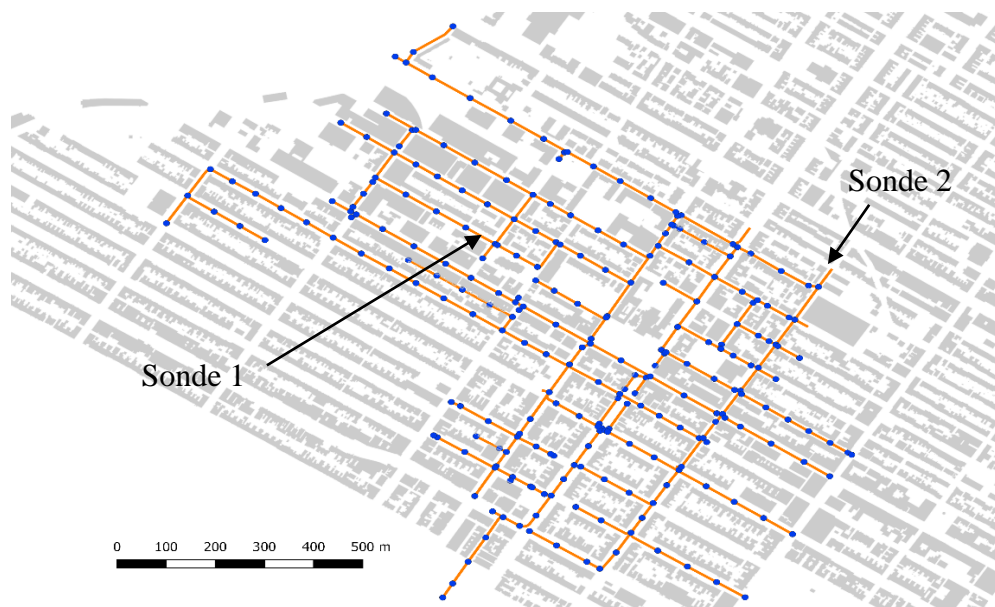


Figure 4.2 : Schémas du réseau d'égout et localisation des débitmètres – Phase 1

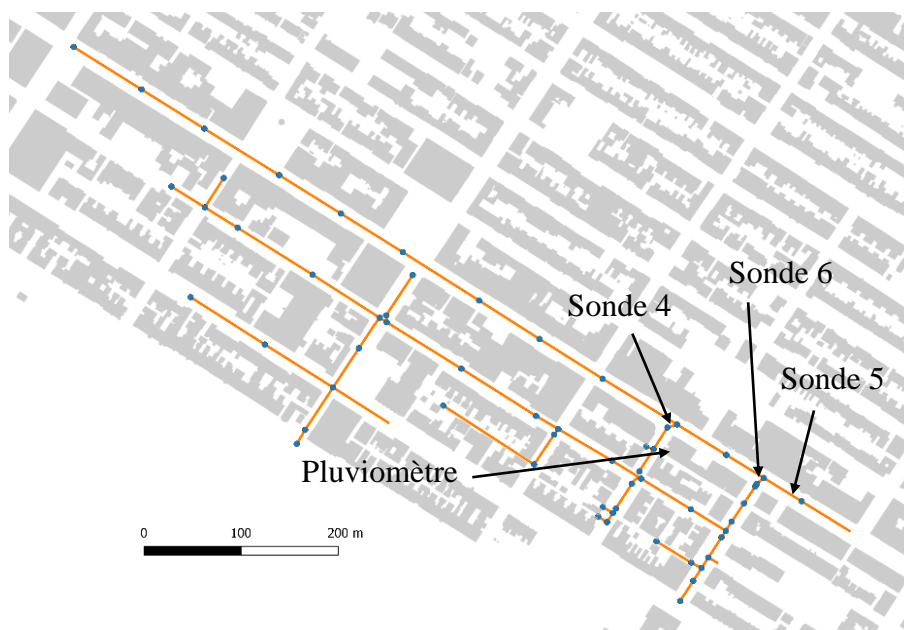


Figure 4.3 : Schémas du réseau d'égout et localisation des débitmètres et du pluviomètre – Phase

2

Tableau 4.3: Caractéristiques des zones d'étude propres aux phases 1 et 2

Caractéristique	Zone 1	Zone 2
Superficie	78 ha	13,94 ha
Superficie imperméable	70 ha	Avant verdissement : 12,46 ha Après verdissement (prévue) : 12,38 ha
Profondeur du roc	N/D	1,5 - 2 m
Profondeur de la nappe	N/D	Aucune nappe détectée lors de forages

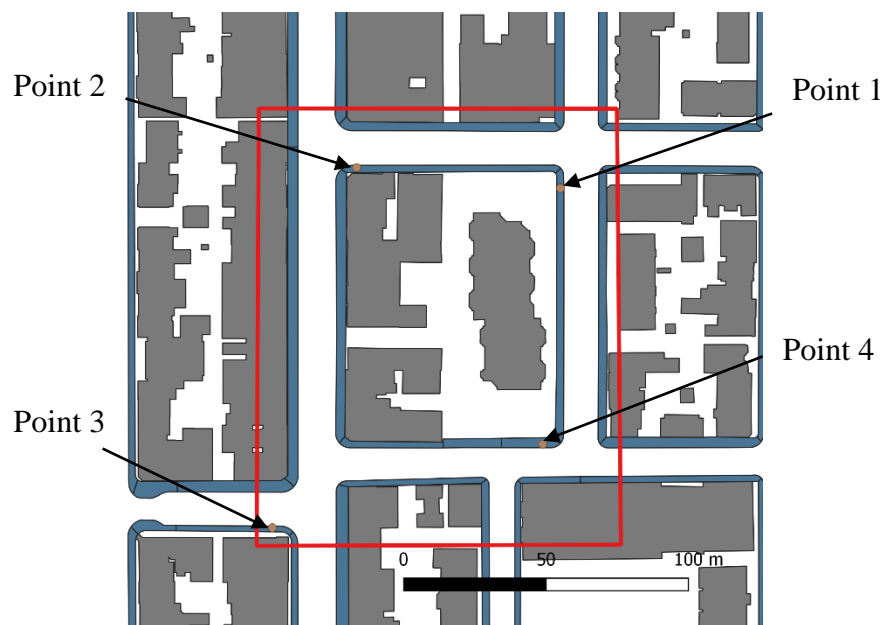


Figure 4.4: Localisation des points de mesures de température et d'humidité relative

4.2 Matériel et acquisition des données

Trois débitmètres modèle ISCO 2150, illustrés à la figure 4.5 ont été utilisés afin de mesurer et d'enregistrer les données hydrauliques. Ces débitmètres sont constitués d'une sonde débitmétrique, qui mesure la vitesse d'écoulement par effet doppler et la hauteur d'eau à partir de la pression hydrostatique ainsi que d'un module pour l'enregistrement des données. L'incertitude des appareils de mesures selon les spécifications du fabricant est de $\pm 0,003$ m pour la hauteur et de $\pm 0,03$ m/s pour la vitesse. Les deux grandeurs mesurées sont par la suite utilisées avec les données géométriques de la conduite afin de calculer le débit.

Les données pluviométriques ont été récoltées à l'aide d'un pluviomètre ISCO 674 installé dans la zone d'étude, tel que montré à la figure 4.7. Il s'agit d'un pluviomètre à augets basculants, qui permet de mesurer les hauteurs de précipitation par tranches de 0,1 mm. L'incertitude sur la mesure spécifiée par le fabricant est de $(-9\%, +3,5\%)$ pour une intensité inférieure à 130 mm/h. Les données ont été enregistrées à intervalle de 1 minute sur toute la durée de la phase 2.

Les données climatiques de température et d'humidité ont été recueillies par 4 data-logger modèle OM-92, tel qu'illustré à la figure 4.6. L'incertitude spécifiée par le fabricant est de $\pm 0,3^\circ\text{C}$ en moyenne pour la température et de $\pm 2\%$ en moyenne à 25°C pour l'humidité relative. Les

instruments de mesures n'ont pas pu être calibrés puisqu'aucun instrument de fiabilité supérieure n'était disponible. Cependant, les data-logger utilisés étaient neufs et ont été préalablement calibrés en usine ce qui justifie leur utilisation.



Figure 4.5: Débitmètre ISCO 2150



Figure 4.6: Data logger OM-92



Figure 4.7: Pluviomètre ISCO 674

4.2.1 Tests préliminaires sur les débitmètres

Pour chacune des deux phases, des tests en laboratoire ont été menés afin de valider l'exactitude des appareils de mesures ainsi que pour établir des courbes de calibrations de hauteurs et de vitesses pour chaque sonde débitométrique utilisée. Pour la calibration des sondes, deux canaux d'essai différents ont été utilisés pour les phases 1 et 2. Le canal d'essai de la phase 1 possède une pente variable ainsi qu'une ouverture ajustable en aval, ce qui permet de faire varier la hauteur et la vitesse de l'écoulement. Le canal d'essai de la phase 2 possède également une pente variable ainsi qu'une ouverture ajustable. De plus, il est équipé d'un débitmètre électromagnétique EUROMAG MUT1100J. Ce débitmètre permet d'obtenir des débits de référence, à partir desquels les vitesses de référence sont calculées. L'incertitude sur la mesure spécifiée par le fabricant est de $\pm 0,2\%$. La suite de cette section résume les tests réalisés en laboratoire.

4.2.1.1 Courbes de calibration

Lors des phases 1 et 2, des tests ont été menés dans les deux canaux d'essai de Polytechnique afin de construire les courbes de calibration pour la hauteur et la vitesse. La procédure suivie consiste d'abord à fixer la sonde dans le canal, puis à effectuer une mise à zéro. Par la suite, la pente ainsi que l'ouverture du canal sont modifiées afin d'enregistrer des mesures de hauteurs et de vitesses variées et de les comparer aux mesures de référence. Les hauteurs de référence ont été recueillies

avec une règle tandis que les vitesses de référence l'ont été avec un moulinet lors de la phase 1 et à l'aide du débitmètre du canal pour la phase 2. La figure 4.8 illustre un schéma du montage utilisé.

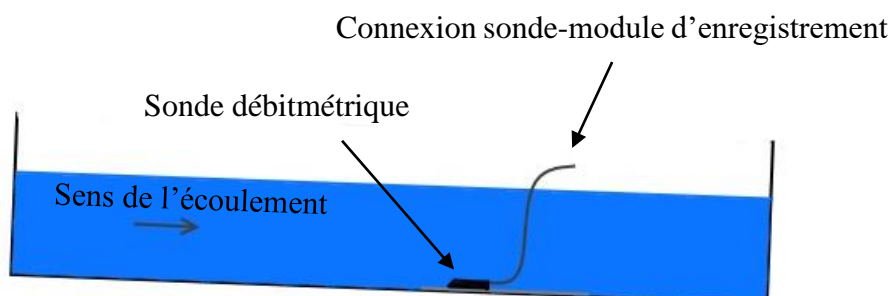


Figure 4.8: Schémas du montage dans le canal d'essai pour la calibration

Bien qu'elle ait permis d'améliorer l'exactitude des données recueillies, cette procédure comporte tout de même plusieurs limites importantes. D'abord, les propriétés du canal ainsi que celles de l'eau diffèrent des propriétés de la conduite et du fluide dans l'égout unitaire, fortement chargé en sédiments. La calibration dans la conduite pourrait donc être différente d'une calibration réalisée dans le canal. De plus, les deux canaux du laboratoire ne permettent pas de mesurer des vitesses et des hauteurs aussi élevées que dans les conduites. Notamment, les vitesses maximales mesurées du canal no. 1 sont limitées à environ 2 m/s tandis qu'elles sont limitées à 0,5 m/s dans le canal no.2. Au-delà de ces vitesses, la turbulence devient importante et les mesures deviennent difficiles et imprécises. Finalement, le canal no. 1 ne possède aucun débitmètre ce qui fait que les vitesses de références ont dues être mesurées avec un moulinet qui n'a pas pu être calibré, ajoutant une source d'erreur. Malgré ces importantes limites, il n'y a pas d'autres options facilement réalisables d'un point de vue pratique ce qui justifie la méthode employée.

Cela dit, les données obtenues ont permis d'établir des relations linéaires entre les mesures recueillies et les mesures de références. Pour les hauteurs, les courbes de calibration ont été centrées autour de la hauteur de mise à zéro (h_0). Lors de la phase 2, seule la sonde 6 a nécessité une courbe de calibration puisque les tests n'ont montré presque aucune différence entre les mesures de référence et les mesures des sondes pour deux des trois sondes. La courbe de calibration

obtenue est présentée à la figure 4.9. Pour ce qui est des vitesses, il a été nécessaire de construire des courbes de calibration pour toutes les sondes, courbes qui sont présentés à la figure 4.10.

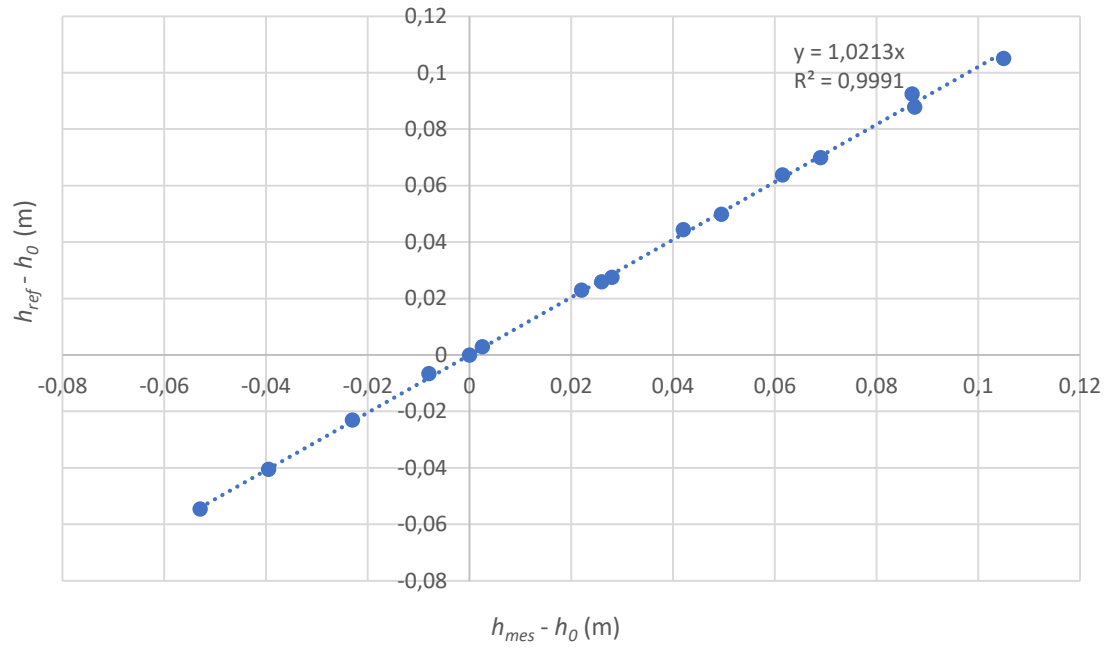


Figure 4.9: Courbes de calibration de la hauteur pour la sonde 4. h_{ref} : hauteur mesurée avec une règle; h_{mes} : hauteur mesurée avec la sonde débitmétrique; h_0 : hauteur de mise à zéro ($h_0 = 0,215 \text{ m}$)

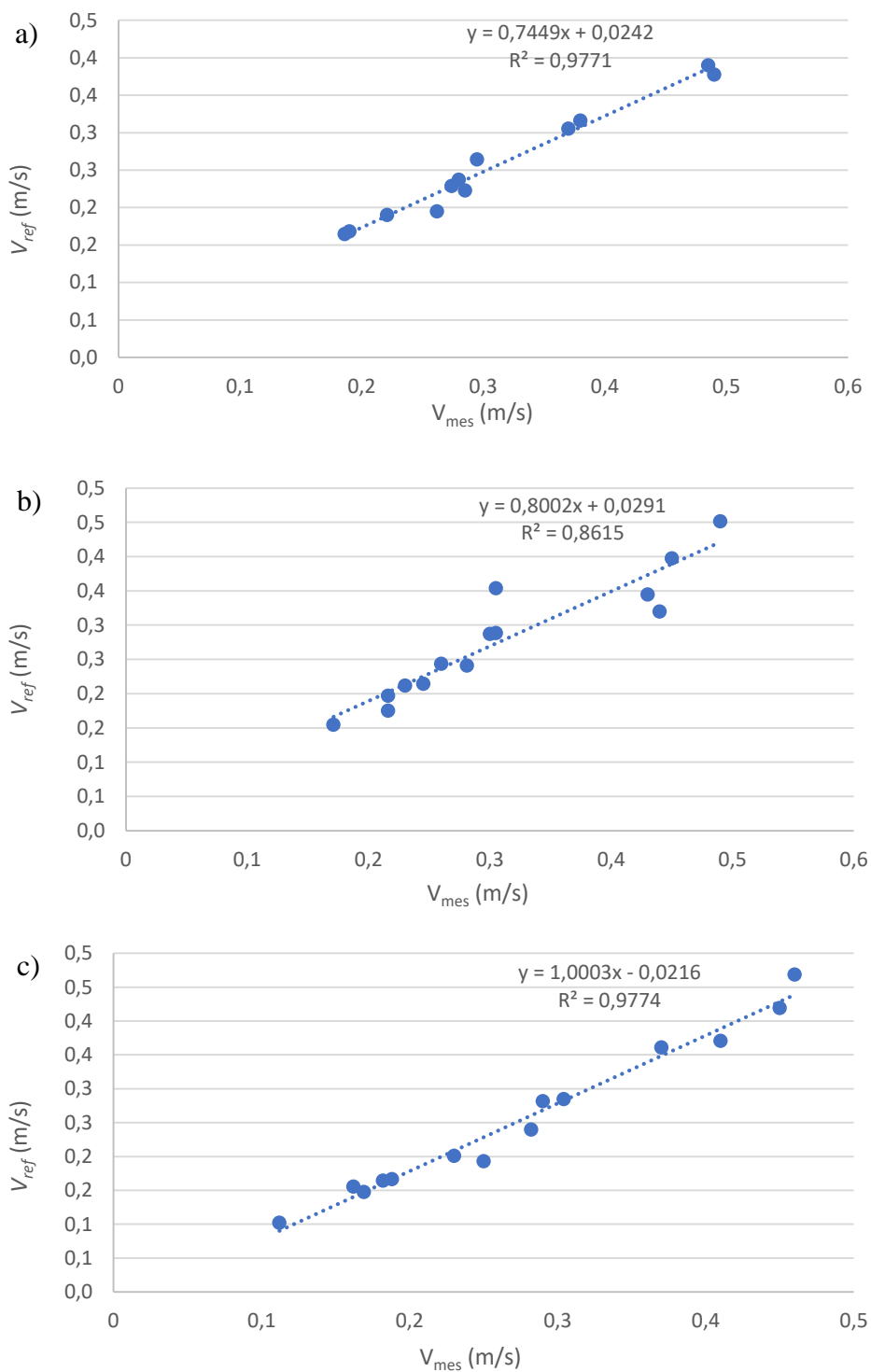


Figure 4.10 : Courbes de calibration des vitesses (V) pour les sondes 4 en a), 5 en b) et 6 en c).

V_{ref} : vitesse de référence du canal ; V_{mes} : vitesses mesurées avec la sonde débitmétrique

4.2.1.2 Test de dérive instrumentale

Préalablement à la phase 2, les sondes débitométriques ont été installées dans un bac d'eau statique afin de détecter une éventuelle dérive instrumentale dans le temps. Cette procédure origine du fait que les mêmes sondes débitométriques ont montré des signes de dérive importante à la suite de tests réalisés après la collecte de données de la phase 1. Cette dérive est une des raisons pour lesquelles la suite de ce mémoire se concentre sur la phase 2.

Pour ce test, les sondes ont d'abord été nettoyées afin d'éliminer l'influence de particules ou de saletés sur les mesures. Les sondes ont par la suite été mises à zéro dans un bac d'eau statique à environ 15 cm et ont été laissées sur place pendant 13 jours. Durant cette période, la hauteur d'eau a été augmentée pendant quelques jours, puis diminuée, pour finalement être remise à 15 cm au bout des 13 jours. Des mesures de hauteurs ont été prises quotidiennement avec toutes les sondes disponibles et comparées aux mesures de références, prises avec une règle.

Les résultats de ce test ne permettent pas de détecter quelque décalage dans le temps que ce soit. Avec les trois sondes, l'erreur de mesure demeure inférieure à 2 mm pour toutes les hauteurs testées sur 13 jours, qui varient entre 40 et 190 mm. Le tableau 4.4 montre un résumé des hauteurs obtenues.

Tableau 4.4 : Résultats du test dans le bac d'eau sur les sondes débitométriques

	Erreur moyenne	Erreur maximale (valeur absolue)
Sonde 4	0,14 mm	1 mm
Sonde 5	0,93 mm	2 mm (jour 11)
Sonde 6	0,39 mm	1 mm

En conclusion, le nettoyage des sondes a permis à notre avis de rétablir l'exactitude des mesures, qui semblait inadéquate à la suite de la phase 1.

4.2.2 Collecte des données pluviométriques

Les données pluviométriques ont été récoltées à intervalle de 1 minute durant la totalité de la campagne de mesures de la phase 2. Le pluviomètre a été installé sur un toit tel qu'illustré à la figure 4.11.

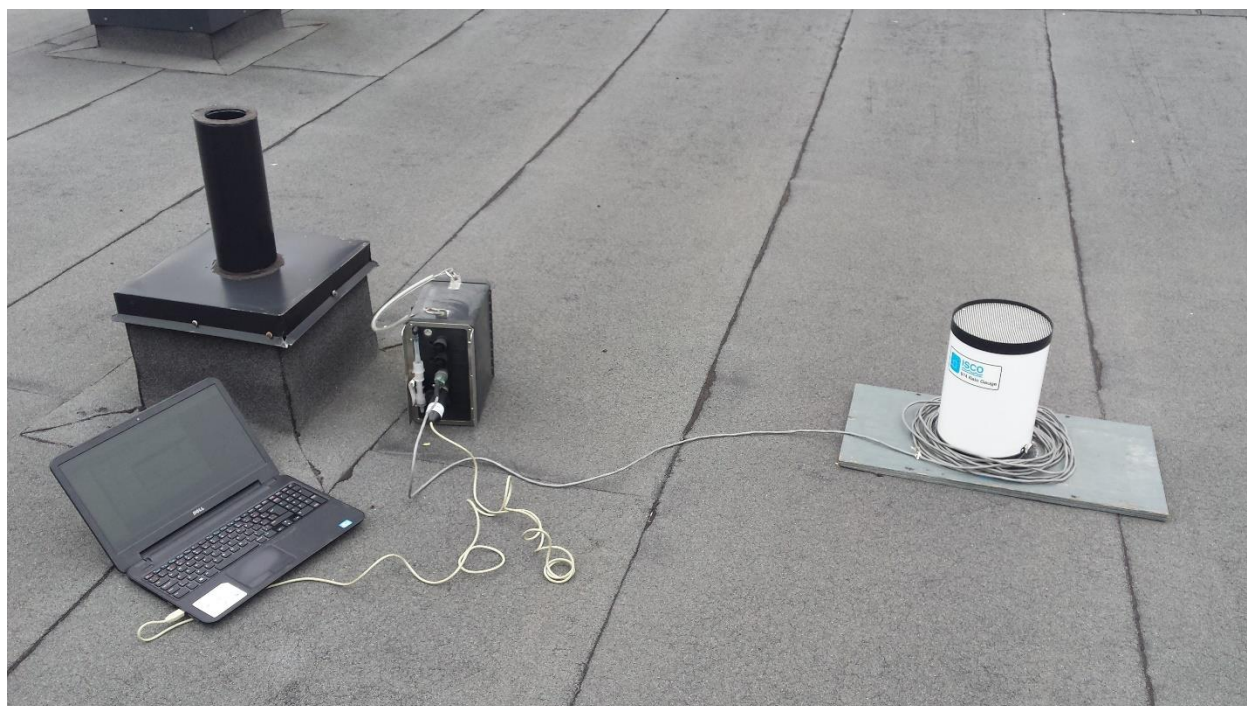


Figure 4.11: Installation du pluviomètre sur un toit dans la zone d'étude de la phase 2

4.2.3 Collecte des données hydrauliques

Au total, trois débitmètres ont été installés lors de la phase 1 et trois lors de la phase 2. Les mesures ont été recueillies à intervalle de 1 minute durant la phase 2. Un intervalle court a été choisi pour la zone d'étude qui, étant de faible superficie, génère un débit de pointe rapidement ce qui nécessite un hydrogramme plus détaillé.

L'emplacement des débitmètres a été choisi selon les objectifs de la campagne de mesure, c'est-à-dire dans le but de calibrer et de valider le modèle numérique. Les conduites importantes ont été privilégiées puisqu'elles permettent d'obtenir de l'information sur une plus grande partie du bassin. Sur le plan pratique, les regards choisis pour l'installation devaient répondre aux conditions suivantes :

- Facilité générale d'accès
- Nuisance minimale à la circulation lors des accès
- Niveau d'eau de base assez bas pour l'installation
- Échelons du regard en bon état pour la descente

Lors de l'installation, les sondes débitmétriques ont été mises à zéro sur le site tel qu'indiqué dans le manuel d'instruction, à l'aide d'un ruban à mesurer. Les caractéristiques des conduites choisies sont présentées au tableau 4.5. La figure 4.12 illustre un schéma de l'installation tandis que la figure 4.13 et la figure 4.14 montrent des photos prises sur le terrain.

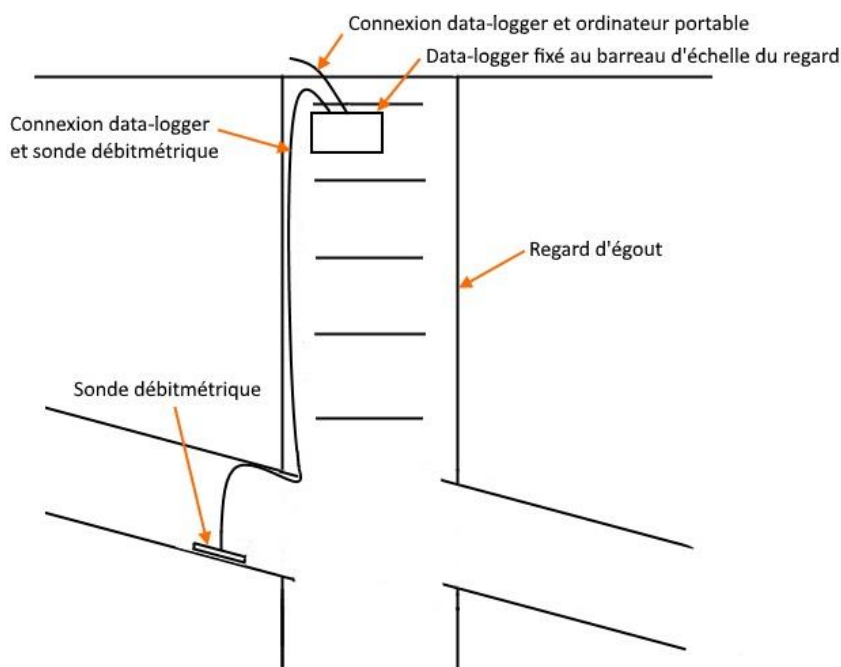


Figure 4.12: Schémas de l'installation des débitmètres

Tableau 4.5: Propriétés des conduites monitorées

	Forme	Dimensions	Matériau	Pente
Conduite 1 (phase 1)	Circulaire	1080 mm (42 po)	Brique	2, 1%
Conduite 2 (phase 1)	Ovoïde	610 x 915 mm (24 x 36 po)	Brique	0,8 %
Conduite 3 (phase 1)	Circulaire	1524 mm (60 po)	Brique	0,1 %
Conduite 4 (phase 2)	Circulaire	762 mm (30 po)	Béton armé	2,6 %
Conduite 5 (phase 2)	Circulaire	762 mm (30 po)	Béton armé	1,9 %
Conduite 6 (phase 2)	Circulaire	762 mm (30 po)	Béton armé	1,0 %



Figure 4.13: Regard d'accès pour l'installation des sondes débitmétriques (crédit photo : Daniel Kelvin Fezeu Nzeutcho et Inotes Simeon)



Figure 4.14: Collecte des données de débits

4.2.4 Collecte des données climatiques

Les données climatiques ont été recueillies à intervalle de 30 secondes de 10h00 à 17h00 approximativement durant quatre journées soit le 21 août et les 18, 24 et 26 septembre 2017. Les data-logger utilisées pour la collecte des données climatiques ont été fixés à deux montage mobiles tel que proposé par (Acero & Herranz-Pascual, 2015) afin de faciliter les déplacements. Chaque montage était constitué des éléments suivants :

- Deux data logger
- Un bouclier à radiation modèle Davis 7714
- Un chariot de magasinage

Les data logger ont été installés à 1,5 m de hauteur afin de représenter la température affectant un piéton. Deux instruments de mesure par montage ont été employés dans le but de vérifier l'exactitude des données et d'offrir une protection contre un éventuel mal fonctionnement de l'un des deux data-logger. Le bouclier passif à radiations a été ajouté au montage afin de protéger les mesures de l'influence du rayonnement solaire incident ou réfléchi. Il faut souligner que malgré l'utilisation d'un bouclier solaire, les mesures n'ont pas été récoltées en plein soleil puisque le bouclier utilisé n'offre pas une protection suffisante pour une telle utilisation. La figure 4.15 illustre le montage construit.

Les deux montages mobiles ont permis de récolter les données deux sites à la fois sur un total de quatre. Tous les sites étaient situés à une intersection différente, à l'ombre comme mentionné précédemment et à bonne distance ($>\approx 2$ m) des sources de chaleur anthropiques (voitures, systèmes de climatisation) autant que possible. Certaines caractéristiques des quatre points de mesures sont présentées dans ce qui suit :

- Site 1 : Ce point de mesure est situé à l'ombre, procuré par plusieurs arbres matures. Une saillie de trottoir est planifiée pour 2018.
- Site 2 : Le site 2 inclut une saillie de trottoir avec un jeune arbre. Les bâtiments à proximité ne procurent que peu d'ombre dans la rue et sur les trottoirs.
- Site 3 : Le site 3 inclut des bâtiments qui procurent davantage d'ombre qu'au point 2.

- Site 4 : Le site 4 est similaire au site 1 et inclut des arbres matures.



Figure 4.15: Montage utilisé pour la prise de mesures de données climatiques

Pour les fins de l'étude, les journées sélectionnées pour la prise de mesures devaient inclure certaines conditions météorologiques particulières. La température devait atteindre une valeur élevée ($>25^{\circ}\text{C}$) puisque les conséquences négatives de l'ICU sont plus importantes lors des journées chaudes. Il fallait également des journées avec le moins de vent et de nuages possibles pour faciliter la modélisation numérique. Notamment, le modèle numérique utilisé ne prend pas en compte les variations temporelles et spatiales de ces deux paramètres aux frontières.

4.3 Validation des données

Cette section présente la validation des données recueillies. Seuls quelques exemples sont détaillés ici car la présentation de toutes les données aurait été trop volumineuse pour être incluse dans ce mémoire.

4.3.1 Données pluviométriques

Afin de valider les données pluviométriques recueillies, celles-ci sont comparées aux données d'Environnement Canada, récoltées à environ 1,3 km de la zone d'étude. La figure 4.16 illustre les volumes cumulés par jour pour le mois de juin 2018.

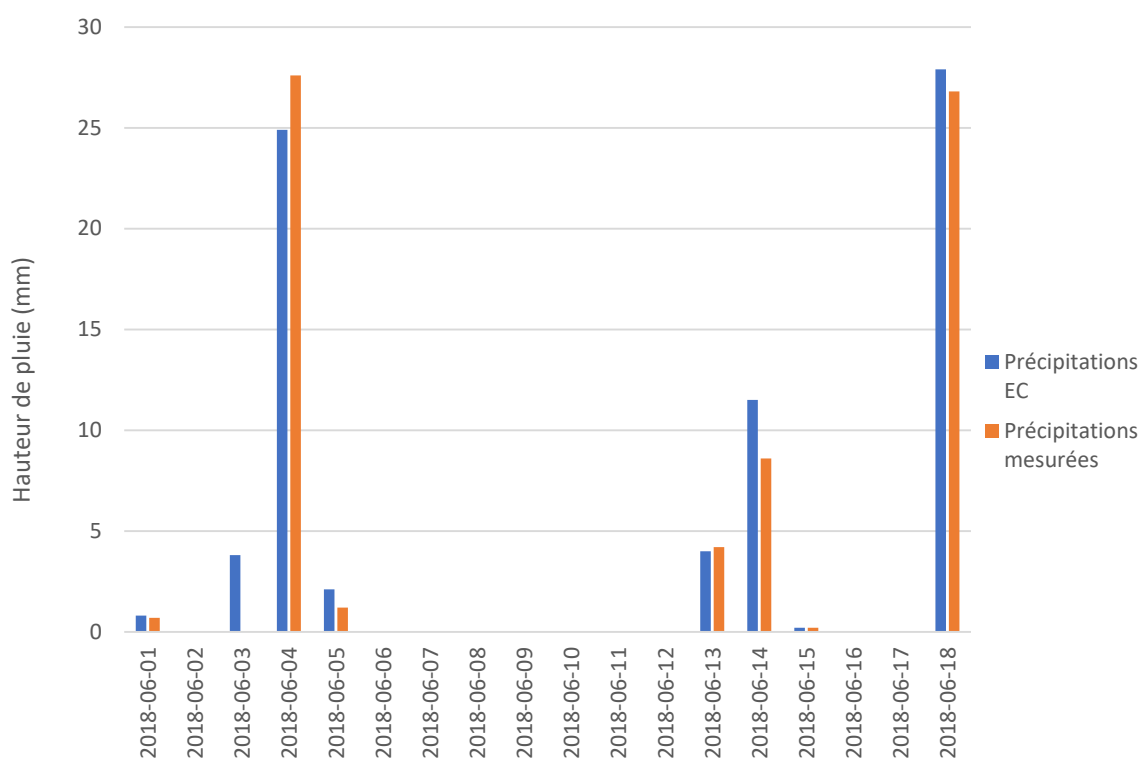


Figure 4.16: Comparaison des hauteurs de précipitations journalières mesurées par le pluviomètre (en orange) et par Environnement Canada (en bleu)

Somme toutes, les deux ensembles de données correspondent assez bien, à l'exception de la journée du 3 juin.

Il faut mentionner qu'un problème d'obstruction du pluviomètre pourrait être la cause de l'écart observé. En effet, il a été remarqué que l'entonnoir permettant d'acheminer l'eau de pluie vers les augets basculants était obstrué par de fins débris le 7 juin. À la suite de cette observation, le

pluviomètre a été nettoyé à quelques occasions ce qui fait que les données recueillies à partir de juin devrait être moins affectées par ce problème.

4.3.2 Données hydrauliques

Les données de hauteurs et de vitesses ainsi que les coefficients de Manning calculés ont été visualisées en fonction du temps afin de vérifier la cohérence des mesures et la stabilité dans le temps.

Pour ce qui est de la phase 1, il a été déterminé que le coefficient de Manning semblait augmenter linéairement dans le temps. Cette observation suggère une dérive instrumentale, bien qu'elle pourrait aussi être expliquée par une accumulation progressive de sédiments par exemple. Quoiqu'il en soit, les données de la phase 1 n'ont pas pu être réellement validées en raison de cette anomalie.

La figure 4.17 illustre les vitesses mesurée et calculée en fonction de la hauteur mesurée. La figure 4.18 montre quant à elle la pluviométrie, les débits ainsi que des coefficients de Manning calculés en fonction du temps, pour les 3 sondes de la phase 2.

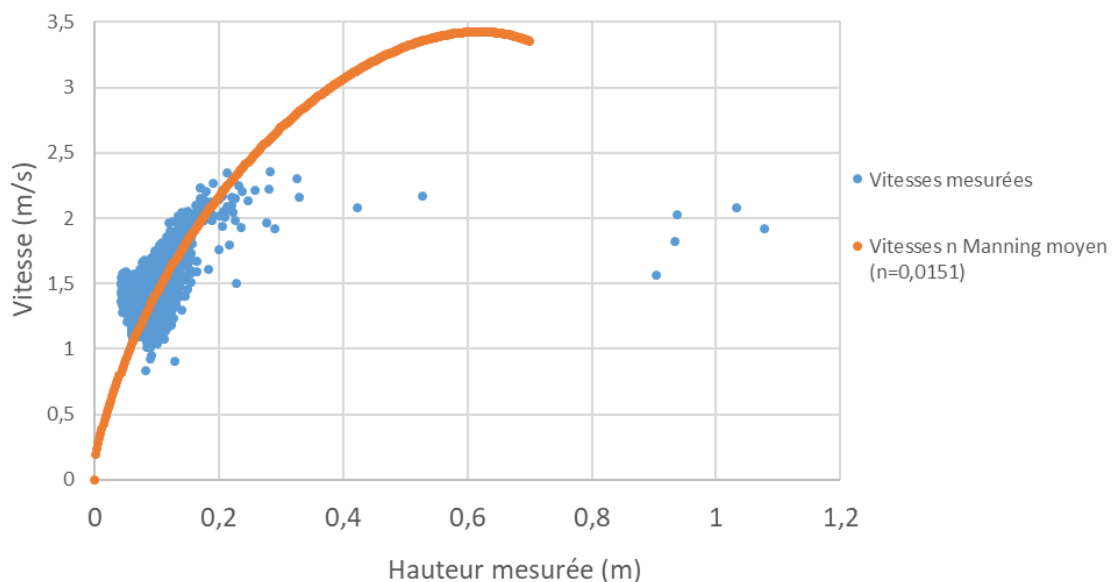


Figure 4.17: Vitesses mesurée et calculée en fonction de la hauteur mesurée dans la conduite 5

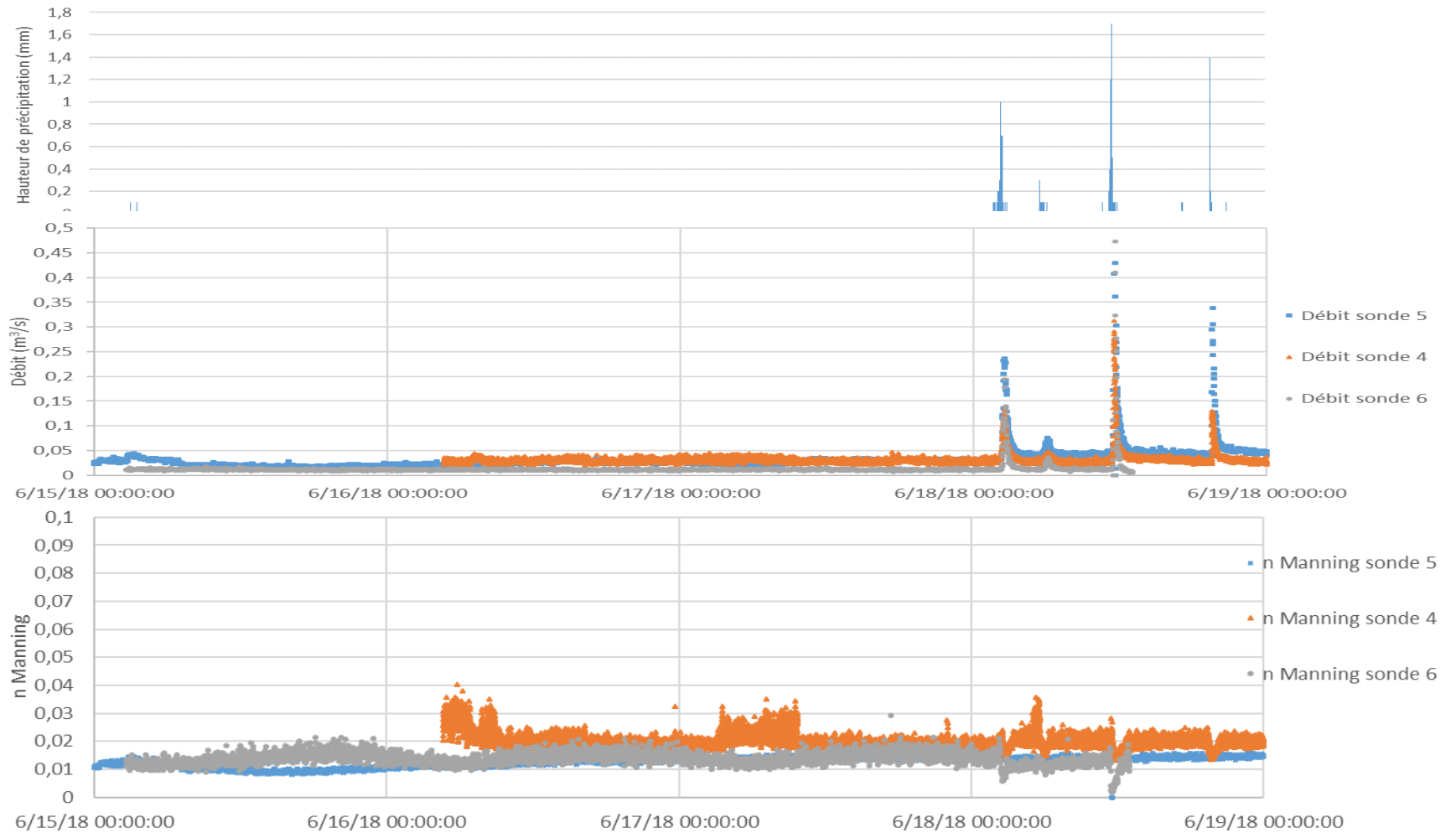


Figure 4.18: Pluviométrie, débits et coefficients de Manning des sondes 4, 5 et 6 en fonction du temps au mois de juin 2018

On que le coefficient de Manning moyen est de 0,0151 ce qui est presque identique au coefficient de Manning théorique de 0,015 pour les conduites en béton armé (Rivard, 2005). Cependant, on remarque également à la figure 4.17 que les vitesses calculées avec l'équation de Manning ne concordent pas avec les vitesses mesurées pour les hauteurs d'eau plus élevées. Ceci peut s'expliquer par l'écoulement non-permanent provoqué par les précipitations ainsi que par une influence de l'aval sur l'écoulement. On note d'ailleurs certains exemples dans la littérature de données similaires à celles obtenues en raison d'une influence aval (Bertrand-Krajewski, Laplace, Joannis, & Chebbo, 2000). Ceci pourrait donc expliquer l'écart entre les deux courbes, d'autant plus que la conduite juste en aval est de pente plus faible.

Une autre observation importante est que le débit de la sonde 5 est semblable au débit de la sonde 4 jusqu'au 18 juin. Or, le débit devrait être supérieur à la conduite 5 en tout temps, comme c'est le cas à partir de cette date puisque cette dernière conduite est située à l'exutoire du bassin. Cette incohérence dans les données pourrait être expliquée par un embâcle formé de déchets, qui pourrait avoir été nettoyé durant l'événement de pluie vers 1h à cette date. C'est cet événement qui a d'ailleurs été choisi pour la calibration puisque certaines données de débit des événements suivants sont manquantes.

4.3.3 Données climatiques

Quant aux données climatiques, il faut d'abord mentionner qu'il n'a pas été possible de récolter la quantité de données prévue initialement. Cette difficulté est principalement due à un vol d'instruments de mesure survenu durant la sortie du 18 septembre. Ce problème majeur a eu comme conséquence la perte de nombreuses données qui avaient initialement été récoltées, dont certaines de vitesse du vent. Il a également été nécessaire de réduire à un le nombre de montages et de récolter des mesures seulement aux points 1, 2 et 3 les journées du 24 et 26 septembre.

Le tableau 4.6 montre les écarts obtenus entre les mesures de deux data-logger d'un même montage durant les quatre journées de mesures. Les résultats montrent que l'écart ne dépasse pas 0,18°C pour la température et 1,43 % pour l'humidité relative. Ces valeurs étant inférieures à la précision fournie dans les spécifications, aucune erreur systématique n'est donc détectée. Il faut toutefois noter que ce test ne permettrait pas de détecter une erreur systématique semblable sur les deux

appareils. Néanmoins, puisque les data-logger étaient neufs, on considère que les données sont de bonne qualité. Celles-ci pourront donc être utilisées pour une étude microclimatique.

La figure 4.19 illustre un exemple de données de température obtenues le 24 septembre 2017 pour les points de mesures 1, 2 et 3. Dans ce graphique, les mesures correspondent aux températures moyennes mesurées sur 30 minutes interpolées linéairement. Le temps de transport entre les sites (3-4 minutes) ainsi que les 10 premières minutes ont été exclus afin de laisser les data-logger se stabiliser.

Tableau 4.6: Écarts de température et d'humidité sur un même montage durant les quatre journées de mesures

Date	Montage	Écart max Température (°C)	Écart moyen Température (°C)	Écart max Humidité (%)	Écart moyen Humidité (%)
2017-08-21	1	0,11	0,04	1,43	0,45
	2	N/D	N/D	N/D	N/D
2017-09-18	1	0,10	0,03	1,20	0,25
2017-09-24	1	0,18	0,05	0,73	0,31
2017-09-26	1	0,06	0,02	0,76	0,38

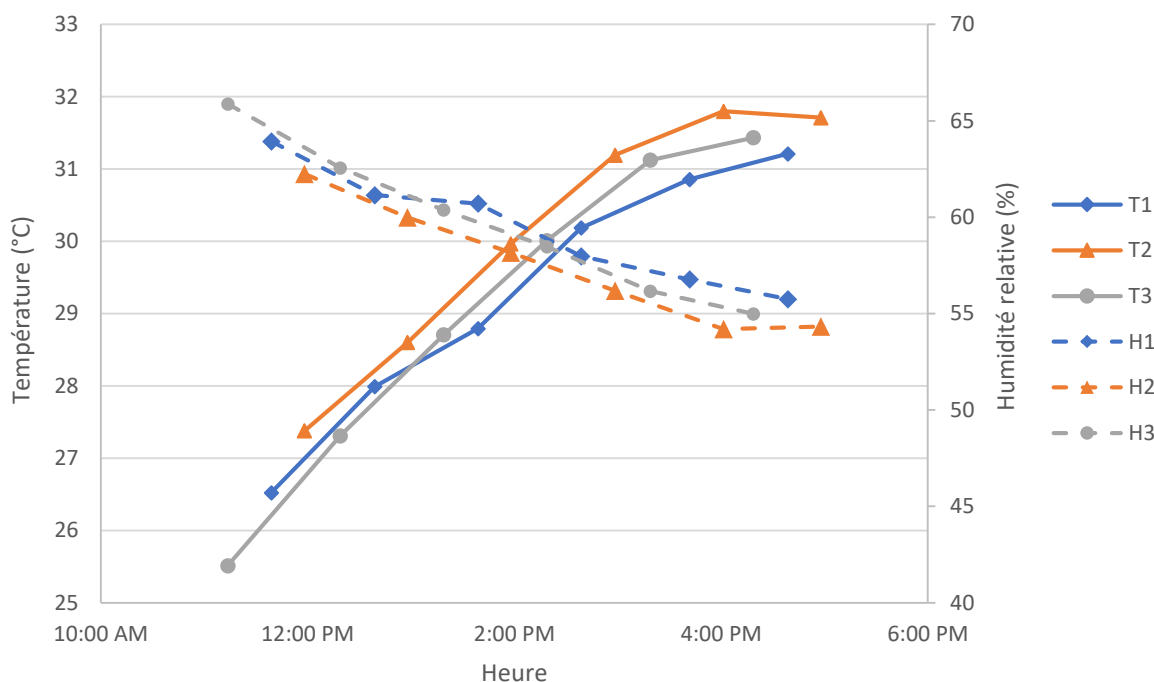


Figure 4.19: Données de température obtenues le 2017-09-24

On remarque dans cette figure qu'à l'intersection avec saillie de trottoir (site 2), la température est plus élevée qu'aux autres intersections. En tenant compte de l'incertitude du data-logger de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$, l'écart devient non-négligeable en fin d'après-midi avec le site 1. L'écart de température entre les sites 2 et 3 n'est pas aussi clair, bien qu'il semble que la température soit plus faible au site 3 également. On peut donc en conclure que pour notre cas d'étude, la saillie de trottoir avec jeune arbre n'est pas le facteur dominant pour la température, qui est davantage influencée par d'autres facteurs comme l'ombre des bâtiments et la présence d'arbres matures. On ne peut toutefois rien conclure avec ces données quant à savoir si la saillie a un effet mesurable sur la température ou non. Cette question est traitée au chapitre 6.

4.4 Incertitudes de mesure

L'incertitudes des mesures est présentée ici selon la méthode proposée dans Bertrand-Krajewski et al. (2000). La méthode consiste à regrouper les sources d'incertitudes selon la technique des 5M, soit la main d'œuvre, le milieu, la méthode, la matière et le matériel de mesure.

Pour les données hydrauliques, les contributions suivantes sont estimées :

Main d'œuvre :

Étant donné que les instruments de mesures ont été bien installés, on considère que cette source d'incertitude est négligeable par rapport aux autres contributions.

Milieu:

Les instruments de mesures utilisés sont robustes et on considère donc que cette source d'incertitude est également négligeable.

Méthode:

La contribution de la méthode affecte particulièrement les mesures de vitesses. La source d'erreur provient de la représentativité imparfaite de la vitesse moyenne de la section par les mesures par effet doppler. De plus, le fait que la calibration n'a pas été réalisée sur le site constitue une autre source d'erreur. On considère donc une contribution de **15 %** pour les vitesses.

Matière :

La matière a certainement influencé la précision des résultats, notamment en raison des sédiments qui ont pu s'accumuler sur le capteur. Les variations de température ont également pu contribuer, bien que les sondes débitmétriques utilisent automatiquement un facteur d'ajustement. On considère un apport de $\pm 10 \%$ pour les hauteurs et les vitesses.

Matériel :

L'incertitude de l'instrument de mesure est de $\pm 2\%$ pour les vitesses et de ± 3 mm pour les hauteurs. Cette incertitude correspond à un maximum d'environ **4 %** sur les hauteurs mesurées les plus faibles lors de l'événement de pluie utilisé pour la calibration, d'environ 7 cm (voir chapitre 5).

En additionnant les valeurs, on obtient une incertitude de $\pm 27 \%$ pour les vitesses et de **14 %** pour les hauteurs. Finalement, pour évaluer l'incertitude sur le débit, on utilise la formule suivante (Bertrand-Krajewski et al., 2000) :

$$I_Q = \sqrt{I_S^2 + I_U^2} \quad (4.1)$$

Où

I_Q : l'incertitude sur le débit

I_S : l'incertitude sur la section d'écoulement

I_U : l'incertitude sur la vitesse

Pour une hauteur de 7 cm et une conduite de 0,762 m (30 po), on obtient une incertitude sur le débit de $\pm 30,4 \%$. Il est à noter que cette valeur diminue avec la hauteur et que ce calcul correspond à la hauteur la plus faible (pire cas) de l'événement choisi pour la calibration. À titre comparatif, on obtient habituellement une incertitude sur la mesure d'environ 15 % dans de bonnes conditions, lorsque les sondes sont étalonnées sur le site (Bertrand-Krajewski et al., 2000) et que la hauteur est supérieur à 0,3 fois le diamètre de la conduite. La valeur obtenue de 30,4 % est plus élevée en raison des deux principales sources d'erreurs, soit l'absence de calibration sur le site et la présence de sédiments et d'embâcles.

Pour ce qui est des données pluviométriques, on retiendra simplement l'incertitude de l'instrument de mesure de $\pm 1,5\%$, additionné de 10 % en raison d'une légère obstruction possible par la poussière. On obtient donc une incertitude d'environ **-12%, +1,5%**.

Quant aux données micro-climatiques, on considère l'incertitude de $\pm 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ce qui correspond à 1,33% pour une température de 30 $^\circ\text{C}$. On additionne à cette valeur 5% en raison de l'imperfection des boucliers solaires ce qui donne $\pm 6,33 \%$.

4.5 Conclusion

Somme toute, la campagne de mesures a permis de récolter des données en quantité et de qualité suffisante pour la calibration du modèle. Les instruments de mesures ont été testés et calibrés en laboratoire. Les données hydrauliques ont pu être validées en récoltant des données de hauteurs et de vitesses redondantes, ainsi qu'en comparant les vitesses mesurées aux vitesses calculées avec l'équation de Manning par temps sec. Quant aux données pluviométriques, celles-ci ont été

comparées aux données journalières d'Environnement Canada. Par la suite, un événement de pluie avec des données hydrauliques et pluviométriques suffisamment fiables a pu être sélectionné pour la calibration du modèle numérique.

CHAPITRE 5 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Ce chapitre porte sur l'utilisation du modèle « Storm Water Management Model (SWMM) » développé par la « United States Environmental Protection Agency » (EPA, 2017) ainsi que du modèle microclimatique ENVI-met. Ce chapitre se rattache donc à l'objectif spécifique 2.

Dans cette étude, le modèle SWMM est utilisé avec le logiciel PCSWMM afin d'évaluer la performance hydraulique des saillies de trottoir sur les plans de la réduction du débit de pointe dans l'égout et de la réduction du volume de ruissellement. Ce modèle combine plusieurs sous-modèles ce qui permet de simuler l'écoulement dans les conduites d'un réseau à partir de données de précipitations. Une description des principaux éléments de SWMM et des hypothèses sous-jacentes est présentée à l'annexe B et une description plus détaillée est disponible dans le manuel de référence en trois tomes (EPA, 2017). Il faut mentionner que deux modèles ont été développés dans le cadre de ce mémoire, qui correspondent aux phases 1 et 2 de la campagne de mesures. Cependant, dû à un manque de données pour la calibration ainsi qu'à plusieurs instabilités numériques dans le premier modèle, seul le second modèle est présenté ici.

Dans un premier temps, le modèle numérique est développé afin de représenter la situation actuelle du bassin versant de la zone d'étude de la phase 2. Dans un second temps, le modèle est utilisé afin d'étudier l'effet d'aménagements de saillies de trottoir en ajoutant des aménagements fictifs.

Le modèle microclimatique ENVI-met est quant à lui utilisé pour mesurer la performance microclimatique des saillies de trottoir sur le plan de la réduction de la température de l'air. Ce logiciel permet de simuler l'évolution de variables microclimatiques à partir des interactions entre les surfaces, les plantes et l'atmosphère (ENVI-met, 2018). Plusieurs références présentent une description du modèle dont Salata, Golasi, de Lieto Vollaro et de Lieto Vollaro (2016).

Le présent chapitre est subdivisé en trois parties, qui présentent d'abord les données disponibles et la construction initiale du modèle hydraulique. La troisième partie porte sur la modélisation microclimatique.

5.1 Construction du modèle hydraulique

Cette section traite de la construction préliminaire du modèle, soit l'estimation initiale des paramètres à l'aide des données disponibles et l'analyse de sensibilité. La calibration est présentée au chapitre 6.

5.1.1 Données disponibles

Les données utilisées pour la modélisation physique de la zone d'étude incluent des données sur le réseau ainsi que certaines estimations de paramètres tirées de la littérature. Le tableau 5.1 présente l'ensemble de ces données, séparées par catégories.

Tableau 5.1: Données utilisées pour la construction du modèle SWMM

Catégorie	Jeux de données	Source
Topographie	Élévations du terrain Couche SIG : - Regards	- Google Earth - Données du réseau fournies
Utilisation du sol	Couches SIG : - Bâtiments - Rues - Trottoir - Images satellites	- Portail des données ouvertes de la ville de Montréal - Google Earth
Réseau d'égout combiné	Couches SIG : - Conduites (Localisation, longueur, forme de la section, diamètre, matériau) - Regards (élévation du sol et du fond) - Puisards - Plans des conduites	- Données du réseau fournies
Composition du sol	Couche SIG : - Composition, épaisseur et profondeur des dépôts meubles Données de forages situés dans la zone d'étude	- Portail des données ouvertes de la ville de Montréal - Données fournies

5.1.2 Initialisation du modèle

À partir des données de la section 5.1.2.1, les paramètres sont estimés soit de manière directe ou par calcul ce qui permet de modéliser physiquement le réseau réel. L'ensemble des paramètres sont présentés aux tableau 5.2 , tableau 5.3 et tableau 5.4. Cette section présente également les méthodes d'estimation de certains de ces paramètres.

Tableau 5.2: Paramètres des sous-bassins du modèle de ruissellement

Paramètre	Méthode d'estimation	Valeur uniforme
Aire des sous-bassin (A)	Calculé à partir de la délimitation des sous-bassins (voir section 5.1.2.1)	S/O
Largeur moyenne d'écoulement (W)	Calculé à partir de la délimitation des sous-bassins (voir section 5.1.2.2)	S/O
Pente (S)	Calcul de la pente moyenne	2 %
Fraction imperméable	Mesures sur les photos satellites	S/O
Rugosité de Manning (n)	Valeurs tirées du Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales (MDDELCC, 2017), selon le type de surface.	Surfaces imperméables : n=0,02 Surface perméables : n=0,15
Volume de stockage (d _s)	Valeurs tirées du Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales (MDDELCC, 2017)	Surface imperméables : d= 1,5 mm Surface perméables : d= 5 mm

Tableau 5.3: Paramètres du modèle d'infiltration (modèle de Horton)

Paramètre	Méthode d'estimation	Valeur uniforme
Infiltration minimale f_0	Valeurs tirées du manuel SWMM p.97 (k_d), et du Manuel de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales (tableau 10.5) (MDDELCC, 2017) et de (Aceves & Fuamba, 2016). (section 3.2 preliminary analysis)	1 mm/h
Infiltration maximale f_∞		25 mm/h
Coefficient de décroissance k_d		4

Tableau 5.4: Paramètres du modèle hydraulique

Paramètre	Méthode d'estimation
Géométrie des conduites : <ul style="list-style-type: none"> • Localisation • Longueur • Pente • Forme de la section • Diamètre 	Estimation directe à partir des couche SIG des conduites ¹ .
Rugosité de Manning	Valeurs tirées du Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales (MDDELCC, 2017)
Position et profondeur des regards	Couche SIG des regards

¹Les données d'élévation manquantes ont été interpolées. Dans le cas des conduites de puisards, une pente de 2% a été supposée.

La démarche permettant de construire le modèle de ruissellement consiste d'abord à déterminer les limites du bassin versant à l'étude. Cette délimitation est effectuée à partir des plans des conduites d'égouts ainsi que des données topographiques. Par la suite, le bassin versant est divisé en sous-bassins, selon les points d'entrée considérés. Les propriétés sont par la suite spécifiées pour chaque sous-bassin individuel. Certaines hypothèses sont posées afin de réaliser cette étape :

1. L'eau de ruissellement est transférée au réseau de conduites par les regards, qui constituent les exutoires des sous-bassins. Autrement dit, les puisards ne sont pas pris en compte dans la modélisation.
2. L'eau des toits est dirigée vers le réseau par les conduites en face des bâtiments.
3. La pente est supposée uniforme sur tout le bassin versant.

L'hypothèse no. 1 est posée en raison des données manquantes sur les pentes des puisards. Cette supposition est fréquemment utilisée pour la conception des réseaux d'égout urbain, tel que mentionné par Brière (2012). L'hypothèse no. 2 est posée en raison de l'absence de données sur les raccordements entre les bâtiments et les conduites. Celle-ci permet de considérer une distance minimale entre les bâtiments et la rue. L'hypothèse no. 3 permet quant à elle de pallier au manque de données topographiques fines et de simplifier la modélisation physique. Dans le cas d'étude, cette supposition originale est acceptable puisque la pente de la zone d'étude est assez uniforme selon les données disponibles.

Par ailleurs, le modèle d'infiltration de Horton est choisi afin de simuler les pertes d'eau par infiltration en raison de la disponibilité des paramètres dans la littérature. Cependant, leur valeur précise n'a pas pu être établie en raison d'un manque de données géotechniques de la zone d'étude. Pour cette raison, le sol a été supposé argileux puisqu'il s'agit de la composition principale du sol sur l'île de Montréal et que ce type de sol concorde avec les données géologiques du portail des données ouvertes de la Ville de Montréal (Montréal, 2018). Le tableau 5.3 contient les valeurs retenues selon cette supposition.

5.1.2.1 Délimitation du bassin versant et des sous-bassins

Les limites du bassin versant et des sous-bassins ont été tracées à partir de la topographie et des plans du réseau d'égout. La similarité spatiale des caractéristiques (ex : type de sol, pente, rugosité,

etc.) a été également prises en compte de manière à uniformiser les sous-bassins. L'uniformité des caractéristiques évite d'avoir à recourir à des moyennes pour l'estimation des paramètres, ce qui permet un calcul plus réaliste du bilan volumétrique. La zone d'étude contient donc un nombre plus élevé de sous-bassins que si la zone était divisée uniquement à partir de la topographie.

D'autre part, la zone à l'étude comprend de nombreux bâtiments qui sont directement raccordés au réseau d'égout combiné. Il a été supposé que toute l'eau de ruissellement provenant des toits entre dans le réseau par le regard immédiatement en amont de la conduite en face du bâtiment. Cette hypothèse est acceptable puisqu'elle n'influence pas le volume total d'eau total ruisselée.

5.1.2.2 Largeur moyenne d'écoulement (W) :

La largeur des sous-bassin (W) influence le débit de ruissellement calculé avec l'équation de Manning et donc la forme de l'hydrogramme d'entrée aux regards. Le débit de pointe en réponse à un événement de pluie sera plus élevé et atteint plus rapidement avec une valeur de W élevée. Pour le modèle à l'étude, ce paramètre est estimé avec l'équation 5.1, tel que suggéré dans le manuel SWMM:

$$W = \frac{A}{l_{moy}} \quad (5.1)$$

Où A représente l'aire totale du sous-bassin et l_{moy} représente la moyenne d'une série de longueur maximales d'écoulement mesurées dans la couche SIG. Dans le cas des toits de bâtiments par exemple, la largeur d'écoulement équivaut à la distance moyenne entre les bords du toit et le centre étant donné que l'eau est évacuée au centre sur les toits plats.

5.1.2.3 Pas de temps

Tel que mentionné précédemment, des pas de temps différents sont établis pour le ruissellement en surface et pour l'écoulement dans les conduites. Pour le modèle de ruissellement, la durée du pas

de temps est choisie de telle sorte que cette durée soit inférieure au temps de concentration du plus petit sous-bassin et qu'elle soit une fraction entière du hyétogramme en entrée. Le choix final est obtenu par essais successifs, en vérifiant qu'une diminution du pas de temps ne modifiait plus l'hydrogramme résultant.

Dans le modèle hydraulique, la stabilité numérique est le principal critère pour fixer la durée des pas de temps. Cette durée est établie de manière à respecter la condition de Courant:

$$\Delta t \leq \frac{L}{|v + c|} \quad (5.2)$$

Où

Δt : durée du pas de temps

L : longueur de la conduite

v : vitesse de l'écoulement

c : célérité d'une onde de gravité, $c = \sqrt{gD_h}$,

où D_h est la profondeur hydraulique

5.1.2.4 Conditions initiales et frontières

Les conditions initiales ont été établies en supposant un réseau sans écoulement au départ, ce qui correspond aux valeurs d'entrée suivantes :

1. Hauteur initiale : 0 m
2. Débit initial dans les conduites : 0 m

Les conditions frontières, correspondant aux débits aux nœuds ont quant à elles été établies afin d'inclure le débit sanitaire. La valeur retenue est de 0,05 m³/s à l'exutoire du bassin, ce qui équivaut environ au débit mesuré par temps sec.

5.1.2.5 Réseau modélisé

Au final, le réseau obtenu est montré à la figure suivante :

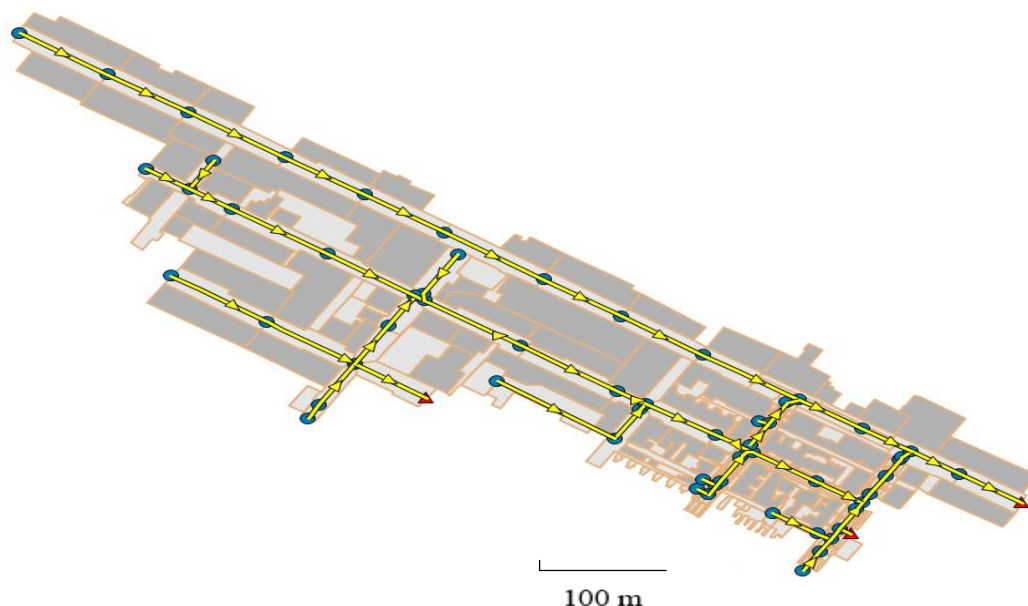


Figure 5.1: Réseau d'égout modélisé dans SWMM

Dans cette figure, les polygones plus foncés correspondent aux bâtiments tandis que les polygones plus pâles correspondent aux autres sous-bassin. Le modèle inclut 334 sous-bassin et 61 conduites. Il est à noter que le bassin modélisé dépasse largement la zone où les données ont été récoltées, aux points de mesures de la figure 4.3. Ceci est dû au fait que le débit entrant dans la zone était difficile à évaluer sans une modélisation de la partie en amont. Le modèle construit a donc l'avantage de ne pas inclure de débits à estimer provenant de l'amont.

5.1.3 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité est exécutée sur le modèle afin de mesurer l'influence des paramètres individuels sur l'hydrogramme à l'exutoire. Cette étape est réalisée préalablement à la calibration du modèle puisque qu'elle permet de choisir les paramètres de calibration. L'analyse est effectuée à l'aide de l'outil intégrée de PCSWMM (outil SRTC), qui a été choisi pour sa simplicité d'utilisation et le faible nombre de simulations requis. La démarche suivie pour déterminer la sensibilité des paramètres est détaillée dans ce qui suit.

5.1.3.1 Incertitudes des paramètres du modèle

La première étape de l'analyse de sensibilité consiste à déterminer la plage de valeurs à étudier pour chacun des paramètres susceptibles d'être utilisés pour la calibration, et qui font donc partie de l'analyse. Cette plage de valeur est établie selon l'incertitude estimée et sert ensuite à borner l'analyse de sensibilité (voir section 5.1.3.2). Les plages d'incertitudes sont déterminées en se basant sur les valeurs de la littérature (Brière, 2012; EPA, 2017; Rivard, 2005), les recommandations de James (2005) ainsi que sur le jugement et l'expérience de l'utilisateur. Ces plages peuvent en général différer d'un sous-bassin à l'autre mais elles ont été fixées égales pour l'ensemble des sous-bassins dans cette étude. Les tableaux 6.1, tableau 6.2 et tableau 6.3 du chapitre 6 présentent la liste des paramètres et leur incertitude associée. Dans ces tableaux, une incertitude fixée à 0 % signifie que le paramètre a été mesuré avec un bon degré de certitude et que celui-ci est exclu de l'analyse de sensibilité.

5.1.3.2 Calcul de la sensibilité

La deuxième étape correspond au calcul de la sensibilité proprement dit. Cette étape consiste à quantifier les modifications de l'hydrogramme à l'exutoire lorsque les groupes de paramètres identiques (ex : toutes les pentes des sous-bassin) prennent une à une les valeurs minimum et maximum de la plage de valeur bornée par leur incertitude. Cette étape requiert donc l'exécution de deux simulations par groupe de paramètres, qui permettent de calculer un taux de variation linéaire avec l'équation suivante :

$$r = \frac{y(x_{max}) - y(x_{min})}{(x_{max} - x_{min})/x_{moy}} \quad (5.3)$$

Où :

r : Taux de variation de la variable de sortie en fonction de la variable d'entrée

y : Variable de sortie

x : Paramètre en entrée

L'événement de pluie considéré est la pluie utilisée pour la calibration, qui est détaillée au chapitre 6.

5.2 Construction des scénarios d'étude

Des scénarios d'étude sont élaborés afin d'étudier l'effet des saillies de trottoir avec biorétention sous l'effet des changements climatiques. Pour ce faire, des aménagements de biorétention sont ajoutés au modèle SWMM et la pluviométrie est modifiée selon les ajustements proposés dans la littérature pour les changements climatiques.

5.2.1 Pluviométrie

Afin de tester les aménagements de biorétention, deux événements de pluie sont considérés. Le choix des deux événements de pluie s'inspire de la thèse de Sebti (2016).

Le premier événement, tirée de MDDELCC (2017) est typiquement utilisé pour la conception des ouvrages de gestion des eaux pluviales destinés au contrôle qualitatif. Il s'agit d'une pluie synthétique d'une hauteur totale de 25 mm, ce qui correspondant au 90^e percentile des pluies annuelles. Le hyétogramme utilisé est construit par intervalles de 10 minutes et inclut 6 heures de précipitations sans interruption. La figure 5.2 illustre cette pluie.

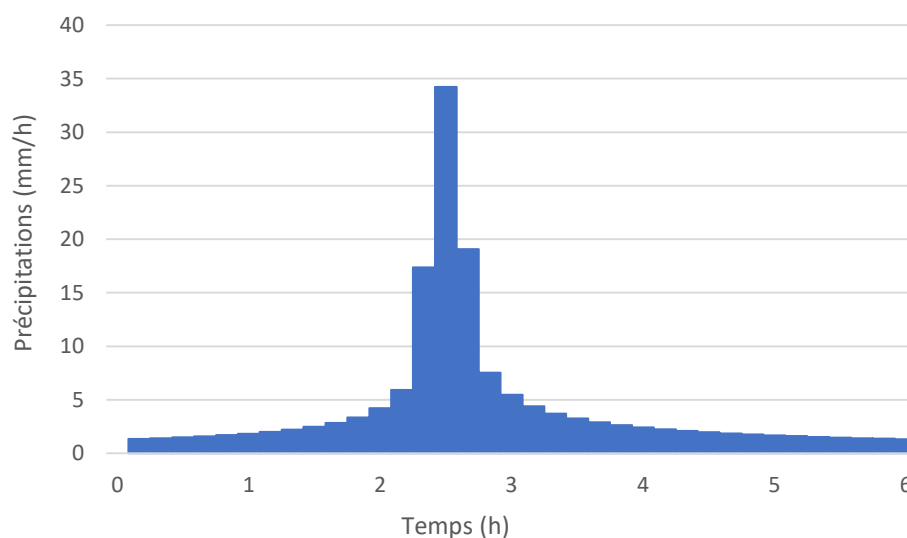


Figure 5.2 : Hyétogramme de la pluie qualité

Le deuxième événement de pluie considéré est un événement de pluie synthétique de type Chicago. La récurrence utilisée est de 10 ans selon les courbes IDF de l'aéroport Dorval (MDDEFP & MAMROT, 2012), ce qui correspond à une récurrence typique de conception pour le contrôle quantitatif. Le pas de temps de la pluie est de 10 minutes. Le hyétogramme ainsi construit est montré à la figure 5.3.

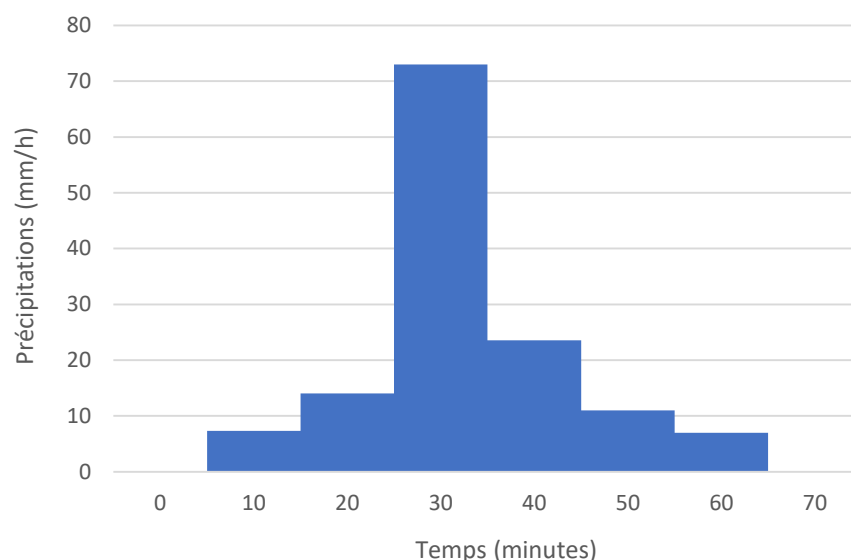


Figure 5.3 : Hyétogramme de la pluie Chicago (T=10 ans)

De plus, la pluviométrie est ajustée dans les scénarios d'étude en conditions futures afin de tenir compte de l'effet des changements climatiques. Tel que suggéré dans MDDELCC (2017), une majoration de **18%** des hauteurs de pluie est retenue.

5.2.2 Durée des simulations

À partir de simulations préliminaires, une durée de 10h a été jugée suffisante afin de permettre le retour au débit de base (débit sanitaire) dans les conduites. Pour les simulations visant à déterminer la réduction du volume de ruissellement, cette durée a été augmentée à 24 h pour permettre une la vidange plus adéquate des ouvrages.

5.2.3 Aires de biorétention

La zone d'étude inclut des aires de biorétention planifiées des deux côtés des rues. Les aires de biorétention sont ajoutées au modèle SWMM en se basant sur les plans disponibles. Les paramètres de modélisation utilisés sont montrés au tableau 5.5. La figure 5.4 illustre une coupe des saillies de trottoir avec leurs dimensions.

Tableau 5.5: Paramètres des aménagements de biorétention du modèle SWMM

Paramètre	Valeur	Source
Dimensions		
Superficie	3 à 50 m²	Plans des aménagements
Hauteur moyenne d'accumulation:	80 mm	
Caractéristiques du substrat		
Épaisseur du substrat	1 m	Plans des aménagements
Porosité ($\frac{V_{vides}}{V_{total}}$)	43,7 %	Tableau 6.18 (MDDEFP & MAMROT, 2012; Rawls, Brakensiek, & Miller, 1983)
Capacité au champ	20 %	SPAW (65% sable (0,05 – 2mm), 10% argile (< 0,002 mm))
Point de flétrissement	9,4 %	
Conductivité hydraulique à saturation	60,7 mm/h (2,39 in/hr)	
« Percolation Decay Constant »	40	Table 6-3 manuel qualité SWMM
Succion matricielle	47,8 mm	

Tableau 5.5 : Paramètres des aménagements de biorétention du modèle SWMM (suite)

Paramètre	Valeur	Source
<i>Réservoir de pierre nette</i>		
Hauteur	0,35 m	Plans des aménagements
Indice des vides ($\frac{V_{vides}}{V_{solides}}$)	0,3	Table 6-3 manuel qualité
<i>Drain de fond</i>		
Hauteur du drain	0,25 m	Plans des aménagements
Diamètre	100 mm	
Rugosité de Manning	0,01	(Polyéthylène haute densité)
Pente	2,5%	Pente du terrain naturel
Coefficient de drain	$C = \frac{Q_{full}}{A_{PGO}}$	Manuel SWMM p.133

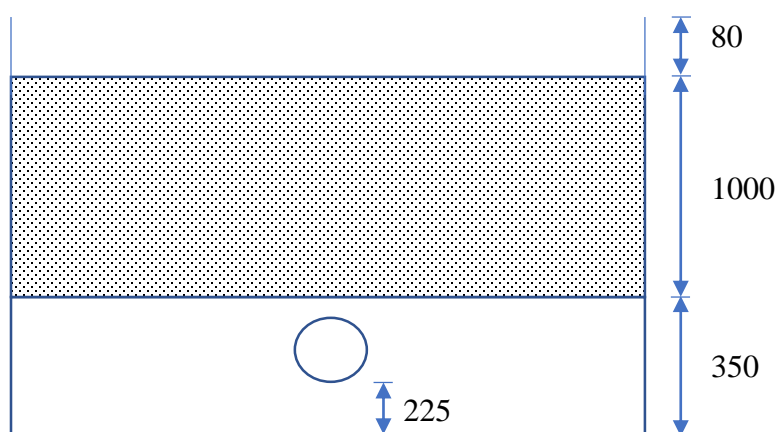


Figure 5.4 : Coupe schématique des saillies de trottoir telles que modélisées dans SWMM

Par ailleurs, certaines hypothèses sont posées pour cette étude :

- Étant donné que seul des événements de pluie isolés sont considérés dans cette étude, l'évaporation est négligée.
- Pour le calcul du niveau d'eau dans le réservoir au fond, l'infiltration dans le sol naturel est négligée en raison de la proximité du roc et du sol peu perméable.
- Dans le cadre de cette étude, il est supposé que les ouvrages de biorétention sont saturés à 15 % au début des simulations.
- L'intérieur du drain de fond est supposé lisse pour déterminer le coefficient de Manning.
- Tel que mentionné dans le manuel d'utilisateur, la modélisation SWMM nécessite une hypothèse sur l'élément limitatif du débit sortant par le drain de fond afin d'estimer les paramètres de l'équation suivante :

$$Q = Ch^k \quad (5.4)$$

Où :

Q : débit dans le drain (m/s)

h : hauteur d'eau au-dessus du drain (m)

C et k : paramètres empiriques

Dans cette étude, il est supposé que l'évacuation des ouvrages est limitée par la capacité d'écoulement du drain, et non par la capacité des orifices du drain. Cela s'exprime en posant $k = 0$ et :

$$C \text{ (mm/h)} = \frac{Q_{full}}{A} \quad (5.5)$$

Où :

Q_{full} correspond à la capacité du drain, calculée avec l'équation de Manning

A correspond à la superficie des aires de biorétention.

5.2.4 Modifications aux aménagements de biorétention

Des scénarios avec modifications aux aménagements de biorétention tels que construits sont également simulés afin de déterminer des améliorations possibles. Les choix de modifications à étudier s'appuient sur les différents design de biorétention en saillie de trottoir retrouvés dans la littérature et intègrent les adaptations suggérées pour les climats froids (Dugué, 2010; MDDEFP & MAMROT, 2012; Niazi et al., 2017).

5.2.5 Présentation des scénarios d'étude

Cette section résume les différentes variations dans les scénarios ainsi que les abréviations utilisées dans la présentation des résultats.

Saillies :

- Présence de saillies
- Sans saillies

Pluviométrie :

- Pluie qualité
- Plus 10 ans

Changements climatiques :

- Avec majoration des hauteurs de précipitations de 18 %
- Sans majoration

Hauteur d'accumulation en surface :

- Hauteur telle que planifiée : 80 mm
- Hauteur augmentée 150 mm

- Hauteur augmentée 225 mm

Pourcentage d'argile

- Sol tel que planifié
- Sol basé sur un aménagement de biorétention en climat nordique (Muthanna et al., 2008) :
 - Argile : 5 %
 - Sable : 92 %
 - Matière organique : 7 %

Pour modéliser ce sol, les paramètres suivant sont utilisés :

- Porosité : 43,7 %
- Capacité au champ : 9,4 %
- Point de flétrissement : 5,0 %
- Conductivité hydraulique à saturation : 114 mm/h (4,49 po/h)
- Constante de décroissance : 40
- Succion matricielle : 47,8 mm

5.3 Modélisation microclimatique

Le logiciel ENVI-met a été choisi pour la construction du modèle microclimatique. La section 5.3.1 résume le fonctionnement du modèle, qui est décrit plus en détails sur le site Web (ENVI-met, 2018). La section 5.3.2 présente quant à elle la zone moët l'initialisation du modèle.

5.3.1 Présentation du modèle ENVI-met

Le modèle ENVI-met permet de simuler l'évolution de variables météorologiques à partir des lois de la thermodynamique et de la mécanique des fluides (Acero & Arrizabalaga, 2016). Typiquement, la durée d'une simulation est comprise entre 24 et 48h. Le pas de temps varie quant

à lui de 1 à 5 secondes et la résolution spatiale est habituellement comprise entre 0,5 à 10 m. Ce modèle a initialement été créé par Michael Bruse en 1993 et a depuis subi de nombreuses mises à jours. Il s'agit d'un des logiciels les plus utilisés pour modéliser l'effet des espaces verts sur le microclimat (Salata et al., 2016).

ENVI-Met calcule l'évolution des variables météorologiques à partir des interactions entre les plantes, le sol, les bâtiments et l'atmosphère. Les processus modélisés comprennent notamment les flux de radiations, la consommation d'eau par les plantes, l'évapotranspiration et le vent. Ces processus sont calculés dans différents sous-modèle dont un modèle tridimensionnel non-hydrostatique de l'atmosphère basé sur les équations de Navier-Stokes moyennées (RANS). ENVI-Met inclut également un modèle du sol qui simule entre autre la distribution de la température dans le sol, la teneur en eau du sol et la consommation d'eau des végétaux. Le modèle de la végétation permet quant à lui de simuler les échanges de chaleurs et d'humidité avec l'environnement. Les principales équations utilisées pour modéliser les différents processus sont présentées en détails dans un article de Bruse et Fleer (1998). Celles-ci sont résolues dans ENVI-Met avec la méthode des différences finies.

5.3.2 Zone modélisée et initialisation du modèle

La zone modélisée pour cette étude est une partie de la zone de la collecte des données de température, correspondant plus spécifiquement aux points de mesures 1 et 2. Le modèle, qui inclut deux saillies de trottoir a été utilisé pour simuler la journée du 24 septembre, durant laquelle des données de température ont été recueillies. La durée de la simulation est de 12 h, de 5 :00 à 17 :00. L'heure choisie pour débiter la simulation est appropriée pour débiter la modélisation (Salata et al., 2016) car elle permet de laisser le modèle s'initialiser avant l'atteinte des températures maximales. Dans cette étude, les premières 4 heures sont considérées comme faisant partie de la période d'initialisation et elles ne sont donc pas prises en compte.

Les paramètres utilisés pour la modélisation sont montrés à l'annexe D. Pour établir les conditions frontières, le modèle ENVI-met donne l'option à l'utilisateur de fournir l'évolution de la température et de l'humidité dans le temps, ce qui correspond aux conditions frontières de type

forcées. Cette option a été employée pour cette étude, avec la moyenne des températures mesurées comme conditions frontières. La figure 5.5 montre la zone modélisée.

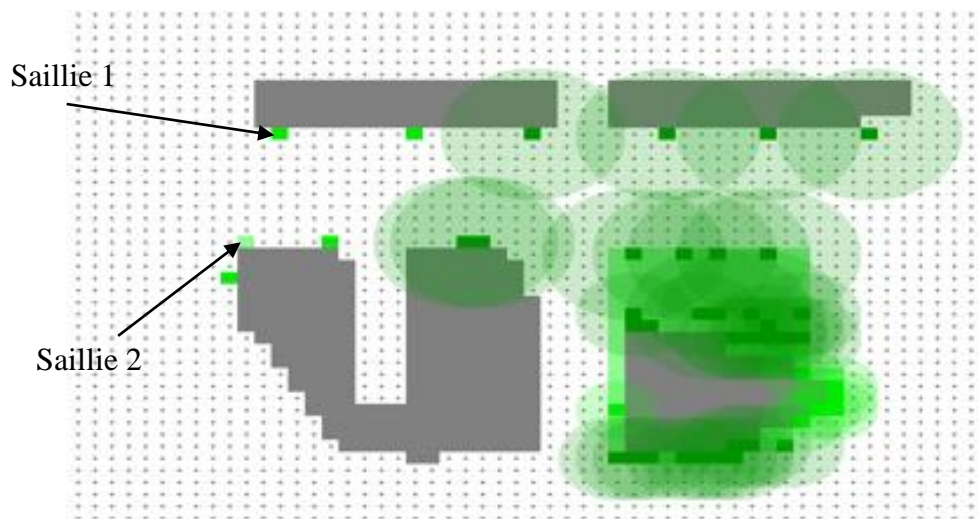


Figure 5.5 : Modèle micro-climatique.

Les deux saillies existantes ont été modélisées en remplaçant le béton des trottoirs par le sol naturel et en ajoutant la végétation. Un scénario avec ajout de deux arbres dans les saillies ainsi qu'un scénario sans saillie sont également testés.

Il faut préciser que le logiciel ENVI-Met requière l'estimation de nombreux paramètres dont certains sont difficile à estimer ou nécessitent de l'équipement coûteux pour les mesurer. Étant donné qu'il n'a pas été possible de mesurer un bon nombre de ces paramètres, l'étude qui est entreprise ici devrait être considérée comme théorique. Une comparaison des résultats du modèle avec les mesures est tout de même présentée au chapitre 6.

CHAPITRE 6 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente les résultats de simulations obtenues. Ces résultats permettent d'évaluer directement l'efficacité des saillies de trottoir quant à la réduction du débit de pointe et du volume de ruissellement et de la température. Ce chapitre permet donc d'atteindre l'objectif spécifique 3.

Les résultats de l'analyse de sensibilité et de la calibration du modèle SWMM sont d'abord présentés. Par la suite, les résultats des simulations sont abordés. La dernière section traite des résultats de la modélisation microclimatique.

6.1 Analyse de sensibilité et calibration du modèle SWMM

Les tableau 6.1, tableau 6.2 et tableau 6.3 présentent les résultats de l'analyse de sensibilité du modèle SWMM ainsi que la plage de variation utilisée.

Tableau 6.1: Gradients de sensibilité du débit de pointe (r_{Q_p}) et du volume de ruissellement (r_{V_r}) pour les paramètres du modèle de ruissellement

Paramètre	$r_{Q_p} (\frac{l/s}{\% var})$	$r_{V_r} (\frac{l}{\% var})$	% Variation (incertitude)
Largeur d'écoulement (W)	1,48	341	$\pm 75 \%$
% superficies imperméables	1,81	2925	$\pm 20 \%$
Pente des sous-bassin (S)	0,75	165	$\pm 75 \%$
Coefficient de Manning (n) (surfaces imperméables)	1,81	374	+ 75 %, -50%
Coefficient de Manning (n) (surfaces perméables)	0,00	0	
Volume de stockage d_s (surfaces imperméables)	1,59	1892	- 100 %, +200%
Volume de stockage d_s (surfaces perméables)	0,00	0	

Tableau 6.2: Gradients de sensibilité liés aux paramètres du modèle d'infiltration

Paramètre	$r_{Q_p} \left(\frac{l/s}{\% Var} \right)$	$r_{V_r} \left(\frac{l}{\% Var} \right)$	% Variation (incertitude)
Infiltration minimale f_0	0	0	$\pm 50 \%$
Infiltration maximale f_∞	0	0	$\pm 50\%$

Tableau 6.3: Incertitudes liés aux paramètres du modèle hydraulique

Paramètre	$r_{Q_p} \left(\frac{l/s}{\% Var} \right)$	$r_{V_r} \left(\frac{l}{\% Var} \right)$	% Variation (incertitude)
Géométrie des conduites : <ul style="list-style-type: none"> - Localisation - Longueur - Pente - Forme de la section - Diamètre 	S/O	S/O	0%
Rugosité de Manning	0,75	76	+75 %, -37,5%
Position des regards	S/O	S/O	0 %
Profondeur des regards	S/O	S/O	0 %
Débit par temps sec	S/O	S/O	Voir chapitre (Mesures terrain)

L'analyse de sensibilité montre que le modèle est sensible à plusieurs paramètres dont le volume de stockage, qui est par ailleurs difficile à estimer à priori. Ce paramètre a donc une grande influence dans la calibration.

Le modèle est calibré avec un événement de pluie du 18 juin 2018 de 8,4 mm. Bien que cet événement de pluie soit de faible importance, il s'agit de la pluie la plus importante parmi les deux pluies mesurées pour lesquelles les données de débits et de précipitation sont considérées fiables.

Pour effectuer la calibration, les débits mesurés sont ajustés aux observations par essais-erreurs, en modifiant les paramètres de tous les sous-bassin à la fois dans les plages de valeurs montrées au tableau 6.1 (voir colonne % Variation). Le coefficient de Nash-Stucliffe est retenu comme fonction objectif à optimiser. De plus, une autre contrainte est que le temps de pointe ne doit pas s'écarter de plus d'une minute. La figure 6.1 illustre l'hydrogramme obtenu après calibration ainsi que les observations tandis que le tableau 6.4 inclut certains indicateurs qui permettent d'évaluer la qualité de la calibration. Le tableau 6.5 présente les paramètres du modèle calibré.

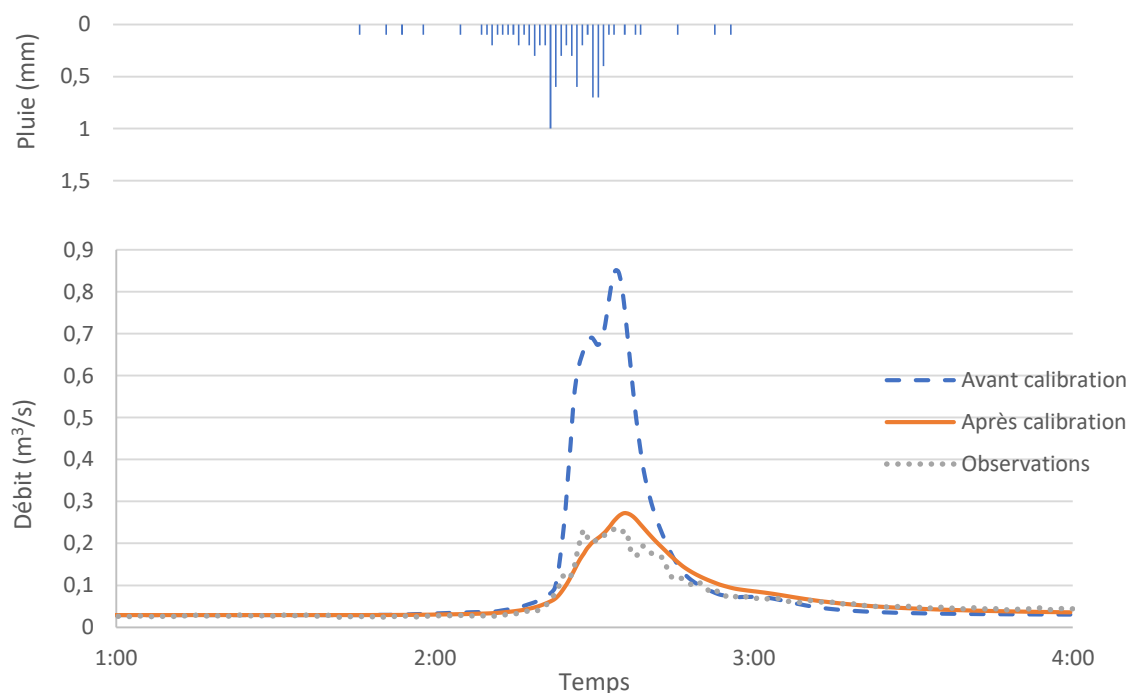


Figure 6.1: Hydrogramme après calibration

Tableau 6.4: Indicateur de la qualité de la calibration, en considérant la période de 2 :00 à 3: 30

Indicateur	Valeur
Fonction de Nash-Sutcliffe	0,897
Écart entre les débit de pointes	15,4 %
Écart entre les temps de pointe	1 minute
Écart volume de ruissellement	12 %

Tableau 6.5 : Valeurs des paramètres du modèle calibré

Paramètres	Valeur uniforme
Pente des sous-bassins	2,6 %
Coefficient de Manning des sous-bassin	Surface imperméables : 0,029 Surface perméables : 0,15
Hauteur de stockage initiale	Surfaces imperméables : 7,5 mm Surfaces perméables : 5 mm
Pourcentages de la superficie des sous-bassins sans stockage initial (Zero imperv (%))	41,25 %
Coefficient de Manning des conduites (béton)	0,013

On remarque dans la figure 6.1 et le tableau 6.4 que la calibration est somme toute assez bonne, notamment en raison de la valeur de Nash-Sutcliffe de 0,897. Bien qu'il n'existe pas de règle générale permettant de déterminer la valeur minimale acceptable de cette fonction, on note à titre d'exemple qu'une valeur supérieur à 0 peut être considérée acceptable (Moriassi, Arnold, & Van Liew, 2007).

Il faut souligner que cette calibration comporte plusieurs limites. Notamment, le modèle ne permet pas de simuler adéquatement les deux pointes mesurées, qui sont visibles à la figure 6.1. Ceci pourrait être attribué au fait que les paramètres ont été ajustés en bloc pour la calibration, et non individuellement. Il faut également noter que l'intervalle de mesure choisi constitue une source d'erreur importante dans cette calibration puisqu'il est possible que le véritable débit de pointe n'ait pas été enregistré. Cette source d'erreur aurait pu être atténuée si un événement plus stable et de plus longue durée avait été utilisé, de manière à obtenir un débit plus stable. De plus, il est à noter qu'en général, le débit de pointe d'un bassin versant est grandement affecté par la hauteur de stockage initiale lors d'un événement de pluie faible comme celui mesuré. Il en découle que, comme la hauteur de stockage a servi de paramètre principal de calibration dans le modèle, cette calibration n'est peut-être pas adaptée pour modéliser les événements de pluie plus importants.

Au final, la calibration pourrait être améliorée en ajustant les paramètres des sous-bassins individuellement, ce qui pourrait être réalisé avec une calibration automatique. De plus, un événement de pluie avec moins de variations brusque durant l'intervalle de mesure d'une minute permettrait de faciliter la comparaison aux données mesurées. Une pluie plus importante permettrait aussi d'obtenir une calibration plus adaptée aux événements de pluie simulés dans les scénarios d'étude. Malgré ces améliorations possibles, le modèle est suffisamment représentatif du cas réel ce qui justifie son utilisation dans cette étude.

6.2 Validation du modèle

Aucun autre événement de pluie mesuré ne permet de valider le modèle construit. Un calcul avec la méthode rationnelle est toutefois effectué afin de comparer le débit calculé au débit modélisé. La formule suivante est donc utilisée :

$$Q = CIA \quad (6.1)$$

Où

Q : Débit de pointe (m^3/s)

C : Coefficient de ruissellement

I : Intensité (mm/h)

A : Superficie du bassin versant

Une pluie d'intensité constante est utilisée pour faciliter la comparaison. La durée est de 2h ce qui correspond environ à deux fois le temps de concentration déterminé par simulation ce qui permet de vérifier que le débit est stabilisé. L'intensité est de 22,6 mm/h, ce qui correspond à une récurrence 2 ans pour une durée de 1h. Le coefficient de ruissellement est fixé à 0,85 afin de représenter un quartier commercial d'un centre-ville (Brière, 2012). On obtient ainsi un débit de 0,74 m^3/s avec la méthode rationnelle et un débit de 0,77 m^3/s par le modèle SWMM. Ces valeurs sont proches ce qui donne davantage confiance envers les résultats modèle.

6.3 Situation actuelle et planifiée

Cette section présente les résultats se rapportant aux saillies de trottoir planifiées. Différentes comparaisons entre les scénarios avec saillies et sans saillies sont incluses dans ce qui suit.

6.3.1 Modèle avec saillies de trottoir

Deux endroits du réseau en particulier sont étudiés, soit la conduite 5 et la conduite 7, qui sont montrées à la figure 6.2. La conduite 5 est située à l'exutoire du bassin versant tandis que la conduite 7 permet d'étudier un sous-bassin de plus petite superficie (SB1 sur la figure 6.2) qui comporte davantage de saillies en proportion de la surface tributaire. La conduite située juste en aval de la conduite 5 a été modélisée puisque celle-ci, étant de pente plus faible est susceptible d'affecter l'écoulement dans la conduite 5.

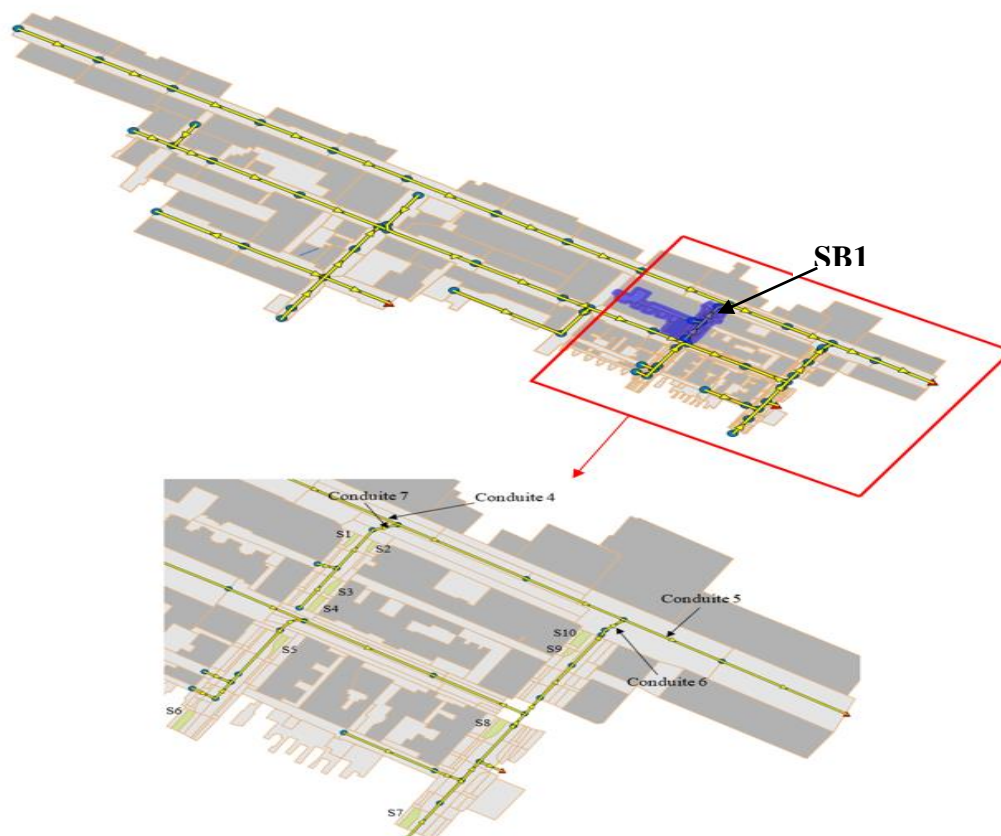


Figure 6.2: Schémas du bassin versant modélisé, incluant le sous-bassin 1 en bleu et un aggrandissement de la zone avec saillies de trottoirs

Ces surfaces ainsi que la proportion occupée par les saillies sont présentées au tableau 6.6. Comme indiqué dans ce tableau, la proportion de la surface occupée par les saillies est beaucoup plus importante dans le sous-bassin 1, proportion qui se rapproche davantage des recommandations pour la biorétention présentées au chapitre 2.

Bien que la situation planifiée s'inspire d'un cas réel, celui-ci inclut cependant d'autres espaces de biorétention qui ne sont pas modélisés dans cette étude. Ceci est dû au fait que ces autres espaces de biorétention ne sont pas aménagés dans des saillies de trottoir, qui constituent le sujet de la présente étude.

Tableau 6.6: Surfaces tributaires des conduites 5 et 7 et proportion de ces surfaces occupée par les saillies de trottoir

Zone	Superficie	Pourcentage de la surface occupée par les saillies	Conduite à l'exutoire
Bassin versant (BV)	134 981 m ²	0,2 %	Conduite 5
Sous-bassin 1 (SB1)	1762 m ²	5,2 %	Conduite 7

Les résultats présentés dans cette section incluent la réduction du débit de pointe et la réduction du volume de ruissellement dans le réseau. Les résultats de la performance hydraulique des saillies elles-mêmes sont également présentés. Pour les pluies plus rares qui causent des mises en charge dans le réseau, l'indice de performance hydraulique (HPI) développé par Bennis, Bengassem et Lamarre (2003) est aussi calculé. Ce dernier indice exprime l'importance de la surcharge au nœud amont d'une conduite en fonction de l'élévation de la ligne piézométrique par rapport à l'élévation du sol ou de tout autre ouvrage souterrain susceptible d'être inondé. L'indice est calculé avec l'équation suivante :

$$N = N_{min} + (N_{max} - N_{min}) \frac{H}{G} \quad (6.2)$$

Où :

H est la hauteur piézométrique à l'entrée amont de la conduite

G est la profondeur de la couronne amont.

Il faut souligner que la réduction du volume de ruissellement pourrait être déterminée de manière beaucoup plus exacte si l'évapotranspiration était prise en compte, ce qui n'est pas le cas dans cette étude. En effet, les saillies prennent plus de 48h à se vider complètement, ce qui fait que l'évapotranspiration a un effet non négligeable sur le bilan volumétrique de l'eau. Dans le cas

présent, une durée de simulation de 24 h a été retenue pour le calcul, durée après laquelle le débit de sortie est très faible.

6.3.2 Résultats

Le tableau 6.7 présente l'effet des saillies sur le réseau pour les deux événements de pluie étudiées, selon les critères de performance énoncés à la section , soit le débit de pointe Q_p et le volume de ruissellement V_r et l'indice de performance hydraulique HPI.

Afin de mesurer la performance des saillies de trottoir sous l'effet des changements climatiques, les scénarios sont également simulés avec une pluviométrie majorée de 18%. Les hydrogrammes obtenus sont présentés aux figures 6.3 à 6.6. La figure 6.7 et la figure 6.8 montrent quant à elles les hauteurs maximales à la conduite 5 pour la pluie 10 ans. Le tableau 6.8 présente les résultats de la performance des saillies. Certains résultats complémentaires sont présentés à l'annexe B.

Tableau 6.7: Effet des saillies sur la performance du réseau en conditions actuelles et avec l'effet des changements climatiques

Zone	Pluie	Réduction Q_p	Réduction V_r	Amélioration HPI (HPI₁- HPI₂); S/O : Aucune surcharge en amont
BV (surface de drainage de la conduite 5)	Qualité	1,7 %	< 1%	S/O
	Qualité majorée	1,7 %	< 1%	S/O
	10 ans	1,1 %	< 1%	S/O
	10 ans majorée	< 1 %	< 1 %	1,0 %
SB1 (surface de drainage de la conduite 7)	Qualité	40,4 %	29,3 %	S/O
	Qualité majorée	30,4 %	25,6 %	S/O
	10 ans	36,1 %	27,9 %	S/O
	10 ans majorée	22,7 %	24,6 %	S/O

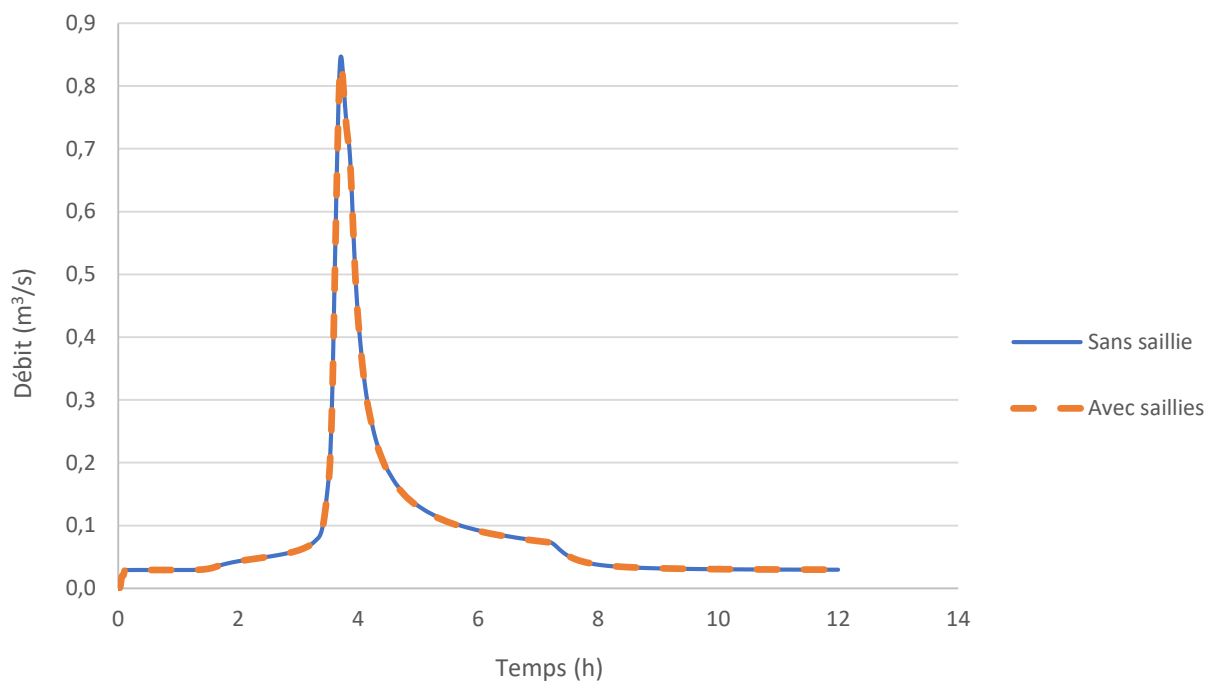


Figure 6.3: Hydrogramme — Conduite 5 — Pluie qualité

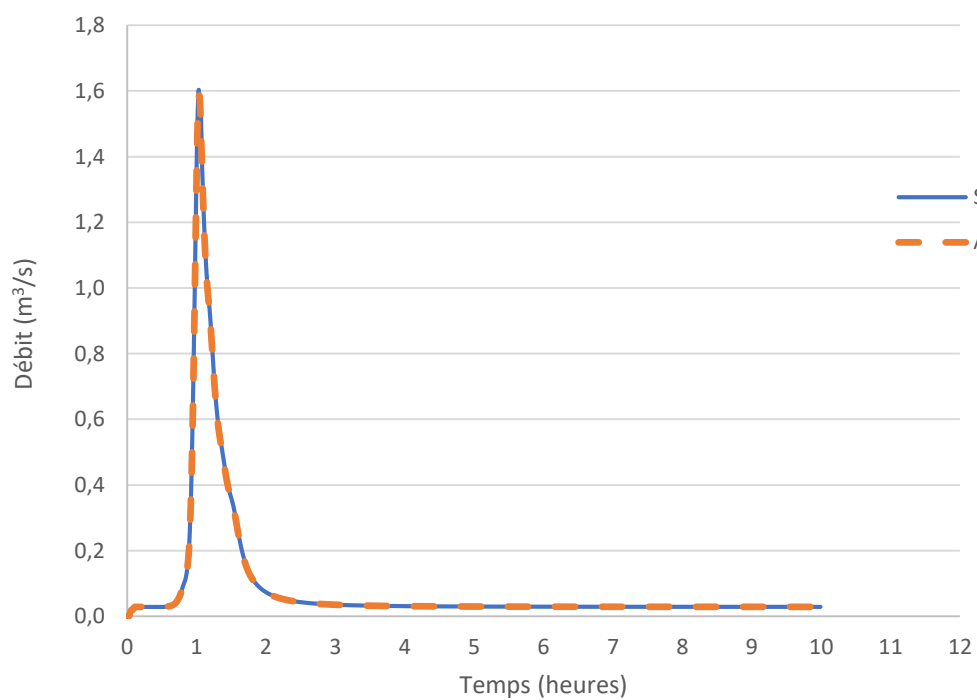


Figure 6.4: Hydrogramme — Conduite 5 — Pluie 10 ans

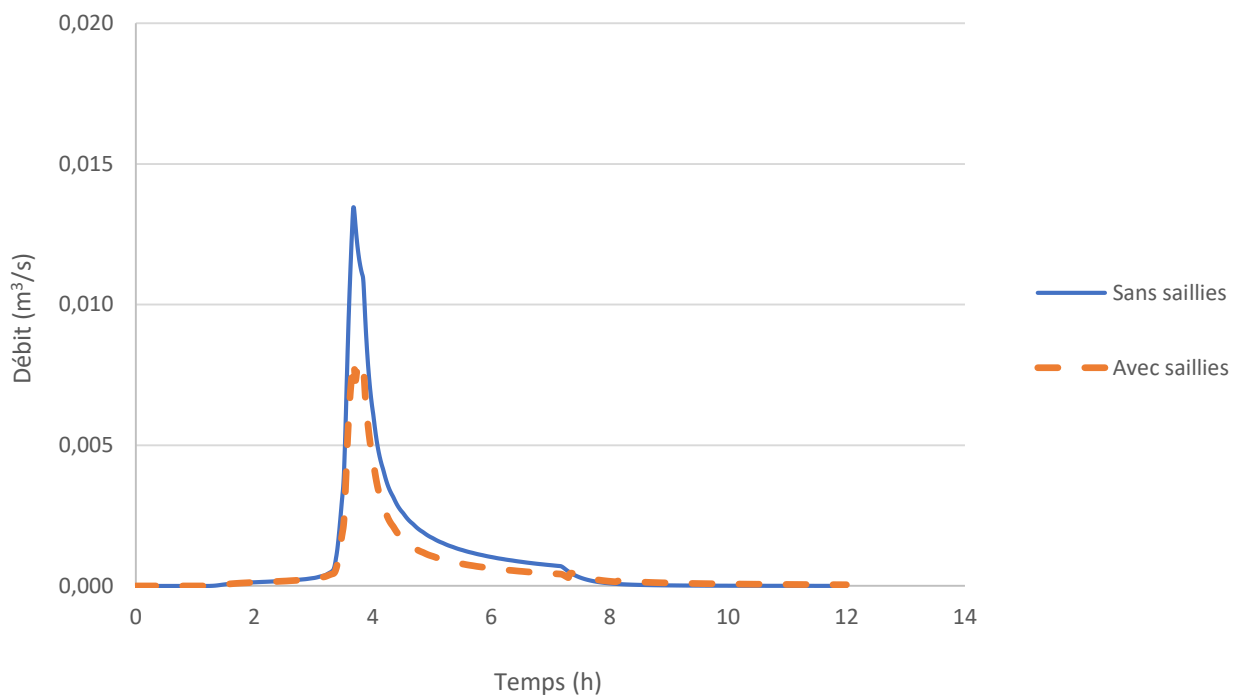


Figure 6.5: Hydrogramme — Conduite 7 — Pluie qualité

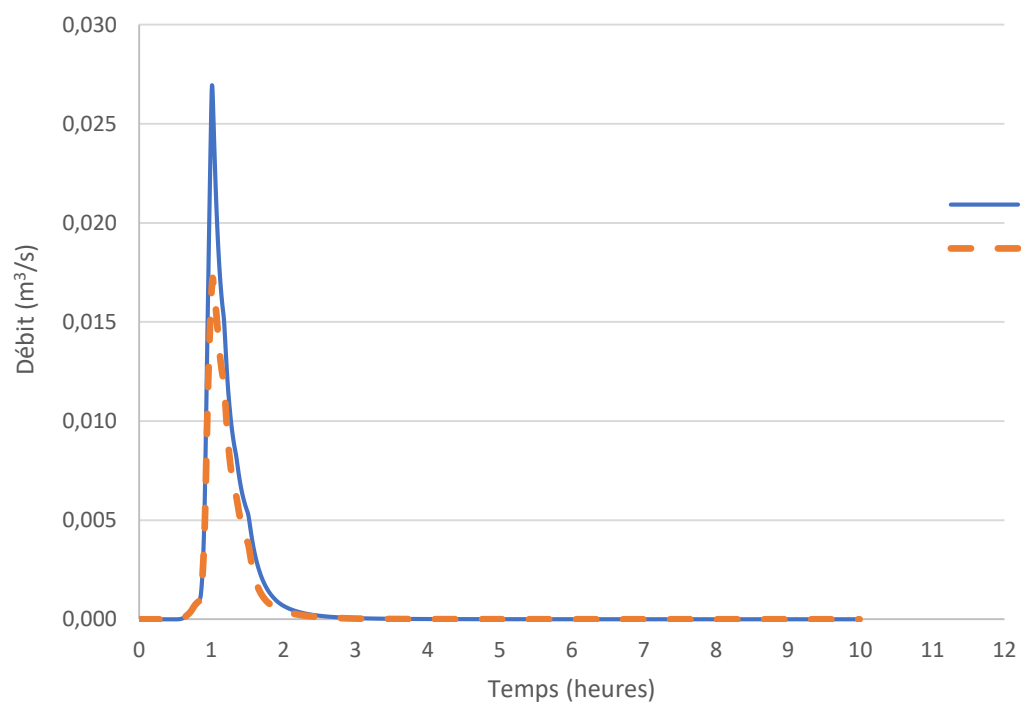


Figure 6.6 : Hydrogramme — Conduite 7 — Pluie 10 ans

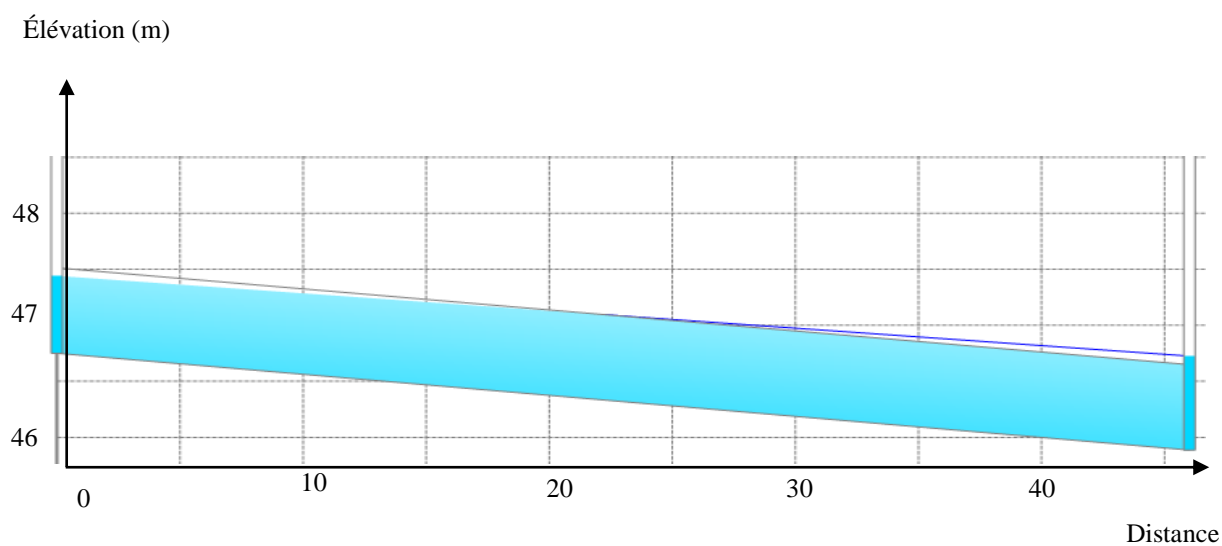


Figure 6.7 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans – Sans saillie

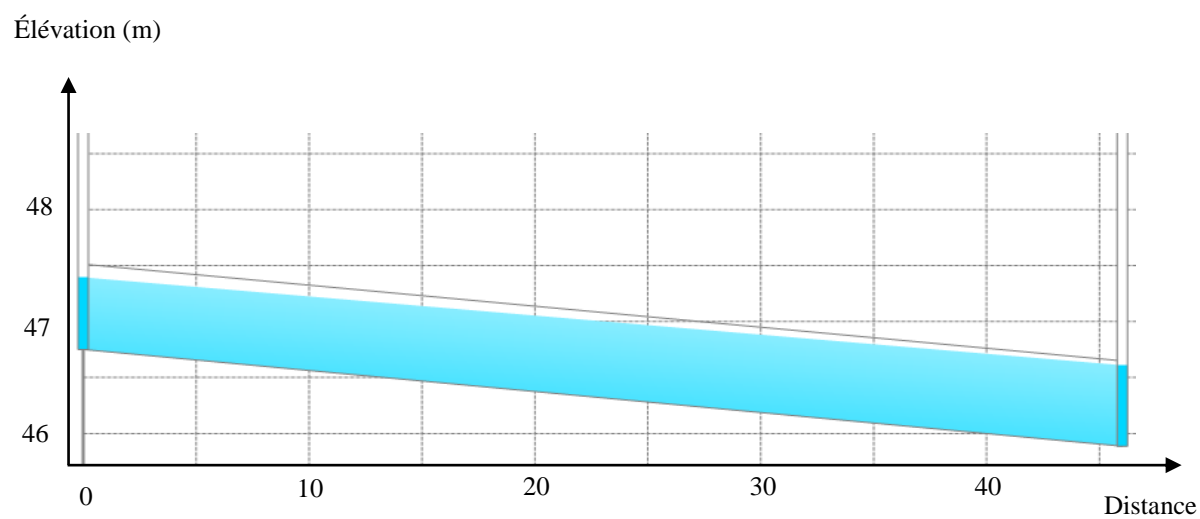


Figure 6.8 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans – Avec saillies

Tableau 6.8 : Performance des saillies de trottoir avec biorétention en conditions actuelles et avec l'effet des changements climatiques — Total du bassin versant

Pluie	Volume total entrant	Volume retenu	Volume sortant — Drain	Volume sortant — Débordement
Qualité	54,3 m ³	80,8 %	9,8 %	9,4 %
Qualité majorée	126,2 m ³	39,0 %	6,6 %	54,5 %
10 ans	115,3 m ³	32,1 %	0 %	67,9 %
10 ans majorée	405,6 m ³	10,6 %	0 %	89,4 %

D'après les résultats du tableau 6.7, il est clair que les saillies de trottoir n'ont pas un effet important sur l'écoulement à la conduite 5, située à l'exutoire du bassin versant pour tous les événements de pluie considérés, avec une réduction maximale du débit de pointe de 1,7 % pour la pluie qualité. Tout de même, elles permettent d'éviter la mise en charge (légère) en aval de la conduite 5 pour la pluie de 10 ans, comme le montrent la figure 6.7 et la figure 6.8.

À l'opposé, les résultats montrés au tableau 6.7, à la figure 6.5 et à la figure 6.6 montrent que les saillies diminuent le débit de pointe et le volume de ruissellement à la conduite 7 de façon notable, avec des valeurs maximales de 40,4 % et 29,3 % respectivement. Cette réduction est importante même pour les événements de pluie 1 dans 10 ans majorée (22,7 % et 24,6 %). Il faut souligner que cette conduite est surdimensionnée pour la superficie de drainage (24 po), ce qui fait que la réduction de la mise en charge n'a pas pu être mesurée à cette conduite puisqu'aucune mise en charge n'est obtenue pour les événements de pluie considérés.

Quant à la performance des saillies elles-mêmes, les résultats du tableau 6.8 indiquent une excellente réduction du volume ruisselé vers les saillies pour tous les événements de pluie considérés, avec un maximum de 80,8 % pour la pluie qualité. Par ailleurs, les résultats des simulations montrent que les saillies S1 et S2, S5 et S9 excèdent leur capacité d'évacuation pour la pluie qualité, même si celles-ci ont un effet important à la conduite 5. Les deux saillies positionnées en amont du même côté de la rue que la saillie S2 (S3 et S4) ne permettent donc pas de soulager complètement celle-ci. Pour les pluies de récurrence 10 ans et 10 ans majorés, une proportion importante du volume entrant déborde des ouvrages comme on pouvait s'y attendre.

Autre fait intéressant, les résultats des simulations montrent qu'en général, le taux d'infiltration dans le substrat est l'élément limitatif de la capacité d'évacuation des ouvrages. À titre d'exemple, le taux d'infiltration maximal à l'ouvrage S1 (qui déborde) est de 106,4 mm/h pour la pluie qualité tandis que la capacité calculée du drain est de 621 mm/h. De plus on note que pour la pluie 10 ans, la majorité de l'eau acheminée dans les ouvrages est évacuée par débordement et qu'aucun débit n'est évacué par le drain. Il semble donc que pour un événement de pluie intense et de relativement courte durée comme la pluie de Chicago, le taux d'infiltration du substrat est nettement insuffisant pour assurer le bon fonctionnement de l'ouvrage.

Au final, les résultats montrent une bonne efficacité des saillies dans la réduction du débit de pointe et du volume de ruissellement à la conduite 7, mais une efficacité presque nulle à l'exutoire du bassin versant modélisé.

6.4 Scénarios d'étude

Cette section présente les résultats des scénarios d'étude avec modifications aux saillies de trottoir planifiées. Tous les scénarios sont simulés avec les événements de pluie majorés. Seuls les résultats les plus importants sont décrits dans cette section.

6.4.1 Modification de la hauteur du réservoir en surface

La hauteur du réservoir en surface a été modifiée afin de permettre une accumulation d'eau de 150 et de 250 mm. La figure 6.9 et la figure 6.10 illustrent les hydrogrammes pour les pluie qualité et

les pluies de récurrence 10 ans à la conduite 7. Les hydrogrammes obtenus à la conduite 5 ne sont pas montrés puisqu'aucun effet n'a été obtenu à cette conduite.

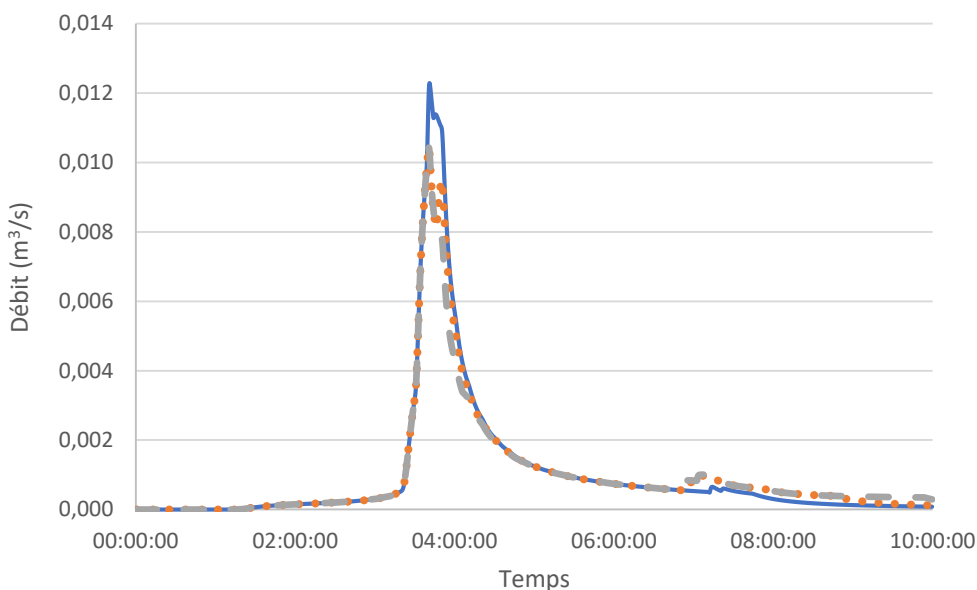


Figure 6.9: Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec hauteur du réservoir en surface augmentée — Pluie de contrôle qualité majorée

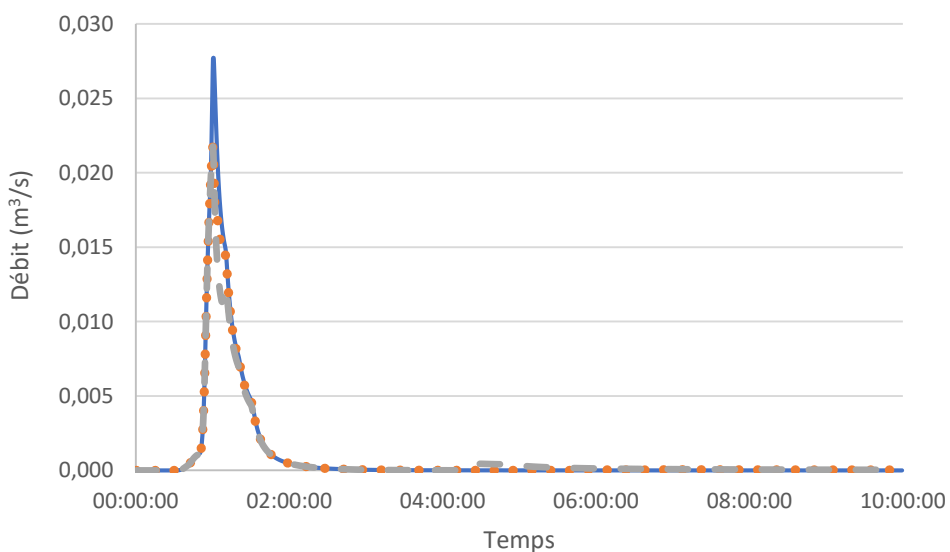


Figure 6.10: Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec hauteur du réservoir en surface augmentée — Pluie de 10 ans majorée

On remarque que le débit de pointe à la conduite 7 est réduit par rapport au scénario de base, comme le montrent la figure 6.9 et la figure 6.10. On note également que la réduction relative du débit de pointe est supérieure dans les scénarios avec la pluie 10 ans. Finalement, on constate sur ces figures que le débit n'est pas davantage réduit avec une hauteur de 225 mm qu'avec une hauteur de 150 mm pour les deux événements de pluie considérés.

Tableau 6.9: Réduction du débit de pointe par rapport au scénario avec saillies non modifiées à la conduite 7, avec hauteur d'accumulation augmentée

Pluie	Réduction Q_p (H= 150 mm)	Réduction V_r (H= 150 mm)	Réduction Q_p (H= 225 mm)	Réduction V_r (H= 225 mm)
Qualité majorée	15,2 %	< 1 %	15,2 %	< 1 %
10 ans majoré	21,6 %	3,7 %	21,6 %	3,9 %

6.4.2 Modification de la composition du substrat

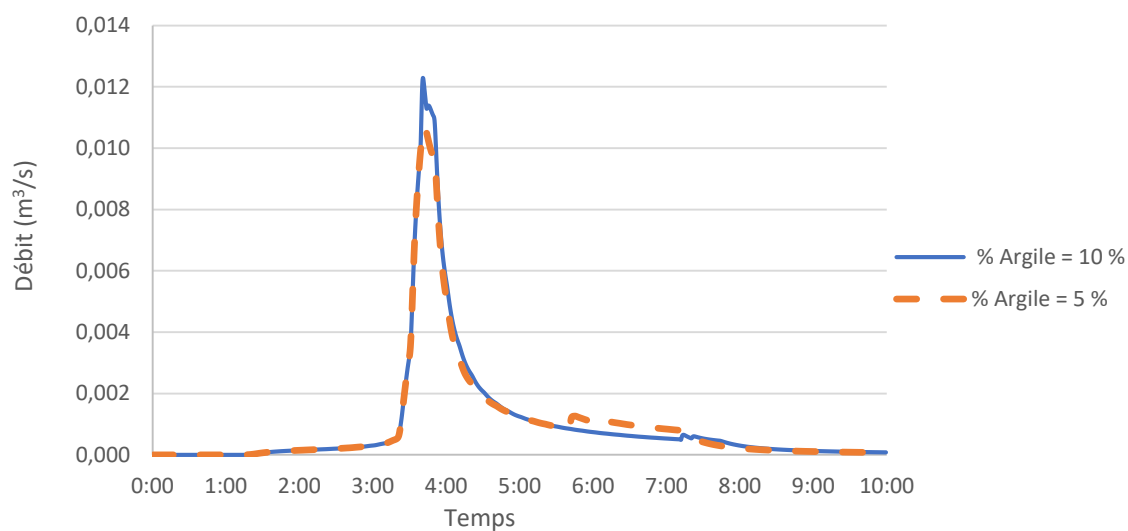


Figure 6.11: Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec composition du substrat modifiée
— Pluie de contrôle qualité majorée

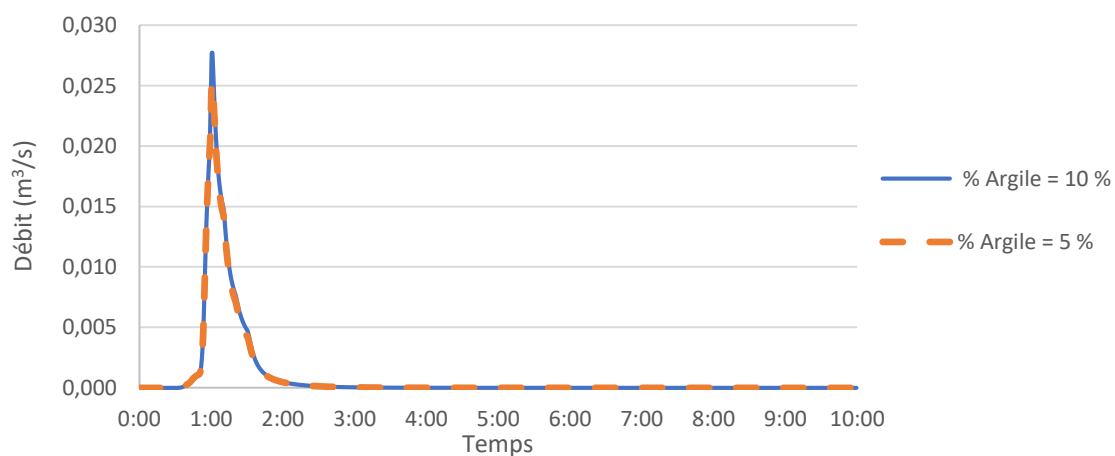


Figure 6.12 : Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec composition du substrat modifiée
— Pluie 10 ans majorée

Tableau 6.10 : Réduction du débit de pointe et du volume de ruissellement par rapport au scénario avec saillies non modifiées

Pluie	Réduction Q_p	Réduction V_r
Qualité majoré	13,3 %	1,5 %
10 ans majoré	9,3 %	4,6 %

6.4.3 Combinaison des deux modifications (H=225 mm + Argile = 5%)

La figure 6.13 et la figure 6.14 montrent que les hydrogrammes à la conduite 7, obtenus suite à la combinaison des deux modifications précédentes. Le tableau 6.11 présente quant à lui l'effet des saillies sur la performance de cette conduite.

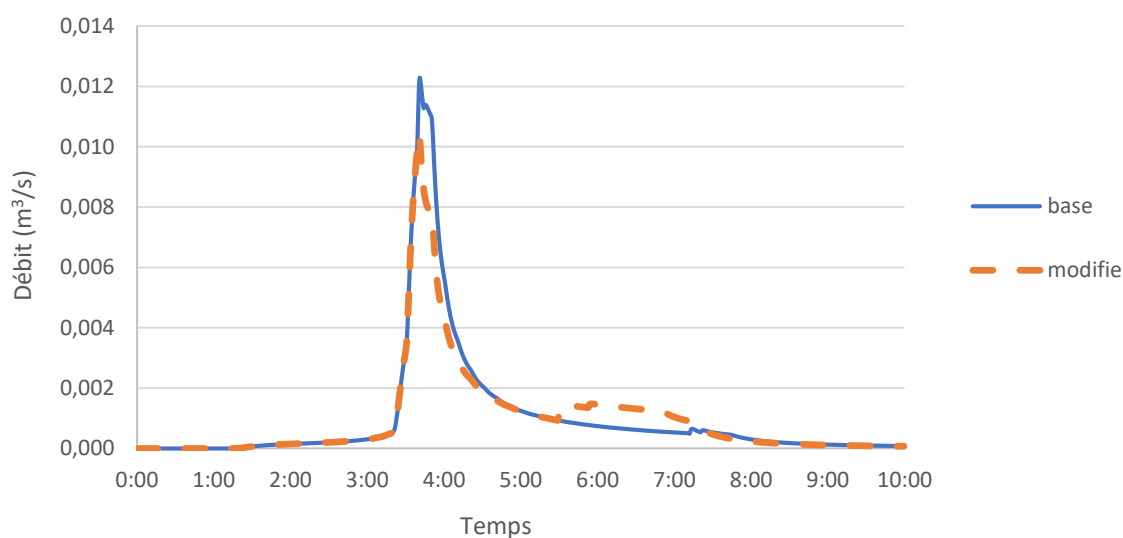


Figure 6.13 : Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec composition du substrat modifiée
— Pluie qualité majorée

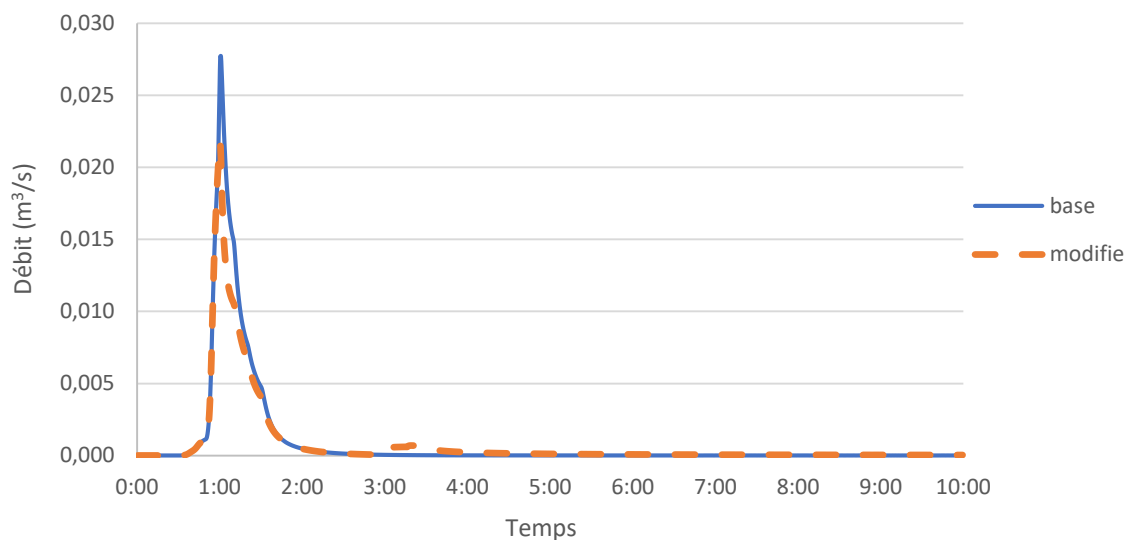


Figure 6.14 : Hydrogramme à la conduite 7 — Scénarios avec composition du substrat modifiée
— Pluie 10 ans majorée

Tableau 6.11 : Réduction du débit de pointe et du volume de ruissellement par rapport au
scénario avec saillies non modifiées

Pluie	Réduction Q_p	Réduction V_r
Qualité majorée	15,2 %	15,3 %
10 ans majoré	21,6 %	5,5 %

Les résultats de ce scénario montrent que la combinaison des deux modifications testées permet d'obtenir une réduction du débit de pointe ainsi qu'une réduction de volume intéressant, surtout pour l'événement de pluie qualité. Les avantages de chacune des modifications individuelles

pourraient donc être obtenus. Cependant, la combinaison des deux modifications ne permet pas d'obtenir une réduction du débit de pointe ou une réduction de volume supplémentaire.

6.4.4 Scénario avec saillies occupant 5 % de la superficie totale du bassin versant

Comme dernières simulations, l'aire totale des saillies telles que construites a été fixée à 5 % de l'aire totale du bassin versant afin de vérifier l'effet sur le débit de pointe à l'exutoire du bassin versant. Deux saillies fictives géantes ont été ajoutées pour ce test, qui récoltent la totalité de l'eau de ruissellement des rues en amont des saillies de trottoir planifiées (voir figure 6.2), à l'exception de l'eau des toits. Il s'agit donc d'une simulation visant à déterminer une valeur approximative de réduction du débit de pointe.

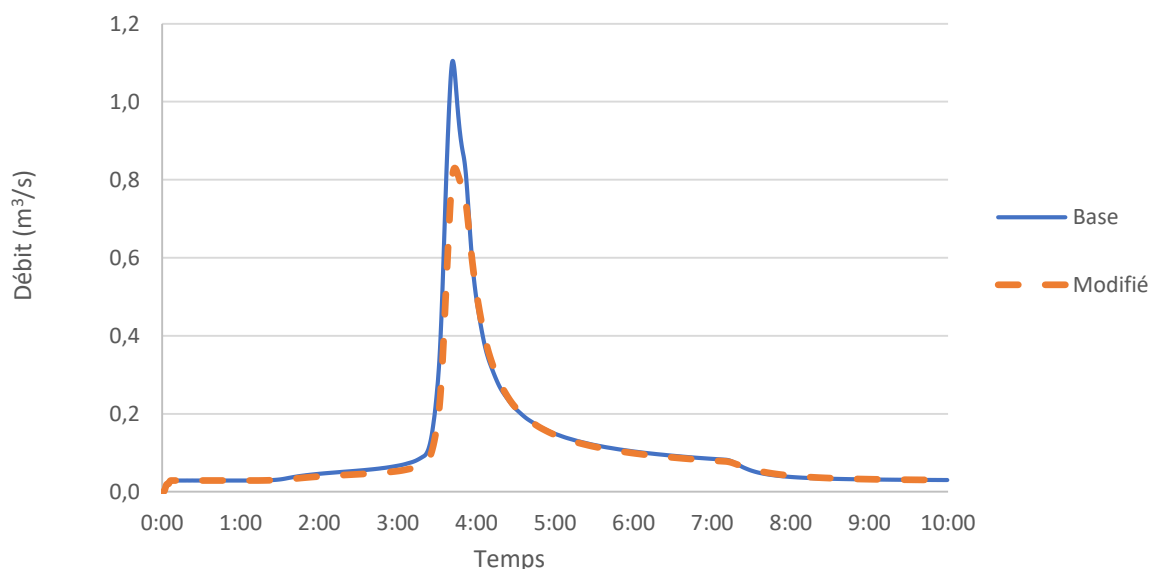


Figure 6.15 : Hydrogramme à la conduite 5 — Scénarios avec saillies occupant 5% de la superficie du bassin versant — Pluie qualité majorée

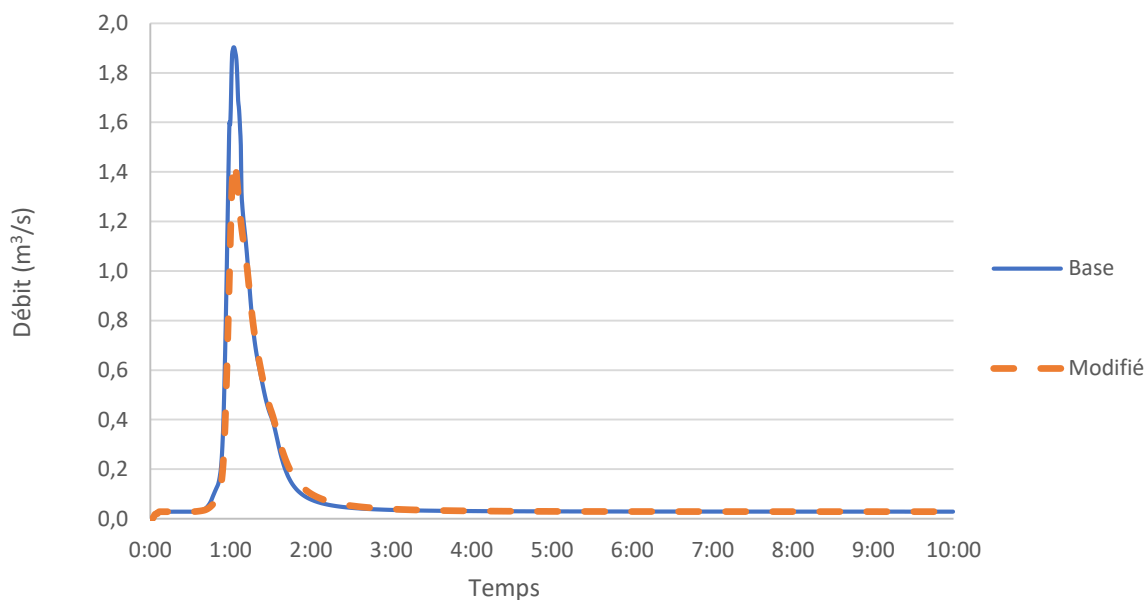


Figure 6.16 : Hydrogramme à la conduite 5 — Scénarios avec saillies occupant 5% de la superficie du bassin versant — Pluie qualité majorée

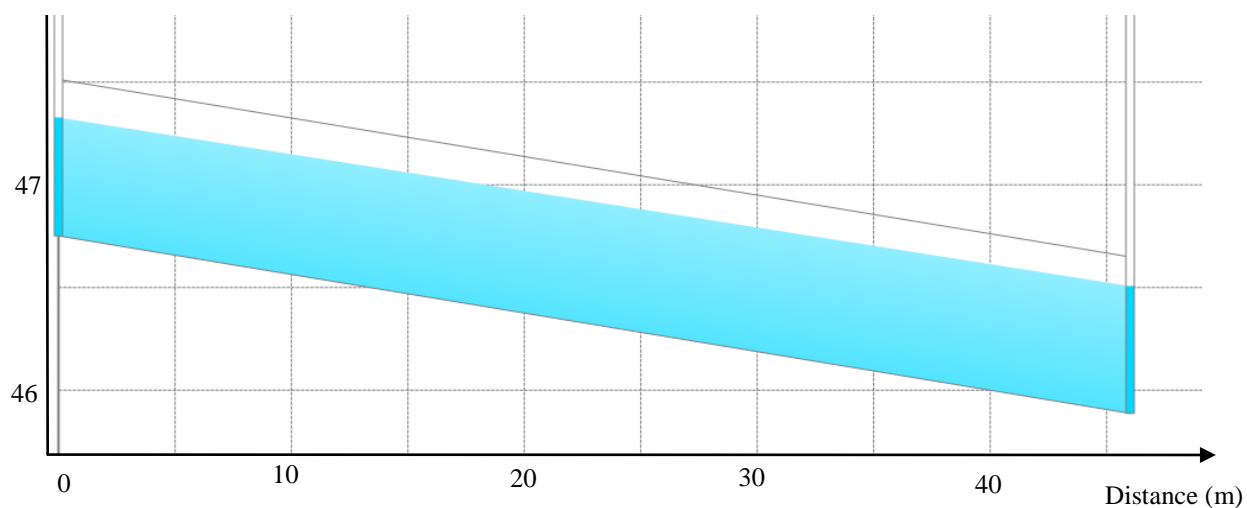
Tableau 6.12 : Réduction du débit de pointe par rapport au scénario sans saillies à la conduite 5, avec des saillies recouvrant 5 % du bassin versant

Pluie	Réduction Q_p
Qualité majorée	25 %
10 ans majorée	24 %

Les résultats montrent que l'ajout de saillies sur 5 % du bassin versant pourrait réduire le débit de pointe d'environ 25 % pour les deux événements de pluie considérés. Une telle réduction permettrait d'éviter la mise en charge de la conduite 5, tel que montré à la. Ces résultats se

rapprochent de la réduction du débit de pointe de 22,7 % obtenue à la conduite 7, avec les saillies sans modification pour la pluie de 10 ans majorée (voir tableau 6.7).

Figure 6.17 : Hauteur d'eau maximale à la conduite 5 pour une pluie de 10 ans majorée, avec des saillies recouvrant 5% de la superficie du bassin versant



6.5 Simulations microclimatiques

L'évolution de la température obtenue pour différents scénarios à la saillie no. 2 (voir figure 5.5) est montrée à la figure 6.18. Cette figure inclut les observations, les résultats de la situation actuelle ainsi que les scénarios sans saillie et avec ajout de 4 arbres. La figure 6.19 et la figure 6.20 montrent la variation de la température à 16h00.

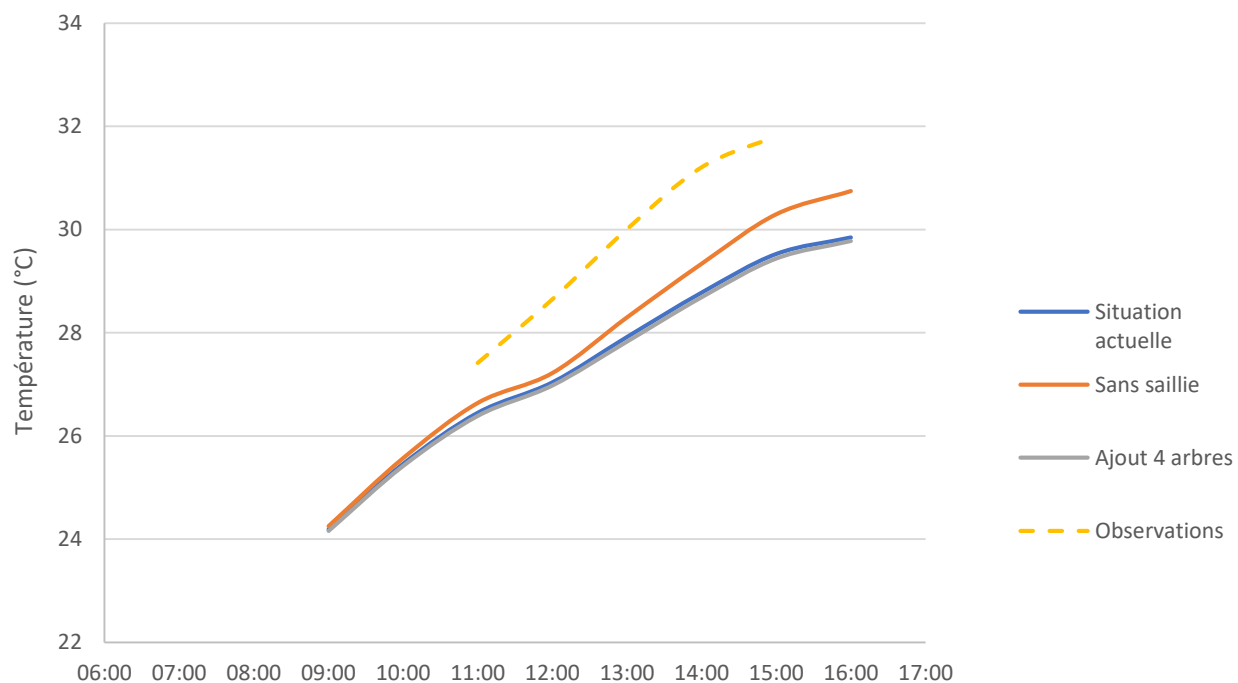


Figure 6.18 : Évolution de la température à la saillie 2

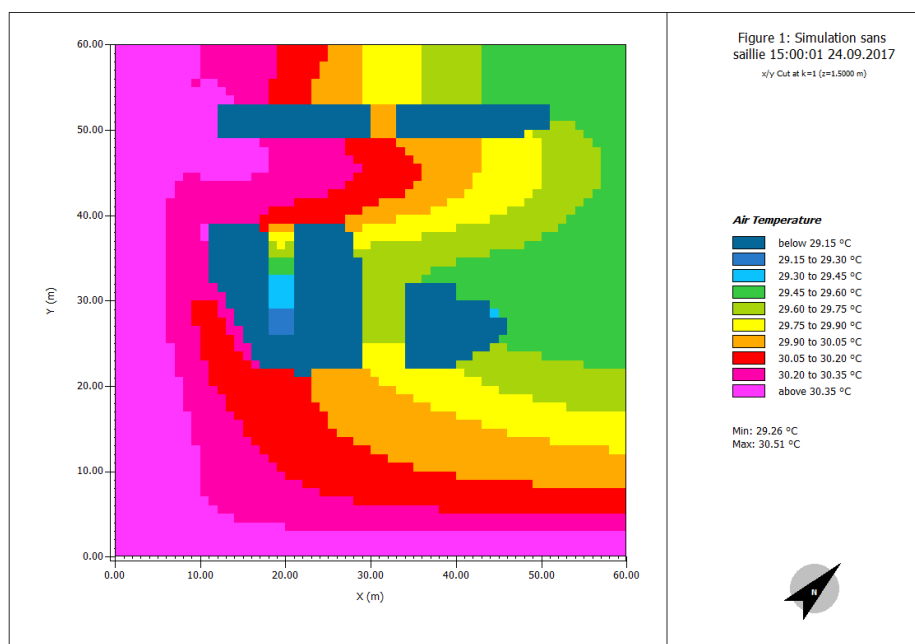


Figure 6.19 : Températures du scénario sans saillie à 15h00

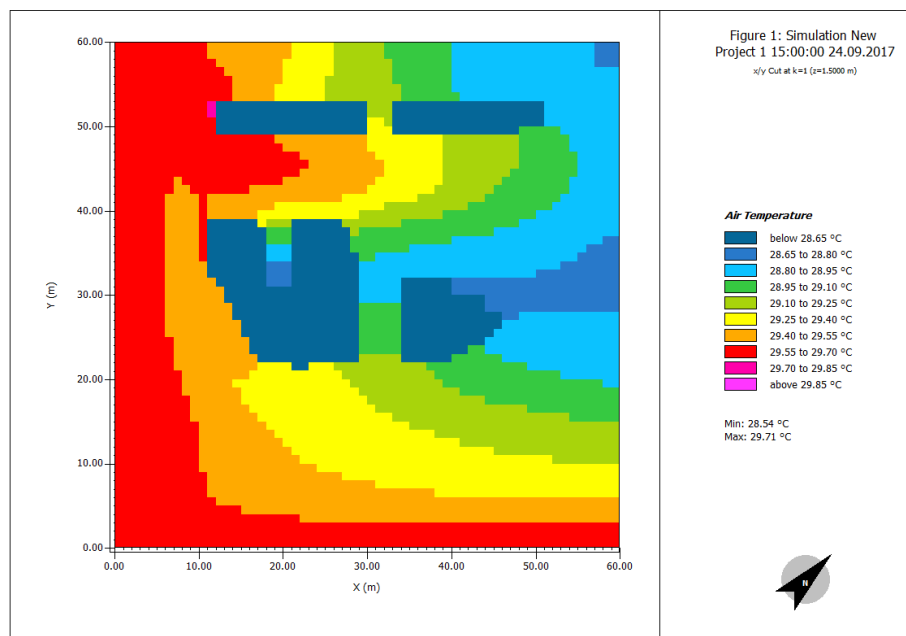


Figure 6.20 : Températures du scénario avec saillie à 15h00

On remarque à la figure 6.18 que le modèle sous-estime les températures mesurées. L'erreur moyenne calculée est de 1,5°C, ou 4,8%, ce qui est élevé en comparaison de l'écart entre les différents scénarios modélisés. On considère donc que les températures obtenues dans la modélisation devraient être abaissées de cette valeur.

En comparant la situation actuelle et le scénario sans saillie, on voit que les saillies ont un effet mesurable sur la température, avec une réduction maximale de 0,90 °C au point de la saillie. L'ajout d'arbres n'a pas eu d'effet significatif, avec une réduction de 0,09°C par rapport aux saillies actuelles. Il semble donc possible de diminuer la température de façon mesurable en ajoutant des saillies. Toutefois, il faut rappeler que toute la végétation a été remplacée par du béton dans le scénario sans saillie, et que l'ajout d'arbre sans aucune saillie pourrait également être efficace.

6.6 Sources d'erreurs et limites de l'étude

Les principales sources d'erreurs et limites de cette étude ont déjà été mentionnées dans les parties qui précèdent cette section. Cette dernière résume les plus importantes d'entre-elles.

Comme mentionné précédemment, de nombreuses sources d'erreur ont pu affecter la qualité des données récoltées. C'est notamment le cas des données hydrauliques, qui ont été récoltées dans un égout unitaire ce qui a créé des conditions difficiles pour les mesures. Notamment, l'apport élevé en sédiments, en déchets et autres objets a pu bloquer les sondes ou affecter l'écoulement, faussant les données. Par exemple, il a été observé durant une descente dans l'égout de vérification des sondes qu'une épaisseur importante de gravier, d'environ 10 cm était présente dans une des conduites, dans laquelle aucun débitmètre n'était toutefois installé. La collecte de données redondantes a permis de contrôler cette source d'erreur et de rejeter certaines données, en vérifiant la cohérence des débits obtenus. À titre d'exemple, il a été constaté qu'à certains moments, les débits mesurés à l'exutoire étaient inférieurs aux débits mesurés beaucoup plus en aval. Cet exemple montre par ailleurs l'importance de recueillir des données redondantes.

L'absence de calibration sur le site est une autre source d'erreur importante dans les mesures, qui a été minimisée en calibrant les instruments en laboratoire. Dans le cas idéal, il aurait été souhaitable pour ce faire d'obtenir des mesures de vitesses fiables dans l'égout ce qui n'est pas simple. Cette source d'erreur, combinée à l'obstruction possible des sondes contribue à l'incertitude élevée sur les débits, de 30 %, qui a été calculée au chapitre 4.

Certaines sources d'erreurs liées à la modélisation ont également pu affecter les résultats. Les principales d'entre-elles sont bien documentées dans plusieurs ouvrages comme James (2005). Pour ce qui est du cas d'étude, il faut mentionner plus particulièrement la calibration du modèle numérique, qui n'a pas pu être réalisée à partir d'un événement de pluie important. Cependant, les paramètres du modèle ont été ajustés selon une plage réaliste, ce qui devrait conduire à une représentation assez réaliste des débits. De plus, des mesures à davantage d'endroits dans le réseau auraient permis de mieux assurer la représentativité des résultats aux points intermédiaires. Cependant, les ressources matérielles limitées n'ont pas permis d'installer davantage de débitmètres.

Il faut rappeler que les résultats des simulations se rapportent à certaines hypothèses de base, ce qui limite l'applicabilité des résultats à certains cas. Notamment, l'influence de l'évaporation n'a pas été prise en compte dans la modélisation hydraulique. Cette hypothèse est acceptable pour mesurer le débit lors d'événements de pluie isolés comme dans le cas à l'étude. Elle constitue

cependant une source d'incertitude pour le calcul de la réduction de volume de ruissellement par les saillies de trottoir, puisque celles-ci prennent plus de 24h à se vider dans les simulations. On peut également rappeler que l'on a uniquement considéré ces premières 24h, au bout desquelles le débit de sortie des ouvrages est tout de même très faible.

De plus, les simulations ont été réalisées en supposant le cas où les saillies fonctionnent parfaitement bien, c'est-à-dire sans colmatage par les sédiments, sans compactage excessif, sans blocage par le gel. Les résultats devraient donc être interprétés comme une mesure de la performance possible plutôt que comme une performance réelle à long terme.

Finalement, la modélisation microclimatique comporte également certaines limites. En effet, cette étude ne permet pas de déterminer si les saillies peuvent diminuer l'effet d'îlot de chaleur, qui est un phénomène qui se produit à plus grande échelle que la zone étudiée. Elle ne permet pas non plus de réellement mesurer l'effet sur le confort thermique des piétons, qui doit être évaluée avec d'autres variables comme l'humidité et la température radiative moyenne (« mean radiant temperature »).

CHAPITRE 7 CONCLUSIONS

7.1 Synthèse des résultats

Au final, ce travail de recherche a permis d'atteindre les objectifs de recherche fixés au départ. Une campagne de mesures a été menée, au cours de laquelle des mesures de hauteur, de vitesse et de température ont été récoltées. Ce qui a permis d'atteindre l'objectif spécifique 1.

Par la suite, les données hydrauliques ont permis de calibrer le modèle numérique d'un cas réel. Ce qui a permis d'atteindre l'objectif spécifique 2. Avec le modèle numérique construit, la performance hydraulique des saillies planifiées a été mesurée et des scénarios fictifs ont été simulés pour déterminer des améliorations possibles à apporter. Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

1. Les saillies planifiées n'ont pas d'effet significatif à l'exutoire de la zone d'étude, car la réduction du débit de pointe maximale qu'elles apportent n'est que de 1,7 % pour la pluie qualité et la réduction de volume est négligeable. En augmentant la superficie des saillies à 5 % de la superficie du bassin versant, la réduction du débit de pointe obtenue atteint environ 25 % par rapport au scénario sans saillie.
2. Les saillies planifiées ont un effet important seulement au niveau du sous-bassin versant étudié, avec une réduction du débit de pointe variant entre 40,4 % et 22,7 % et une réduction de volume variant entre 24,6 % et 29,3 % pour les différents événements de pluie étudiés.
3. Les saillies ont également été testées pour en faire des ouvrages de biorétention performants du point de vue du contrôle quantitatif. Des modifications au substrat ainsi qu'à la hauteur d'eau maximale d'accumulation ont été testés. Parmi ces modifications, le relèvement de la hauteur maximale est la plus efficace pour la réduction de débit de pointe, mais aucun gain n'est obtenu en faisant passer la hauteur de 150 mm à 225 mm. La réduction du débit de pointe est de 21,6 % par rapport aux scénarios avec saillies non modifiées pour la pluie de 10 ans majorée, tandis que le gain en réduction de volume est faible, soit de 3%.

4. Selon une simulation préliminaire, les saillies construites pourraient permettre de réduire la température d'environ 0,9°C aux alentours de celles-ci. Il s'agit cependant d'un calcul théorique et cette valeur devrait faire l'objet de validation par d'autres études.

Ces résultats permettent d'atteindre l'objectif spécifique 3. L'objectif spécifique 4 est quant à lui atteint avec les recommandations présentées dans la section qui suit.

7.2 Recommandations

La revue de littérature réalisée ainsi que les résultats des simulations numériques permettent de formuler certaines recommandations, pour améliorer la performance des saillies de trottoir végétalisées avec conception pour la rétention des eaux pluviales.

1. Pour le bon fonctionnement de l'ouvrage, il est important de s'assurer que les pentes du terrain acheminent l'eau aux saillies de façon efficace. Une dépression au point d'entrée devrait également être prévue.
2. Pour assurer l'efficacité en période hivernale, il est nécessaire d'appliquer les recommandations pour l'utilisation de la biorétention en climat froid. Notamment, un sol sableux devrait être privilégié afin de favoriser la vidange de l'ouvrage et d'éviter le gel.
3. Afin d'améliorer la performance hydraulique, il est recommandé de permettre une accumulation d'eau en surface d'au moins 150 mm, sans dépasser le seuil critique pour les plantes choisies.
4. Si les saillies de trottoir sont implantées dans un secteur où le contrôle qualitatif fait partie des objectifs de GEP, il est recommandé d'implanter de la biorétention dans les saillies de trottoir. La biorétention en saillie de trottoir peut être conçue de manière similaire aux saillies de trottoir avec rétention seulement, à la différence que le substrat et les végétaux doivent être choisis spécifiquement pour le contrôle qualitatif. Bien que cet aspect ne soit pas traité dans ce mémoire, les références énumérées dans la revue de la littérature fournissent des indications précises pour aider le concepteur à faire ces choix.

7.3 Améliorations et perspectives de recherche

Certaines étapes supplémentaires pourraient être entreprises afin de valider davantage les résultats de cette étude. Il serait notamment souhaitable de valider la modélisation numérique avec d'autres événements de pluie. La calibration pourrait également être améliorée en mesurant les débits lors d'un événement de pluie plus important. Également, une calibration automatique des paramètres individuels des sous-bassins (ou de petits groupes de paramètres) permettrait d'améliorer les résultats du modèle.

De nombreuses possibilités de recherche future peuvent être envisagées pour faire suite à ce projet de recherche. Celles-ci sont les suivantes :

1. **Prise en compte du contrôle quantitatif**. La possibilité de recherche la plus évidente concerne le contrôle qualitatif des saillies de trottoir, qui n'a pas été étudié dans ce travail. Il serait donc intéressant d'évaluer la performance quantitative de la biorétention en saillie de trottoir. Une telle étude pourrait être réalisée avec un projet pilote permettant l'échantillonnage de l'eau à la sortie d'une ou plusieurs saillies de trottoir. Une modélisation numérique pourrait également être utilisée.
2. **Combinaison avec d'autres PGO** : Un autre projet de recherche pourrait viser à étudier l'utilisation des saillies de trottoir en combinaison avec d'autres PGO dans la GEP. Par exemple, on pourrait s'intéresser à la possibilité de réduire les dimensions d'un bassin de rétention à l'exutoire d'un bassin ou d'éliminer celui-ci, ou encore de combiner cette PGO aux pavages perméables.
3. **Capacité de rétention selon le degré de saturation au préalable et évolution de cette capacité par temps sec** : Un autre aspect important à étudier serait d'évaluer la performance réelle d'une saillie de trottoir en fonction du degré de saturation en eau de l'ouvrage et également la recharge de la capacité dans le temps. Cet aspect pourrait être évalué à l'aide de simulations numériques en continu, en prenant en compte l'évapotranspiration et possiblement l'infiltration.
4. **Étude sur le confort thermique des piétons** : Davantage d'études sont également nécessaires pour évaluer la performance microclimatique des saillies de trottoir et des PGO.

Il serait intéressant d'étudier de manière plus complète l'effet des saillies sur le confort thermique, en prenant en compte d'autres variables mentionnées au chapitre 6.

5. **Étude des coûts** : Finalement, une étude comparative des coûts des saillies versus les autres alternatives (autres PGO, infrastructures grises) serait une étape nécessaire afin de convaincre les décideurs d'implanter davantage de saillies de trottoir avec rétention des eaux pluviales.

RÉFÉRENCES

- Acero, J. A., & Arrizabalaga, J. (2016). Evaluating the performance of ENVI-met model in diurnal cycles for different meteorological conditions. *Theoretical and Applied Climatology*. doi:10.1007/s00704-016-1971-y
- Acero, J. A., & Herranz-Pascual, K. (2015). A comparison of thermal comfort conditions in four urban spaces by means of measurements and modelling techniques. *Building and Environment*, 93, 245-257. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.028
- Aceves, M., & Fuamba, M. (2016). Methodology for Selecting Best Management Practices Integrating Multiple Stakeholders and Criteria. Part 2: Case Study. *Water*, 8(2), 56. Tiré de <http://www.mdpi.com/2073-4441/8/2/56>
- Alcoforado, M. J., & Andrade, H. (2008). Global Warming and the Urban Heat Island. Dans J. M. MarzluffE. ShulenbergW. EndlicherM. AlbertiG. BradleyC. RyanU. Simon & C. ZumBrunnen (édit.), *Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature* (p. 249-262). Boston, MA: Springer US.
- Ashley, R. M., Nowell, R., Gersonius, B., & Walker, L. (2011). A review of current knowledge: Surface Water Management and Urban Green Infrastructure. Tiré de <http://www.fwr.org/greeninf.pdf>
- Bella, F., & Silvestri, M. (2015). Effects of safety measures on driver's speed behavior at pedestrian crossings. *Accid Anal Prev*, 83, 111-124. doi:10.1016/j.aap.2015.07.016
- Bennis, S., Bengassem, J., & Lamarre, P. (2003). Hydraulic Performance Index of a Sewer Network. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(7), 504-510. doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:7(504)
- Bertrand-Krajewski, J.-L., Laplace, D., Joannis, C., & Chebbo, G. (2000). *Mesures en hydrologie urbain et assainissement*. Paris: Éditions TEC et DOC.
- Brière, F. G. (2012). *Distribution et collecte des eaux: François G. Brière* (3e éd. --^e éd.). Montréal: Presses Internationales Polytechnique.
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments. *Environmental Modelling & Software*, 13, 373-384.
- Burian, S., & Edwards, F. (2002). *Historical Perspectives of Urban Drainage*. Communication présentée à 9th International Conference on Urban Drainage, Portland, Oregon, USA.
- Chocat, B., Abirached, M., Delage, D., & Faby, J. A. (2008). *État de l'art sur la gestion urbaine des eaux pluviales et leur valorisation: Tendances d'évolution et technologies en développement*. Tiré de http://www.aldeau.com/ouvrages_libres/21.pdf
- City of San Francisco. (2016). *Stormwater management requirements and design guidelines*. Tiré de <http://www.sfwater.org/Modules/ShowDocument.aspx?documentID=9026>
- Davis, A. P. (2008). Field Performance of Bioretention: Hydrology Impacts. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), 90-95. doi:doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(90)

- Dugué, M. (2010). *Conception d'un jardin de pluie : théorie et étude de cas*. (Polytechnique Montréal).
- Eckart, K., McPhee, Z., & Bolisetti, T. (2017). Performance and implementation of low impact development - A review. *Sci Total Environ*, 607-608, 413-432. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.06.254
- ENVI-met. (2018). ENVI-met Model Architecture. Tiré de <http://envi-met.info/doku.php?id=intro:modelconcept>
- EPA. (2017). *SWMM Reference Manual Volumes I-III*. Tiré de <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm#documents>
- Ermilio, J. R., & Traver, R. G. (2006). Hydrologic and Pollutant Removal Performance of a Bio-Infiltration BMP. Dans *World Environmental and Water Resource Congress 2006*.
- Fletcher, Andrieu, H., & Hamel, P. (2013). Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, 51, 261-279. doi:10.1016/j.advwatres.2012.09.001
- Fletcher, Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., . . . 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. doi:10.1080/1573062x.2014.916314
- Fuamba, M., Walliser, T., Daynou, M., Rousselle, J., & Rivard, G. (2010). Vers une gestion durable et integree des eaux pluviales : Une etude de cas pour le Quebec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(2), 224-235. doi:10.1139/L09-146
- Géhéniau, N., Fuamba, M., Mahaut, V., Gendron, M. R., & Dugué, M. (2015). Monitoring of a Rain Garden in Cold Climate: Case Study of a Parking Lot near Montreal. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(6), 04014073. doi:doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000836
- Giguère, M. (2009). *Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains*. Gouvernement du Québec
- Graf, W. H., & Altinakar, M. S. (2000). *Hydraulique fluviale: écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple ; Walter H. Graf ; en collaboration avec M.S. Altinakar* (2e éd. corrigée. --^e éd. vol. v. 16). Lausanne, [Suisse]: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Hamel, P., Daly, E., & Fletcher, T. D. (2013). Source-control stormwater management for mitigating the impacts of urbanisation on baseflow: A review. *Journal of Hydrology*, 485, 201-211. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.01.001
- Hatt, B. E., Fletcher, T. D., & Deletic, A. (2009). Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale. *Journal of Hydrology*, 365(3), 310-321. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.001>
- Hunt, W. F., Jarrett, A. R., Smith, J. T., & Sharkey, L. J. (2006). Evaluating Bioretention Hydrology and Nutrient Removal at Three Field Sites in North Carolina. *Journal of Irrigation and*

Drainage Engineering, 132(6), 600-608. doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:6(600)

James, W. (2005). *Rules for responsible modeling* (4th edition^e éd.).

Kratky, H., Li, Z., Chen, Y., Wang, C., Li, X., & Yu, T. (2017). A critical literature review of bioretention research for stormwater management in cold climate and future research recommendations. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(4). doi:10.1007/s11783-017-0982-y

LID SWM Planning and Design Guide contributors. (2018). Curb extensions: GalleryLID SWM Planning and Design Guide. Tiré de https://wiki.sustainabletechnologies.ca/wiki/Curb_extensions:_Gallery

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* (Rapport n° R-972). INRS-Eau, Terre et Environnement.

MDDEFP, & MAMROT. (2012). *Guide de gestion des eaux pluviales: Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain*. Tiré de <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide-gestion-eaux-pluviales.pdf>

MDDELCC. (2017). *Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales*.

MDDELCC. (2018). Une nouvelle Loi sur la qualité de l'environnement pour faire avancer le Québec de façon responsable au bénéfice de tous. Tiré de <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/lqe/autorisations/index.htm>

Mohajerani, A., Bakaric, J., & Jeffrey-Bailey, T. (2017). The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete. *J Environ Manage*, 197, 522-538. doi:10.1016/j.jenvman.2017.03.095

Montréal, V. d. (2018). *Géologie et épaisseur des dépôt meubles*. Tiré de <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/dataset/geologie-des-depots-meubles>

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., & Van Liew, M. W. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

Muthanna, T. M., Viklander, M., & Thorolfsson, S. T. (2008). Seasonal climatic effects on the hydrology of a rain garden. *Hydrological Processes*, 22(11), 1640-1649. doi:10.1002/hyp.6732

NACTO. (2018). Urban Street Stormwater Guide: Stormwater Curb Extension. Tiré de <https://nacto.org/publication/urban-street-stormwater-guide/stormwater-elements/green-infrastructure-configurations/stormwater-curb-extension/>

- Niazi, M., Nietch, C., Maghrebi, M., Jackson, N., Bennett, B. R., Tryby, M., & Massoudieh, A. (2017). Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 3(2). doi:10.1061/jswbay.0000817
- Ouranos. (2015). Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec (2015^e éd.).
- PGC, E. S. D., Maryland;. (2007). *Bioretention Manual*.
- Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., & Miller, N. (1983). Green‐ampt Infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(1), 62-70. doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:1(62)
- Rivard, G. (2005). *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain - Concepts et applications* (2^e éd.). Laval: Alias Communication Design.
- Saito, I., Ishihara, O., & Katayama, T. (1991). Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area. *Energy and Buildings*, 15-16 493-498.
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., & de Lieto Vollaro, A. (2016). Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society*, 26, 318-343. doi:10.1016/j.scs.2016.07.005
- Sebti, A. (2016). *Optimisation de l'implantation des pratiques de gestion optimales (PGO) dans les réseaux de drainage urbain: Anas Sebti*. Montréal École polytechnique de Montréal.
- Ville de Montréal. (2017). *PLAN D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DE L'AGGLOMÉRATION DE MONTRÉAL 2015-2020*. Tiré de http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/enviro_fr/media/documents/paccam_2015-2020_lesconstats.pdf

ANNEXE A EXEMPLES DE SAILLIES DE TROTTOIRS VÉGÉTALISÉES

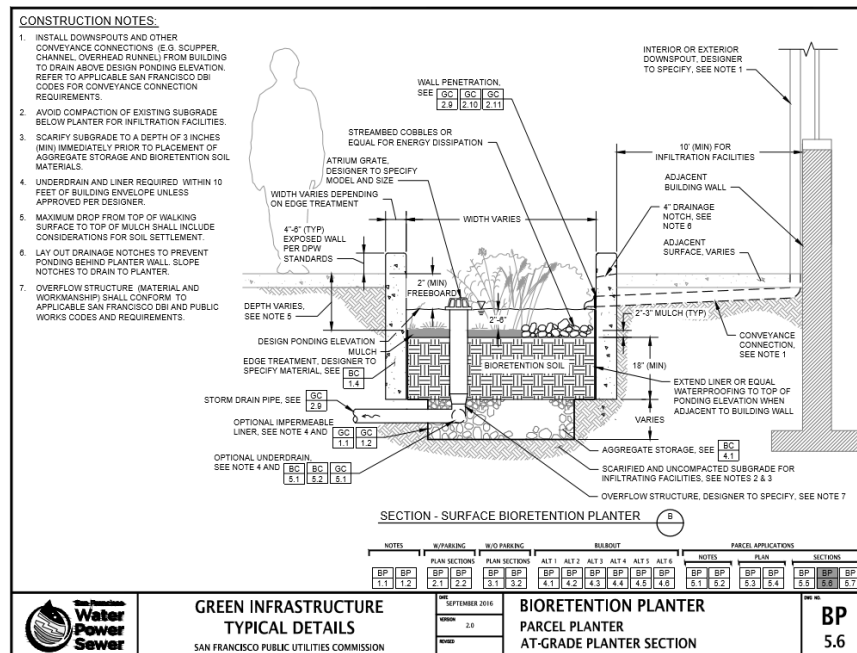
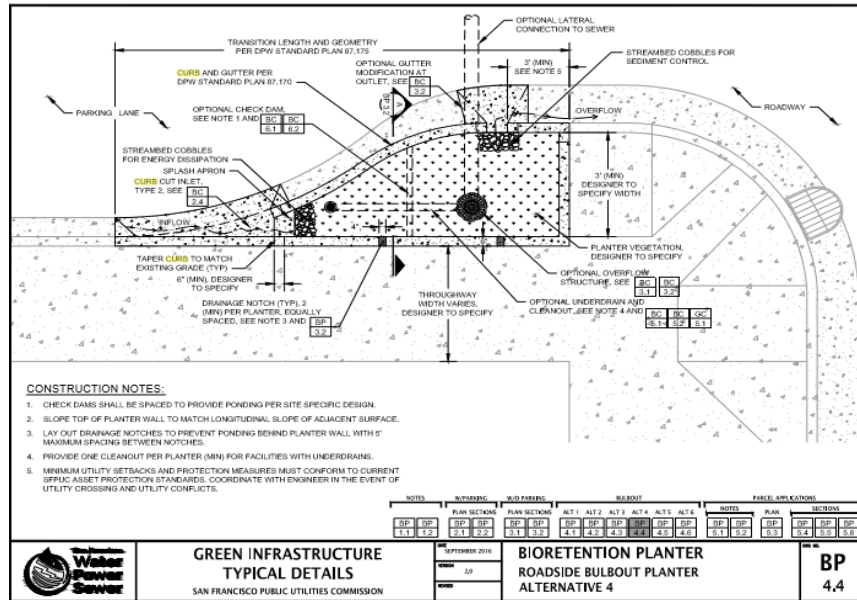


Figure A.1 Dessins technique de saillie de trottoir avec biorétention. Source : (City of San Francisco, 2016).



Figure A.2 : Exemple de saillie de trottoir végétalisée à Philadelphie utilisée dans la gestion des eaux pluviales. Tiré de (NACTO, 2018).



Figure A.3 : Saillie de trottoir avec biorétention, Victoria. Tiré de (LID SWM Planning and Design Guide contributors, 2018)

ANNEXE B PRÉSENTATION DU MODÈLE SWMM

Le modèle SWMM de l'EPA est un modèle de transformation pluie-débit qui permet de simuler l'alternance entre les événements de pluies et les périodes sèches. Strictement parlant, il s'agit d'un ensemble de modèles qui simulent distinctement le ruissellement de surface, l'infiltration, l'écoulement dans les conduites et l'évolution de la qualité de l'eau. L'emphasis de SWMM est portée vers les réseaux de drainage (Niazi et al., 2017) ce qui en fait un modèle adapté pour la conception et l'évaluation de la performance des réseaux d'égout, combinés ou unitaires. Pour la présente étude, SWMM a été choisi puisqu'il permet de modéliser des PGO comme la biorétention.

Les sections suivantes montrent un aperçu du fonctionnement de SWMM. Une description détaillée du modèle est présentée dans le manuel de référence de SWMM en 3 tomes (EPA, 2017).

Ruissellement de surface

Le modèle de ruissellement de SWMM permet de simuler l'écoulement en nappe sur la surface du sol généré par un événement de pluie. L'hydrogramme de ruissellement est généré en tenant compte de différents processus physiques dont l'infiltration, l'évapotranspiration et l'interception. La modélisation s'appuie sur une discrétisation du bassin-versant en sous-bassins, qui sont représentés comme des réservoirs dont la hauteur d'eau est uniforme sur leur superficie et variable dans le temps. L'équation suivante, obtenue par bilan volumétrique permet de calculer le débit de ruissellement :

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (\text{B.1})$$

Où :

d : hauteur d'eau accumulée sur le sol (m)

i : précipitations (m/s)

e : évaporation (m/s)

f : infiltration (m/s)

q : débit de ruissellement (m/s)

t : temps (s)

Cette équation, appelée modèle du réservoir non-linéaire est résolue numériquement par pas de temps. Les termes i et e sont fournis par l'utilisateur et le terme d'infiltration f est calculé à partir d'un modèle distinct décrit plus bas. Le débit de ruissellement q est obtenu à partir de l'équation de Manning, qui s'exprime comme suit:

$$Q = \frac{1}{n} J_f^{\frac{1}{2}} R_h^{\frac{2}{3}} A_x \quad (\text{B.2})$$

Où

Q : Débit de ruissellement par unité de surface (m^3/s)

J_f : Pente moyenne du sous-bassin

R_h : Rayon hydraulique

A_x : Section d'écoulement

n : Rugosité de Manning

Pour conclure cette sous-section, les principales hypothèses sous-jacentes au modèle de ruissellement sont énoncées :

- L'écoulement est supposé uniforme et de section rectangulaire
- La pente et la largeur d'écoulement sont les même pour les parties perméable et imperméable des sous-bassin (les rugosités de Manning peuvent être distinctes et la hauteur d'eau accumulée d est calculée séparément à chaque pas de temps)
- La capacité hydraulique des points d'entrée (regards ou puisards) est supposée illimitée. La totalité du ruissellement s'écoule donc vers un seul exutoire par sous-bassin.

Infiltration

L'infiltration dans SWMM est simulée à partir d'un modèle à part entière qui partage le même pas de temps que le modèle de ruissellement. Plusieurs choix de modèle d'infiltration sont offerts à l'utilisateur dont le modèle de Green-Ampt, la méthode SCS et le modèle de Horton. C'est cette dernière option qui est choisie pour cette étude en raison de la disponibilité des paramètres dans la littérature pour la zone d'étude.

Le modèle de Horton permet d'exprimer l'évolution de la capacité d'infiltration en fonction du temps avec l'équation suivante :

$$f_p = f_\infty + (f_0 - f_\infty)e^{-k_d t} \quad (\text{B.3})$$

Où

f_p : Capacité d'infiltration (m/s)

f_∞ : Capacité d'infiltration minimale (m/s)

f_0 : Capacité d'infiltration initiale (m/s)

k_d : Coefficient de décroissance (s^{-1})

t : Temps écoulé depuis le début de l'événement de pluie (s)

Ce modèle s'appuie sur l'hypothèse que la capacité d'infiltration f_p diminue uniquement en fonction du temps, indépendamment de l'intensité de la pluie. L'équation sous cette forme n'est donc pas adaptée pour les pluies de faible intensité puisque la diminution de f_p est dans ce cas surestimée. SWMM apporte cependant une correction à ce problème en ajustant le taux de diminution de f_p au volume réel infiltré, ce qui permet l'utilisation de cette équation avec des événements de pluie d'intensité plus faible.

Modèle hydraulique

SWMM modélise le réseau de canalisations comme un ensemble de nœuds et de liens interconnectés. À chaque pas de temps (différents des pas de temps du ruissellement), SWMM

calcule les niveaux d'eau aux nœuds et les débits dans les conduites à partir des principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Les équations utilisées sont les suivantes :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{B.4})$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial t} + gAJ_f = 0 \quad (\text{B.5})$$

$$\sum Q_{in} - \sum Q_{out} = \frac{\partial V}{\partial t} \quad (\text{B.6})$$

Où Q_{in} et Q_{out} représentent les débits entrant et sortant, J_f représente la pente d'énergie et V représente le volume d'eau accumulé au nœud. Les équations 1 et 2 sont appelées équations de Saint-Venant et décrivent l'écoulement dans une conduite tandis que l'équation 3 exprime la continuité entre les conduites du réseau. La résolution de ces équations nécessite la spécification de conditions initiales et de conditions frontières qui sont présentées au Tableau B.1.

Tableau B.1: Conditions initiales et frontières du modèle hydraulique de SMWW

Paramètre	Éléments du réseau	Type de condition
Débit initial	Liens	Initiale
Niveau d'eau	Nœuds	Initiale et frontière
Type de section de contrôle	Nœuds de sortie	Frontière

Tel que défini dans le manuel SWMM et par (Graf & Altinakar, 2000), les équations de Saint Venant reposent sur les hypothèses suivantes :

- La pression est hydrostatique
- La pente de la conduite est faible

- L'écoulement est unidimensionnel et non-permanent
- Les pertes de charge sont calculées de la même manière que pour un écoulement permanent et uniforme, avec l'équation de Manning

Modélisation de la biorétention

La biorétention est modélisée dans SWMM comme un ensemble de trois couches, qui sont schématisées à la Figure B.1.

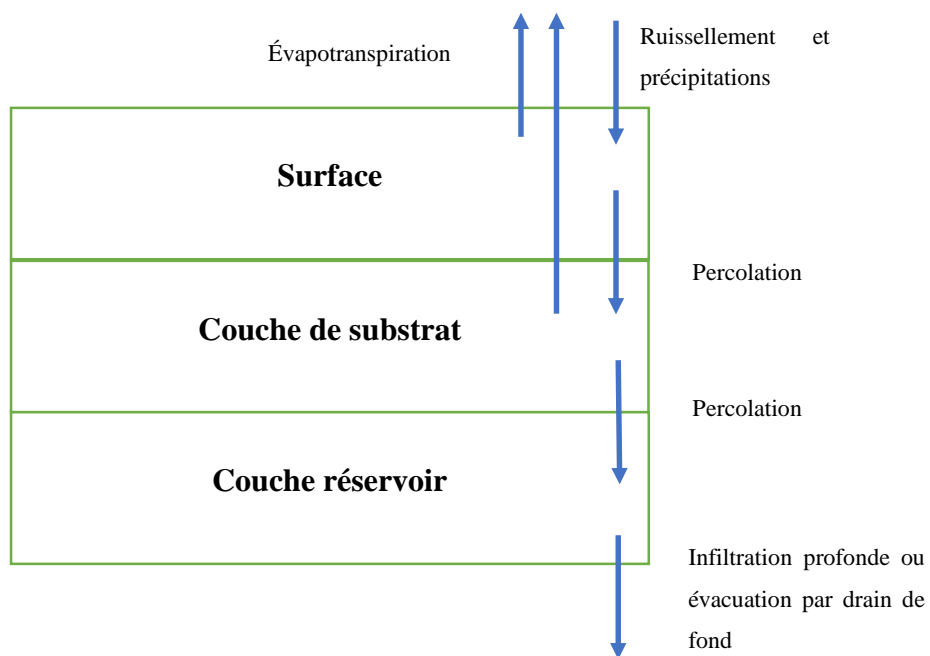


Figure B.1 : Schémas des flux d'eau modélisés dans SWMM

Tel que défini dans le manuel SWMM, les hypothèses sont les suivantes :

- La section d'écoulement vertical est constante
- L'écoulement est unidimensionnel
- Le ruissellement en entrée est réparti uniformément sur la surface
- Le contenu en eau du substrat est réparti uniformément dans la couche

L'écoulement entre deux couches est évalué selon la continuité, ce qui s'exprime par une équation de la forme suivante pour chaque couche :

$$\phi \frac{\partial d}{\partial t} = q_e + f_e - e - f_s - q_s \quad (\text{B.7})$$

Où :

ϕ : porosité (sans dimension)

d : Volume d'eau (m)

q_{in} : Débit de ruissellement (m/s) (couche de surface seulement)

f_e : Infiltration provenant de la couche supérieure (m/s)

e : Évapotranspiration (m/s)

f : Infiltration vers la couche inférieure (m/s)

q_{out} : Débit évacué par le drain de fond (m/s) (couche réservoir seulement)

Dans cette équation, l'infiltration f dans le substrat est calculée comme un front humide qui se déplace verticalement vers le bas, ce qui peut s'exprimer avec l'équation de Green-Ampt:

$$f = K \left(1 + \frac{(\phi - \theta)(d + \psi)}{F} \right) \quad (\text{B.8})$$

Où :

K : Conductivité hydraulique à saturation du substrat (m/s)

θ : Teneur en eau de la partie humide (sans unité)

ψ : Succion matricielle (m)

F : Volume infiltré cumulatif (m)

ANNEXE C RÉSULTATS DU MODÈLE SWMM

1. Aménagements sans modification

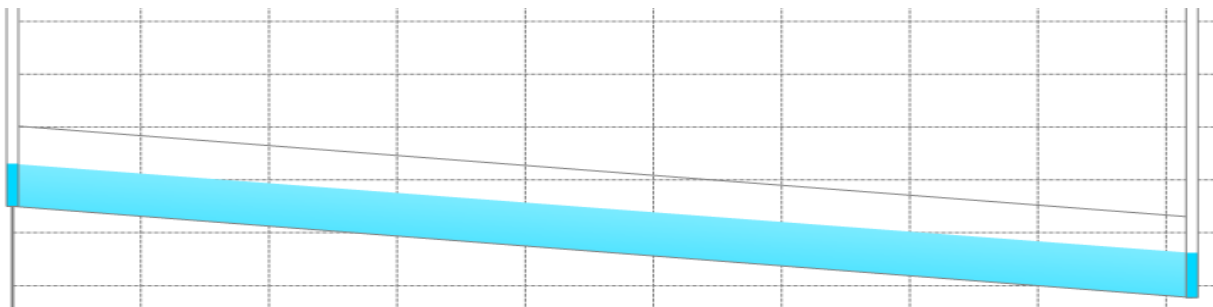


Figure C.1 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie qualité – Avec saillies

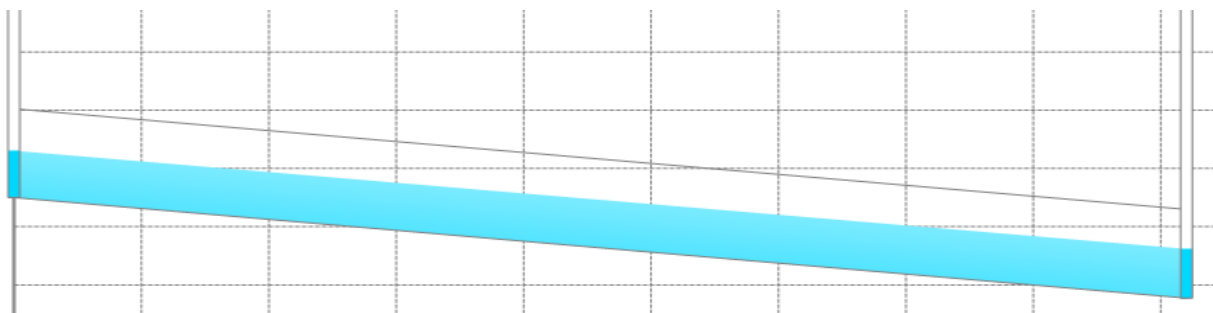


Figure C.2 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie qualité – Sans saillies

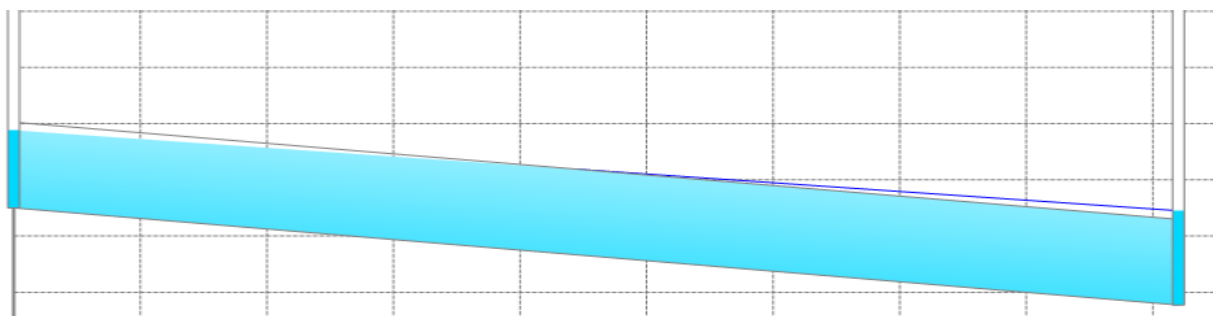


Figure C.3 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans – Sans saillie

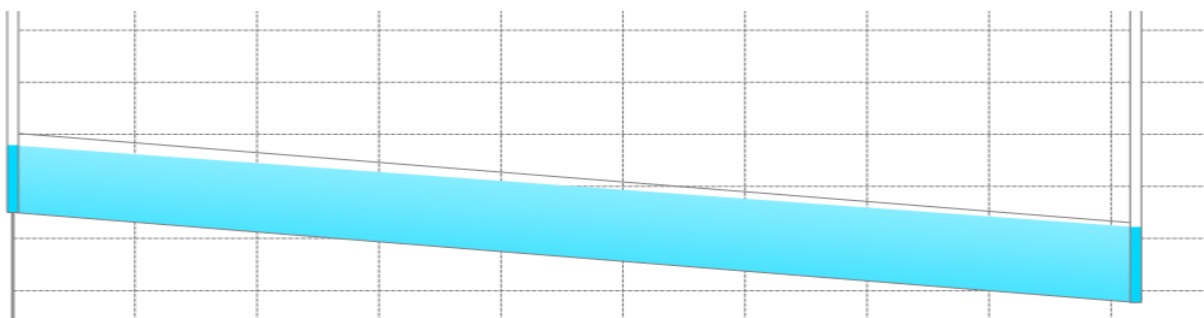


Figure C.4 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans – Avec saillies

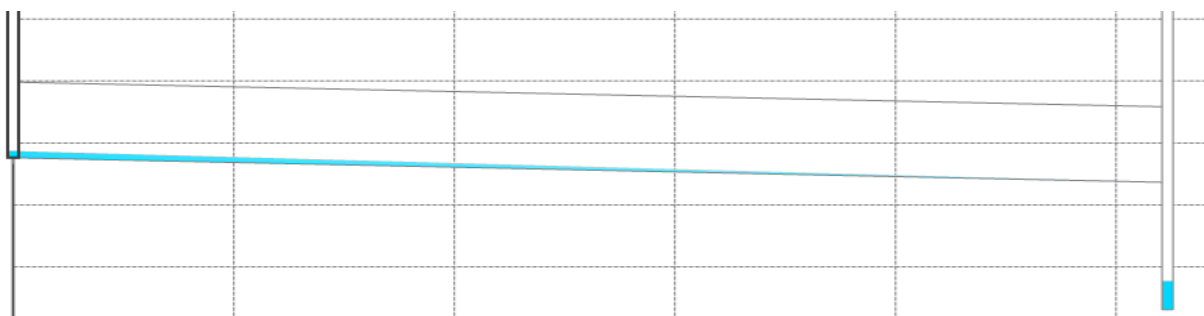


Figure C.5 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie qualité – Sans saillie

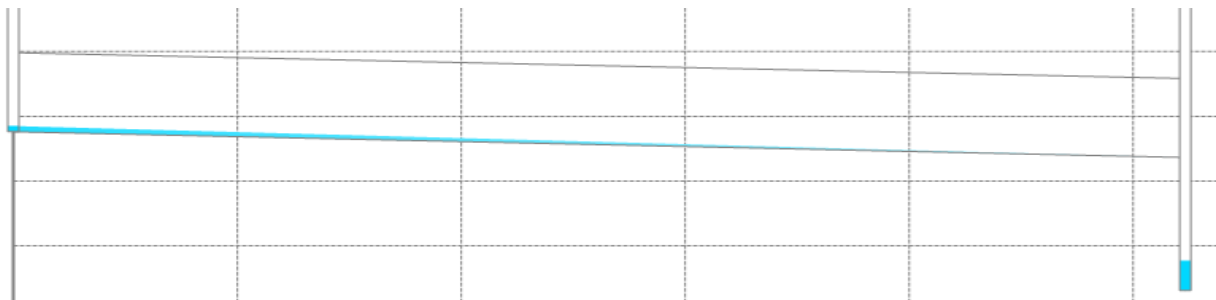


Figure C.6 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie qualité – Avec saillies

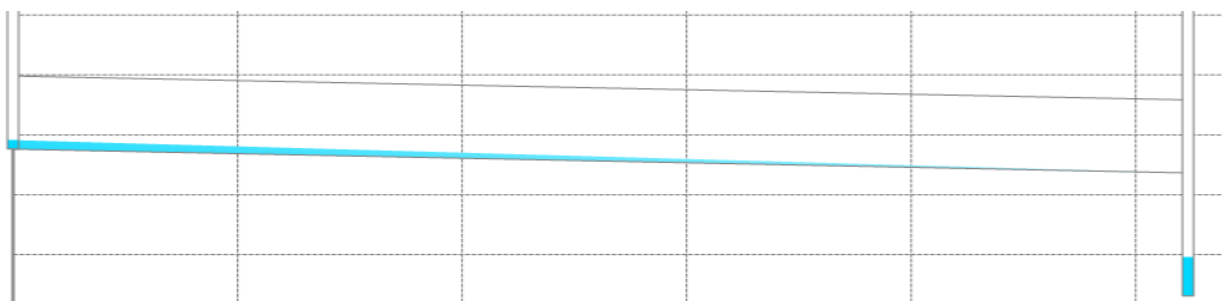


Figure C.7 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie 10 ans – Sans saillie

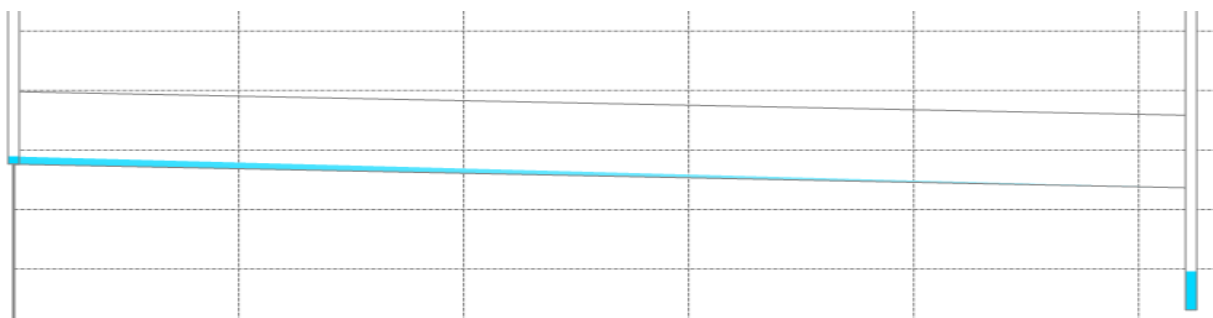


Figure C.8 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie 10 ans – Avec saillies

2. Aménagements sans modification, pluie majorée

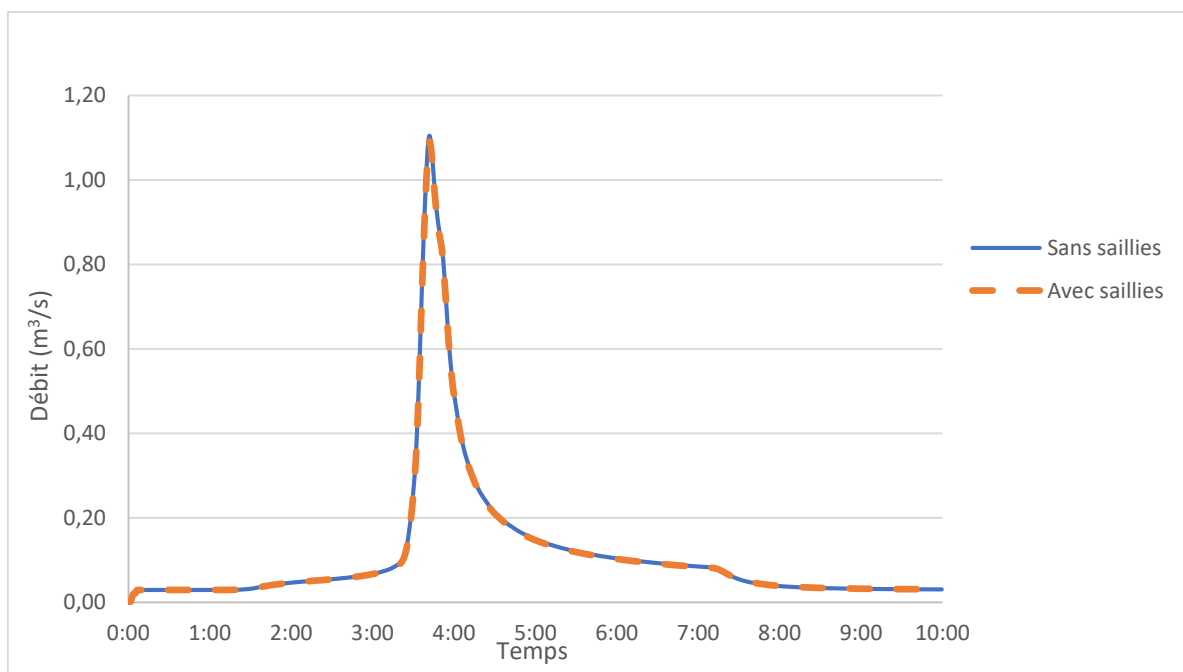


Figure C.9: Hydrogramme – Pluie qualité majorée – Conduite 5

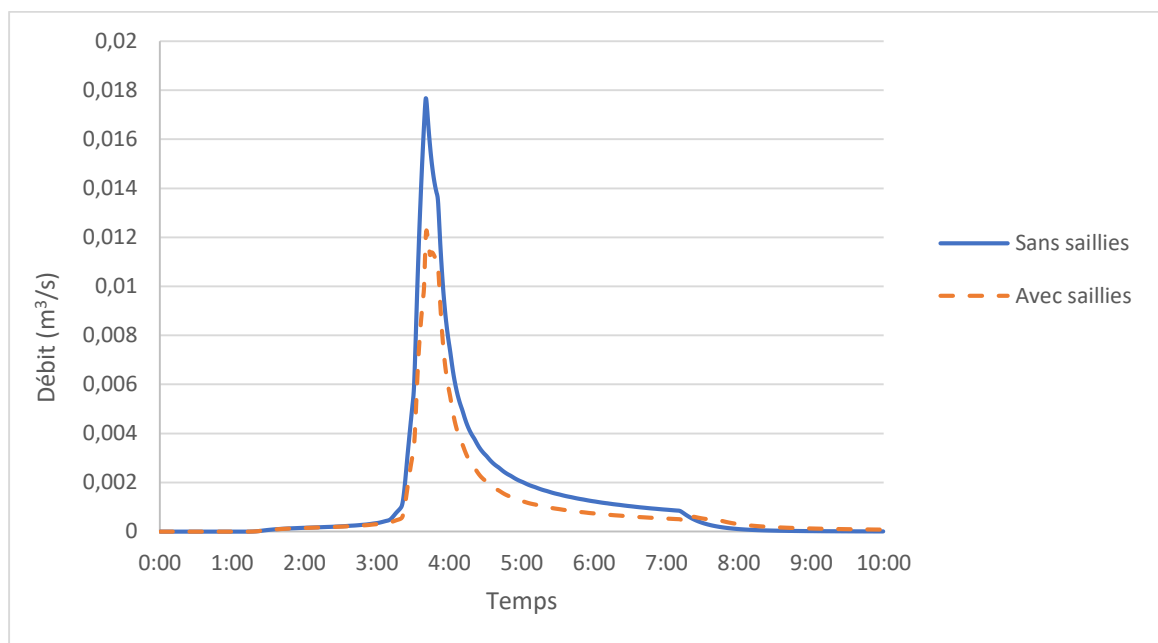


Figure C.10 : Hydrogramme – Pluie qualité majorée – Conduite 7

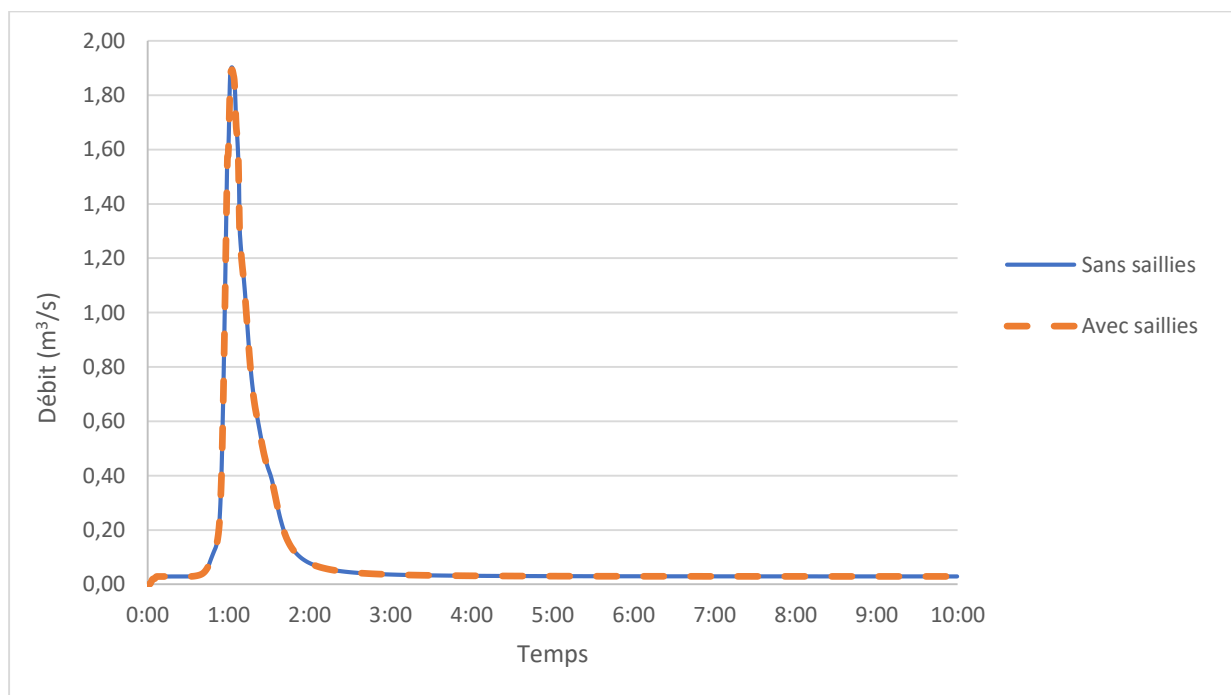


Figure C.11 : Hydrogramme – Pluie 10 ans majorée – Conduite 5

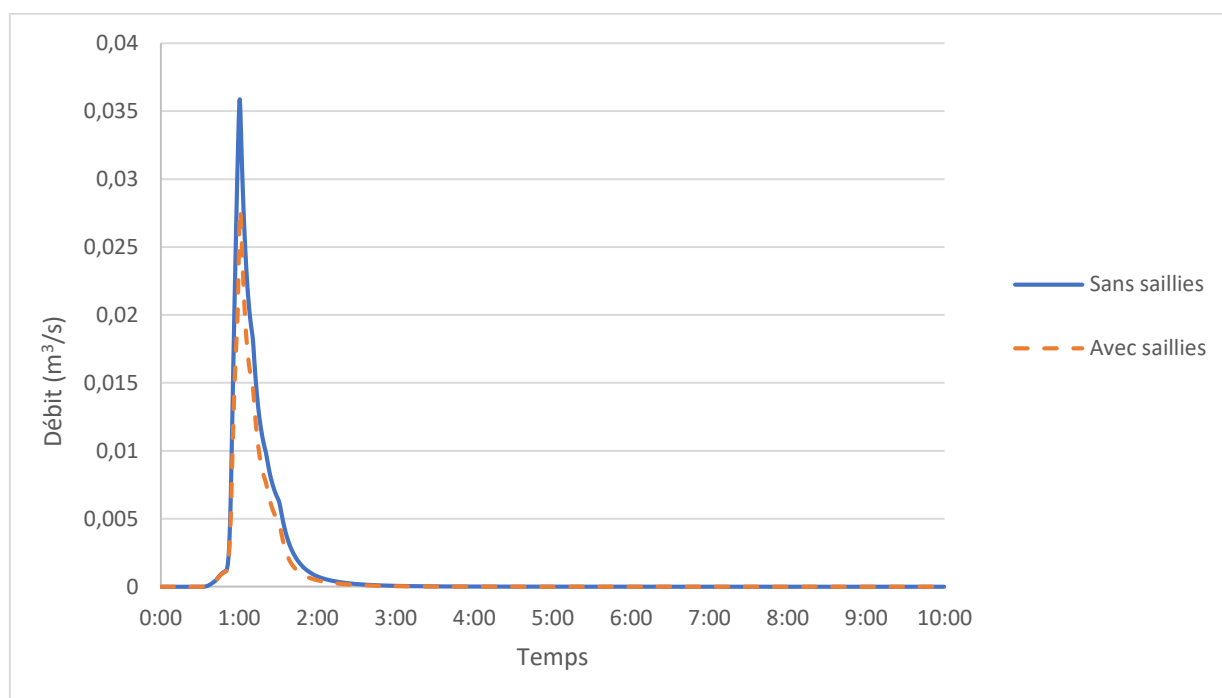


Figure C.12: Hydrogramme – Pluie 10 ans majorée – Conduite 7

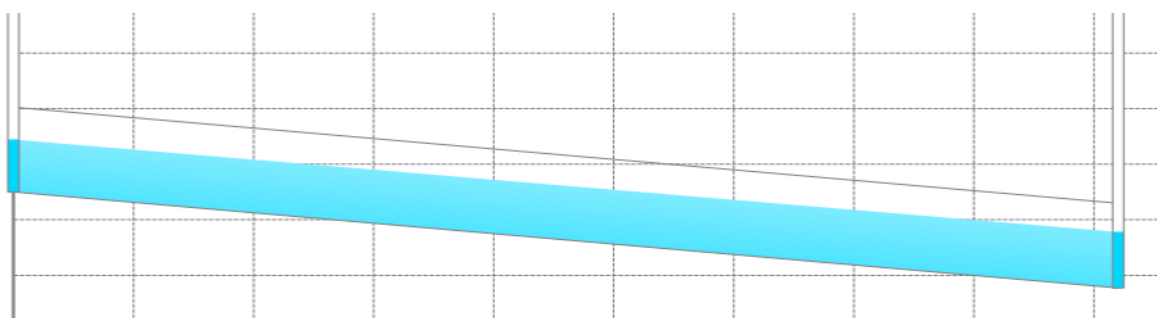


Figure C.13 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie qualité majorée – Sans saillies

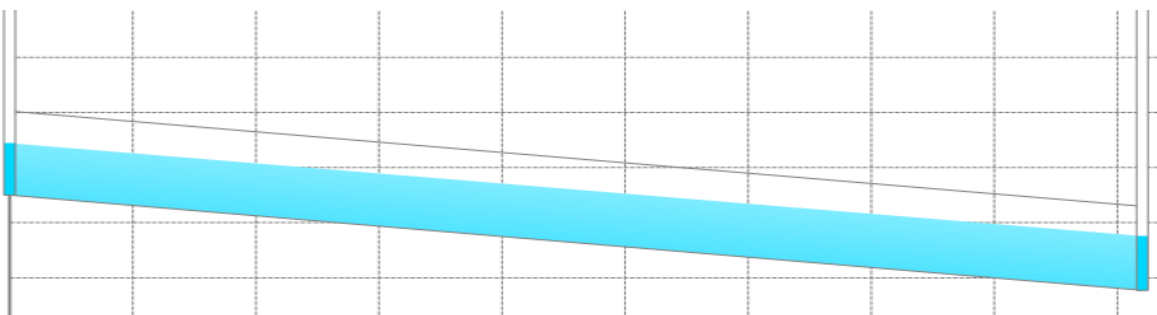


Figure C.14 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie qualité majorée – Avec saillies

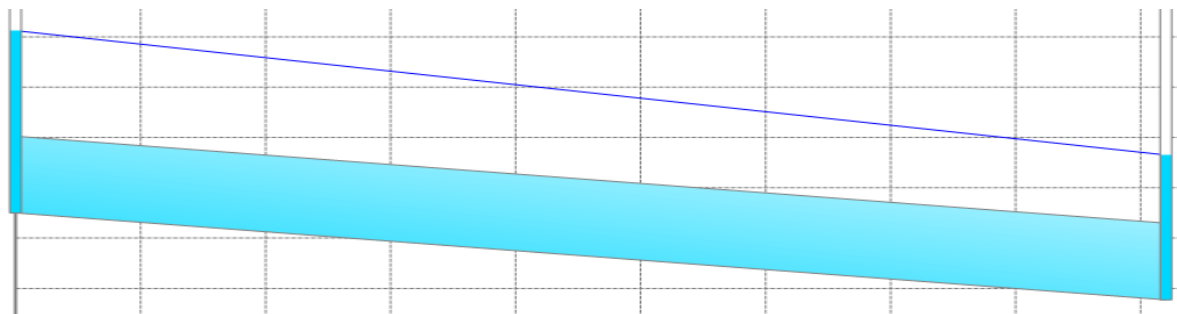


Figure C.15 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans majorée – Sans saillies

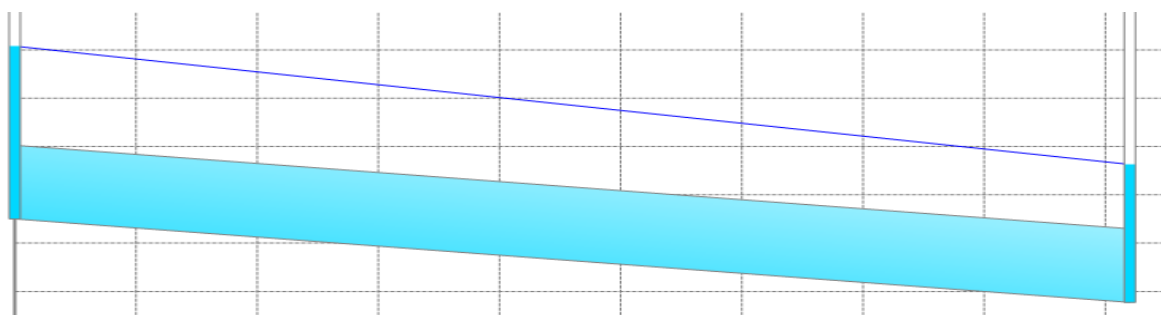


Figure C.16 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 5 – Pluie 10 ans majorée – Avec saillies

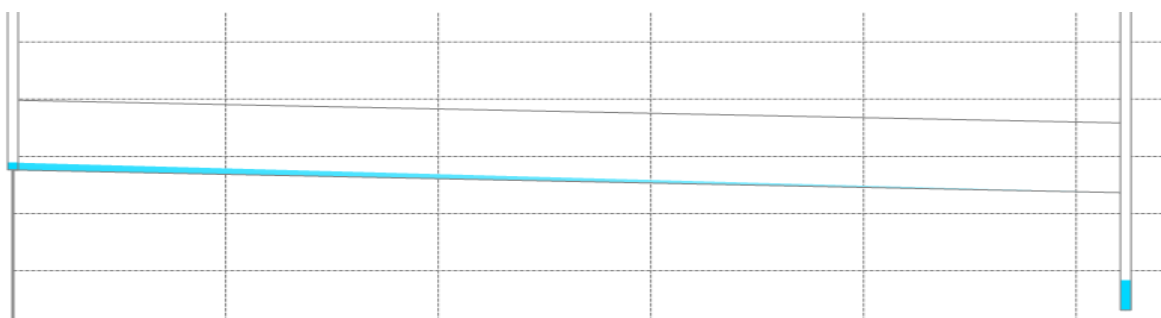


Figure C.17 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie qualité majorée – Sans saillies

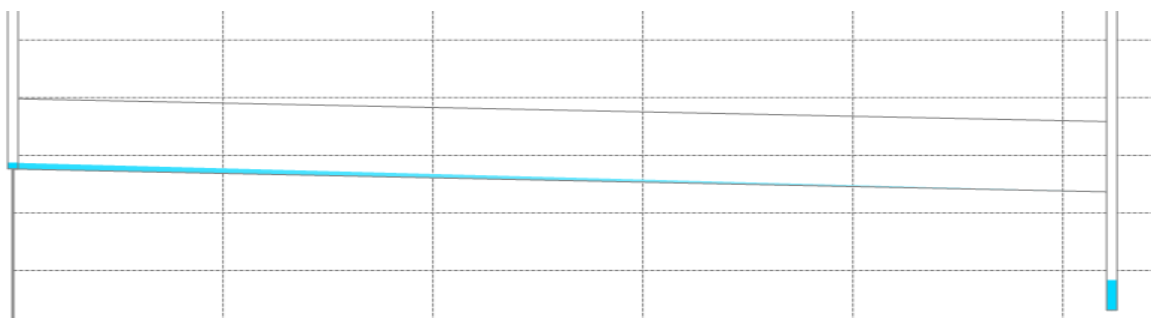


Figure C.18 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie qualité majorée – Avec saillies

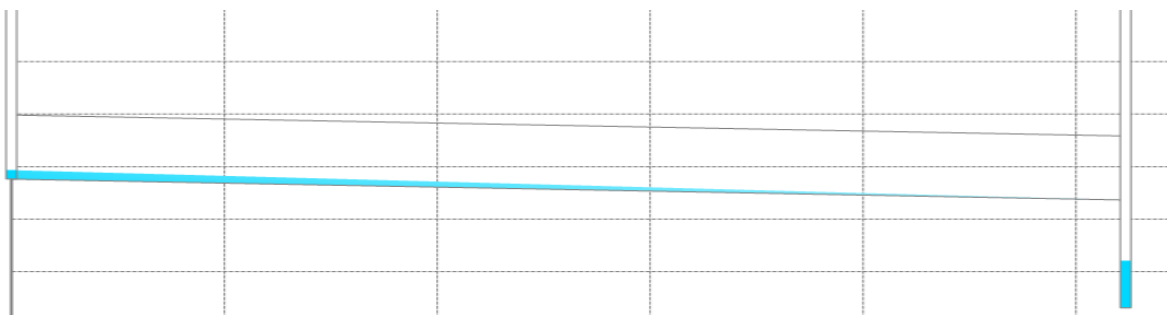


Figure C.19 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie 10 ans majorée – Sans saillies

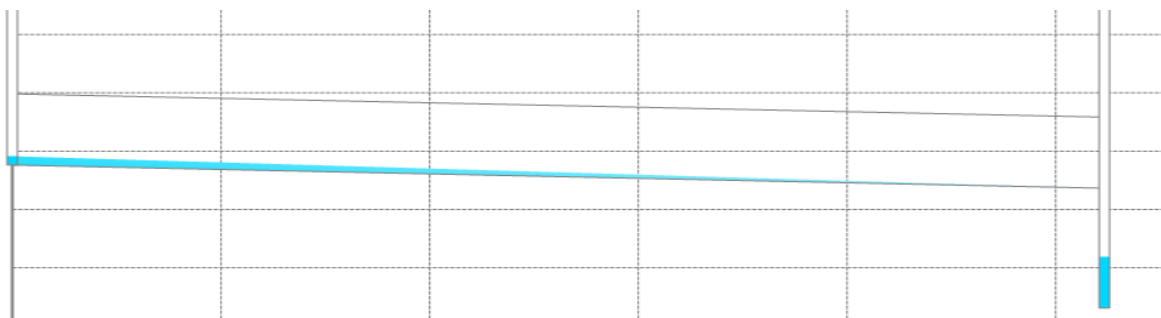


Figure C.20 : Hauteur d'eau maximale dans la conduite 7 – Pluie 10 ans majorée – Avec saillies

ANNEXE D PARAMÈTRES DE SIMULATION DU MODÈLE ENVI-MET

Tableau D.1 : Paramètres de simulation du modèle microclimatique

Input	Source/Calcul
<i>Area input file</i>	
Taille du domaine	60 m*60 m*30 m
Taille des cellules 3D	Plan horizontal: 1 m x 1m Hauteur: Télescopique
<i>Végétation</i>	
Type de végétaux (conifère, feuillu, etc., plantes, etc.)	Populus deltoïdes, Fraxinus Pennsylvanica, Acer Ginnala-Flame, Gleditsia Triacanthos, Gymnocladus Dioïcus
Résistance du stomas	$400 \text{ s}^{0.5} \cdot \text{m}^{-1}$
Albedo	0,2
Hauteur de la plante	8,00 mètres
Profondeur des racines	1,5 m
Leaf Area Density pour les plantes	0,1

Tableau D.1 : Paramètres de simulation du modèle microclimatique (suite)

Bâtiments-Sols- matériaux	
Volume d'eau à saturation	Valeurs par défaut pour un sol argileux et sableux
Capacité au champ	
Point de flétrissement permanent	
Matrice MaPot (Prend en compte les forces d'adhésion entre l'eau et le solide)	
Conductivité hydraulique	
Capacité thermique volumique	
Constante de Clapp and Hornberger	
Conductivité thermique	
Sols: profil vertical	
Albedo correnspondant aux flux de haute fréquence	0,2
Émissivité correspondante aux flux de basse fréquence	0,7
Types de sol selon la profondeur	Argile
Longueur de rugosité (Roughness Length)	1,5 m

Tableau D.1 : Paramètres de simulation du modèle microclimatique (suite)

Configuration file	
<i>Paramètres de simulation</i>	
Heure de départ de la simulation	5 :00AM
Temps total de la simulation	10 h
Pas de temps	30 s
Intervalle de mise à jour pour les processus qui ne sont pas calculés à tous les pas de temps	20 s
Type de conditions frontières: -Ouvertes -Forcées - Cycliques	Forcées
<i>Paramètre de simulation: conditions atmosphériques initiales</i>	
Vitesse du vent et direction à une hauteur de 10 m	1.6 m/s, 207°
Température initiale 2500 m au dessus du sol*	Valeur par défaut
Direction du vent initiale 2500 m au dessus du sol*	20.7 degré Celsius
Humidité spécifique initiale 2500 m au dessus du sol	Valeur par défaut

Tableau D.1 : Paramètres de simulation du modèle microclimatique (suite)

<i>Paramètres de simulation: ajustement solaire</i>	
Facteur d'ajustement pour les radiations de courte longueur d'onde (0,5 - 1,5)	Valeur par défaut
<i>Paramètres de simulation: Turbulence</i>	
Méthode de calcul pour la turbulence (2 méthodes)	Méthode par défaut