

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
M. Ing.

PAR
Sylvain FLÉCHAIS

MODÉLISATION DES EFFETS DE LA VÉGÉTALISATION EN MILIEU URBAIN SUR
LES EAUX DE RUISSELLEMENT DIRIGÉES À L'ÉGOUT

MONTRÉAL, LE 25 JUILLET



Sylvain Fléchais, 2011



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Frédéric Monette, directeur de mémoire
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, codirecteur de mémoire
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Annie Poulin, présidente du jury
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Nassima Voyneau, membre du jury externe
Département du génie des systèmes urbain à l'Université de Technologie de Compiègne

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 21 JUILLET 2011

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de recherche Frédéric Monette qui m'a permis par ses conseils de mener à bien sans encombre cette recherche. Son soutien et son sens de l'humour m'ont été d'une grande aide dans le franchissement des difficultés rencontrées durant ces deux années. Sa science du hockey a enrichi mes connaissances et étonnement facilité mon intégration à la vie montréalaise. Mes remerciements vont ensuite à mon codirecteur de recherche Mathias Glaus pour son aide. Je souhaite remercier également Robert Hausler qui m'a fourni des idées précieuses lors de nos discussions fortuites au détour d'un couloir. Merci à Maria pour son aide précieuse et sa gentillesse. Je tiens à souligner, Mélanie Glorieux, qui m'a apporté son expertise sur la modélisation des arbres. Je remercie aussi Nassima Voyneau pour l'attention particulière qu'elle a portée à mon étude et pour ses conseils. Je remercie également la région Picardie pour l'aide financière par son programme de bourse Philéas. Mes remerciements s'adressent aussi à la Direction des travaux publics de l'Arrondissement de Verdun de Montréal pour leur aide précieuse.

Je remercie tout particulièrement mes parents, sans qui cette expérience n'aurait pas pu être possible. Merci à eux pour m'avoir soutenu dans les bons et mauvais moments malgré la distance. Merci à mes grands parents pour leur gentillesse et leur soutien moral et merci à mon oncle pour ses conseils avisés. Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui m'ont suivi durant cette étape de ma vie, dont mes amis Rehman, Kevin... et mes colocataires. Ils sont nombreux et je ne pourrai pas tous les citer. Je tiens à remercier et à féliciter tous les anciens membres de mon équipe de soccer pour la très belle saison réalisée et pour les grands moments de joie et de tristesse que cette aventure nous a fait vivre. Merci à tous ces amis rencontrés ces deux dernières années, qui ont rendu ma vie riche et joyeuse.

Finalement, je veux remercier Alex qui par sa présence à mes côtés a rendu mon expérience au Canada inoubliable. Son soutien de tous les instants m'a permis de persévérer. Je tiens aussi à souligner sa précieuse expertise de l'anglais.

Thank you Jimmy Fallon for wasting my time by being on at a time when I should have been sleeping. At least you made me laugh with your thank you notes. Obviously a necessary component to every research paper is laughter. Thanks Jimmy.

MODÉLISATION DES EFFETS DE LA VÉGÉTALISATION EN MILIEU URBAIN SUR LES EAUX DE RUISSELLEMENT DIRIGÉES À L'ÉGOUT

Sylvain FLÉCHAIS

RÉSUMÉ

Plusieurs solutions sont envisageables pour atténuer les conséquences de l'urbanisation qui affectent les débits et volumes d'eau dirigés au réseau de drainage. L'approche de gestion intégrée des eaux pluviales, aussi appelée *Low Impact Development* (LID), vise à capter et à retenir les eaux de ruissellement avant qu'elles atteignent le réseau de drainage. L'objectif principal de l'étude consistait à quantifier les effets des aménagements LID sur les eaux de ruissellement dirigées à l'égout en milieu urbain, tout en apportant un bilan sur leur implantation en milieu fortement urbanisé. Pour ce faire, le logiciel SWMM a été utilisé pour simuler l'implantation de plusieurs infrastructures LID (toits verts, pavage poreux, fossés drainants, arbres plantés) dans la rue Beaudoin située dans l'arrondissement Sud-ouest de Montréal. Différentes méthodes de modélisation, basées notamment sur les méthodes d'infiltration Green-Ampt, Curve Number et sur le module de conception de LID de SWMM 5, ont été testées pour les toits verts et les arbres. Plusieurs scénarios d'implantation ont été modélisés et testés avec des pluies de 12 mm, 24 mm, 32 mm et 21 mm + 11 mm. L'analyse a permis de montrer les toits verts permettent une réduction du débit maximal d'eau ruisselée de 22 % pour la pluie de 12 mm et de 15 % pour la pluie de 24 mm. Cette réduction est l'ordre de 8 % pour le volume pour les deux pluies. La réduction débit/volume est de l'ordre de 20 % pour les pavé poreux peu importe la pluie. Rapporté à la surface occupée, les arbres sont très performants avec une réduction de l'ordre de 1 % pour seulement 77 m² implantés. Les pavés poreux présentent le meilleur rendement surfacique. Les toits verts et les arbres sont très sensibles à la saturation du sol avec des résultats réduits de moitié pour les toits verts par rapport à ceux obtenus avec un sol sec. Les infrastructures LID sont efficaces à réduire le débit maximal d'eau ruisselée de pluies faibles mais ont des performances réduites concernant les pluies moyennes et avec un sol mouillé. Ainsi, le scénario d'aménagement le plus adapté est celui offrant une mixité entre les différentes infrastructures LID. L'étude d'autres quartiers avec notamment des typologies différentes permettrait de généraliser les conclusions obtenues. Aussi des études complémentaires sur la plantation d'arbres dans les rues permettraient également de mettre en valeur ses forces.

Mots clés: eau de ruissellement, réseau de drainage, LID, toits verts, gestion durable des eaux pluviales.

SIMULATION OF THE EFFECTS OF GREEN INFRASTRUCTURES ON URBAN RUNOFF

Sylvain FLÉCHAIS

ABSTRACT

Many solutions exist to reduce the effects of urbanization which are damaging to the peak flow rate and water volumes of the urban drainage system. The Low Impact Development infrastructures, which are an integrated approach to stormwater management, attempt to capture the stormwater before it reaches the drainage system. The main goal of the study was to quantify the effects of LID on runoff water normally directed to the drainage system in an urban setting, looking especially at highly urbanized areas. To accomplish this, SWMM software was used to simulate the incorporation of several LID infrastructures (green roofs, porous pavement, swells, street planters) on Beaudoin street situated in the Southwest neighbourhood of Montreal. Different modeling methods were used, especially for the different infiltration methods (Green-Ampt, Curve Number) to simulate the LID (green roofs and trees) on SWMM 5. Five layout scenarios were created and simulated with different rain events (12 mm, 24 mm, 32 mm and 21 mm+11mm). Analysis showed that green roofs permitted a reduction of max flow rate of stormwater of 22% for the 12 mm rain and of 15% for the rain of 24mm. This reduction is at approximately 8% for the volume of the two rains. The reduction of max flow rate and volume is at 20% for the porous pavement regardless of the rainfall. With regards to the total surface occupied, the trees perform well with a reduction of 1% for only 77 m² of planted trees. The porous pavement showed the best performance to surface area ratio. The green roofs and trees both are much less effective with wet soil with green roofs performing at half their previous results. The LID infrastructures are efficient at reducing the peak flow of weak rain but perform at much reduced rates with medium rainfalls and wet soil. The scenario that performed the best was the one that offered a mix of the different LID infrastructures. The study of other neighbourhoods with different typologies would allow more generalized conclusions to be obtained. Also, complementary studies on the effects of trees on rainfall would allow better quantification of the true effects of the trees.

Keywords: stormwater management, runoff, Low Impact Development, green roofs.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE	5
1.1 Le drainage urbain	5
1.1.1 Le cycle de l'eau	5
1.1.2 Impacts de l'urbanisation	6
1.2 La gestion intégrée des eaux pluviales ou Low Impact Development.....	12
1.2.1 Présentation de l'approche LID	12
1.2.2 Ses principes	13
1.2.3 Les différentes mesures.....	14
1.2.4 Des stratégies d'aménagements	15
1.2.5 La problématique des arbres	15
1.3 La modélisation d'un réseau de drainage urbain	17
1.3.1 Méthodes manuelles.....	18
1.3.2 Modèles informatiques.....	20
1.3.3 Présentation des modèles les plus courants	21
1.4 Modélisation des quartiers	22
1.4.1 Modélisation d'un quartier de Laval	22
1.4.2 SWMM et l'évapotranspiration	23
1.4.3 Réponse des infrastructures LID aux averses	24
1.4.4 L'Élément Hydrologique Urbain (EHU)	25
1.4.5 Synthèse	26
1.5 L'utilisation de SWMM pour modéliser des aménagements de gestion intégrée des eaux de pluie	26
1.5.1 Hydrologie	27
1.5.2 Hydraulique.....	32
CHAPITRE 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES	35
2.1 Sélection du modèle SWMM.....	36
2.2 Modélisation du quartier de référence	38
2.2.1 Bassins versants	40
2.2.2 Pluies utilisées.....	41
2.2.3 Infiltration	42
2.2.4 Aspect hydraulique	43
2.3 Procédure de modélisation des éléments LID.....	45
2.3.1 Méthodes de modélisation considérées et testées (toits verts).....	45
2.3.2 Méthodes de modélisation considérées et testées (arbres).....	51
CHAPITRE 3 RÉSULTATS	55
3.1 Modélisation des infrastructures LID	55
3.1.1 Résultats comparatifs (toits verts).....	55
3.1.2 Résultats comparatifs (arbres).....	59

3.1.3	Pavés poreux	62
3.1.4	Fossés	63
3.2	Scénarios	64
3.2.1	Toits verts.....	64
3.2.2	Arbres.....	64
3.2.3	Pavés poreux	65
3.2.4	Fossés.....	65
3.2.5	Descriptif des scénarios	66
3.3	Analyse par pluies.....	69
3.3.1	Pluie de 12 mm	69
3.3.2	Pluie de 24 mm	71
3.3.3	Pluie Verdun 1 (32mm)	73
3.3.4	Pluie Verdun 2 (21 mm + 11 mm).....	76
3.4	Analyse des scénarios	78
3.4.1	Résultats bruts.....	78
3.4.2	Rendement	80
3.5	Comparaison des infrastructures LID	82
3.6	Modification des toits verts avec le scénario 5	86
3.7	Interprétation et synthèse	88
3.7.1	Le problème du rendement	89
3.7.2	L'aspect temporel.....	89
3.7.3	La saturation.....	90
3.7.4	La modification du toit vert.	90
3.7.5	Un scénario plus adapté	90
CHAPITRE 4 DISCUSSION		93
4.1	Les méthodes de simulation.....	93
4.2	L'arbre.....	94
4.3	La simulation continue.....	95
4.4	La question de la végétation	95
4.5	La question d'échelle	96
4.6	La question de l'évaluation de la performance	97
4.7	Impact sur les débordements.....	98
CONCLUSION		101
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		110

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Les différentes mesures LID	14
Tableau 1.2 Caractéristiques d'un bassin versant	28
Tableau 1.3 Caractéristiques hydrauliques	33
Tableau 2.1 Caractéristiques du bassin versant principal	40
Tableau 2.2 Caractéristiques du réseau hydraulique.....	44
Tableau 2.3 Caractéristiques d'un toit vert avec la méthode d'infiltration Green-Ampt.....	47
Tableau 2.4 Caractéristiques d'un toit vert avec la méthode d'infiltration Curve Number	48
Tableau 2.5 Caractéristiques des quatre toits verts testés avec le module LID control.....	50
Tableau 2.6 Caractéristiques du bassin versant en fonction de l'implantation d'arbres plantés avec la méthode traditionnelle	51
Tableau 2.7 Caractéristiques du bassin versant en fonction de l'implantation d'arbres plantés avec la méthode LID Control	52
Tableau 2.8 Caractéristiques d'un arbre avec le module LID control	53
Tableau 3.1 Caractéristiques de pavé poreux avec le module LID Control	63
Tableau 3.2 Caractéristiques de fossés avec le module LID Control	64
Tableau 3.3 Descriptif des scénarios	68
Tableau 3.4 Caractéristiques du bassin versant pour les cinq scénarios.....	68

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Cycle hydrologique	5
Figure 1.2 Impact du sol sur l'écoulement	8
Figure 1.3 Comparaison de l'évolution du débit de ruissellement en fonction du milieu.....	9
Figure 1.4 L'élément hydrologique urbain	25
Figure 1.5 Évolution du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps	29
Figure 1.6 Schéma du processus d'infiltration Green Ampt.....	30
Figure 1.7 Représentation du ruissellement.....	32
Figure 2.1 Étapes de l'étude	36
Figure 2.2 Schématisation du quartier d'étude et répartition des surfaces	39
Figure 2.3 Présentation des pluies de l'étude.....	42
Figure 2.4 Comparaison des méthodes d'infiltration	43
Figure 2.5 Représentation du quartier de référence	44
Figure 2.6 Illustration du fonctionnement du module LID control	49
Figure 3.1 Comparaison des débits d'eau ruisselée des toits verts du quartier entre les quatre méthodes de modélisation (pluie de 24 mm)	56
Figure 3.2 Comparaison des débits d'eau ruisselée des toits verts du quartier entre la méthode LID control modifiée et la méthode de référence (pluie de 24 mm).....	58
Figure 3.3 Comparaison des débits à l'exutoire pour deux méthodes de modélisation des arbres plantés (pluie de 24 mm).....	60
Figure 3.4 Réponse d'un arbre avec la méthode LID Control (pluie de 24 mm)	61
Figure 3.5 Dimensionnement de l'arbre sur le trottoir	62
Figure 3.6 Schéma d'implantation d'un arbre au sein du fossé de drainage	65
Figure 3.7 Processus d'implantation des infrastructures LID par scénario	67

Figure 3.8 Évolution du débit à l'exutoire (pluie de 12 mm)	69
Figure 3.9 Réduction du débit maximal à l'exutoire (pluie de 12 mm).....	70
Figure 3.10 Réduction du volume d'eau ruisselée (pluie de 12 mm).....	70
Figure 3.11 Évolution du débit à l'exutoire (pluie de 24 mm)	71
Figure 3.12 Réduction du débit maximal à l'exutoire (pluie de 24 mm).....	72
Figure 3.13 Réduction du volume d'eau ruisselée (pluie de 24 mm).....	73
Figure 3.14 Évolution du débit à l'exutoire (pluie Verdun 1, 32 mm)	74
Figure 3.15 Réduction du débit maximal à l'exutoire (pluie Verdun 1, 32 mm)	74
Figure 3.16 Réduction du volume d'eau ruisselée (pluie Verdun 1, 32 mm)	75
Figure 3.17 Évolution du débit à l'exutoire (pluie Verdun 2, 21 mm + 11 mm).....	76
Figure 3.18 Réduction du débit maximal à l'exutoire (pluie Verdun 2, 21 mm + 11 mm)....	77
Figure 3.19 Réduction du volume d'eau ruisselée (pluie Verdun 2, 21 mm + 11 mm).....	77
Figure 3.20 Taux de réduction du débit maximal (pluie Verdun 2, 21 mm + 11 mm).....	78
Figure 3.21 Taux de réduction du débit maximal par scénario.....	79
Figure 3.22 Taux de réduction du volume par scénario.....	80
Figure 3.23 Taux de réduction du débit maximal par unité de surface.....	81
Figure 3.24 Taux de réduction du volume d'eau ruisselée par unité de surface	82
Figure 3.25 Réduction du débit maximal à l'exutoire par infrastructure LID issue du scénario 5 (pluies 12 mm et Verdun 2).....	83
Figure 3.26 Réduction du volume d'eau ruisselée par infrastructure issue du scénario 5 (pluie de 12 mm et pluie Verdun 2).....	84
Figure 3.27 Taux de réduction du débit maximal et du volume d'eau ruisselée par unité de surface par infrastructure, issu du scénario 5 (pluie 12 mm)	85
Figure 3.28 Taux de réduction du débit maximal et du volume d'eau ruisselée par unité de surface par infrastructure, issu du scénario 5 (pluie Verdun 2, 21 mm + 11 mm).....	86

Figure 3.29 Comparaison des réductions du volume ruisselé pour deux types de toit vert pour le scénario 5	87
Figure 3.30 Réduction du débit maximal pour deux types de toits verts pour le scénario 5 (pluie de Verdun 2 ; 21 mm + 11 mm)	87

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BV	Bassin versant
CN	Curve Number
EHU	Élément hydrologique urbain
EPA	US Environmental Protection Agency
GDEP	Gestion durable des eaux de pluie
HEC	Hydrologic Engineering Center
HYMO	Hydrologic Model
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
LID	Low Impact Development
MAMROT	Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire
MOUSE	Modelling of Urban Sewers
RSMA	Réseau de suivi du milieu aquatique
SWMM	Storm Water Management Model
SCS	Soil Conservation Service

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

m	mètre (unité de longueur)
mm	millimètre
m ²	mètre carré (unité de surface)
ha	hectare
m ³	mètre cube (unité de volume)
m ³ /s	mètre cube par seconde (unité de débit)
mm/h	millimètre par heure (intensité)
h	heure (unité de temps)

INTRODUCTION

La question de la gestion de l'eau en milieu urbain est au centre des préoccupations de notre société. En effet, l'urbanisation cause des impacts significatifs sur la gestion des eaux pluviales. La proportion de superficies imperméables en zones urbaines est particulièrement importante en comparaison avec le milieu naturel. Les toits des bâtiments, les stationnements, les rues et les trottoirs, toutes les infrastructures bétonnées, asphaltées ou goudronnées limitent l'infiltration de l'eau dans le sol. Le cycle de l'eau est alors perturbé. Toutes les eaux ruisselantes sont dirigées vers le réseau de drainage menant parfois à des dépassements de la capacité du réseau de drainage et, conséquemment, à des problèmes de déversements, d'inondations et de refoulements d'égouts. Les impacts sur les milieux récepteurs peuvent aussi être importants. En effet, ces eaux transportent divers polluants du milieu urbain : débris solides, huiles, métaux, etc.

L'urbanisation continue de dégrader les lacs, rivières et zones côtières. Plusieurs solutions sont envisageables pour atténuer les conséquences de l'urbanisation qui affectent le réseau de drainage et les milieux récepteurs. L'une d'elles repose sur le contrôle à la source des eaux pluviales. Cette solution vise à capter et à retenir les eaux de ruissellement avant qu'elles atteignent le réseau de drainage. L'approche traditionnelle actuelle de gestion des eaux pluviales tente d'évacuer le plus rapidement possible les eaux de ruissellement. L'approche de gestion intégrée des eaux pluviales, aussi appelée *Low Impact Development*, cherche à reproduire, de façon artificielle, le cheminement des eaux de pluie sur un site à l'état naturel, avant l'intervention humaine. Elle est basée sur l'infiltration naturelle, de même que sur des techniques de rétention pour gérer les eaux de ruissellement localement.

Aussi, les données pluviométriques suggèrent que la fréquence, l'intensité et la durée des pluies évoluent dans le temps. Les recherches de l'université de Colombie-Britannique ont identifié les changements climatiques comme principal facteur à ces observations (Stephens, Graham et Reid, 2002). Les simulations d'Environnement Canada projettent une

augmentation des pluies hivernales et automnales, une diminution des pluies printanières, et des pluies plus intenses (Auld et MacIver, 2007). De nombreuses villes auront à faire face à ces changements qui accroissent la nécessité d'avoir recours à une gestion des eaux de ruissellement. Les infrastructures LID sont perçues comme un moyen d'adaptation à ces nouvelles conditions.

Cette démarche offre une alternative intéressante à l'utilisation du réseau de drainage traditionnelle. Elle englobe une gamme relativement large de mesures de contrôle à la source. Leur utilisation réduirait le volume d'eau acheminé au réseau de drainage, diminuerait les débits de pointe ainsi que les quantités de polluants véhiculés avec les eaux de ruissellement. Ces mesures comprennent entre autres des aires de biorétention, des puits drainants, des bandes de filtration, des fossés végétalisés, des collecteurs d'eaux de pluie, des bassins de rétention et autres marais filtrants. Elles englobent aussi l'aménagement de toitures vertes, et la valorisation des forêts urbaines.

En dépit du grand nombre d'informations concernant l'approche de gestion intégrée des eaux pluviales, sa mise en application sur le terrain est lente. Les outils permettant de modéliser les infrastructures LID informatiquement sont récents, la difficulté étant de transcrire la complexité et le grand nombre de variables des procédés et processus en un outil informatique exploitable par les concepteurs. Il est d'autant plus difficile d'obtenir une estimation de l'impact de ces mesures à l'échelle de la ville. La présente étude se propose d'évaluer certaines de ces mesures à l'échelle de l'évènement pluvieux. L'objectif principal des présents travaux de recherche consiste donc à quantifier les effets des aménagements LID sur les débits et volumes d'eaux de ruissellement dirigées à l'égout en milieu urbain. L'étude se limitera aux aspects quantitatifs, et n'abordera pas les impacts des différentes mesures LID évaluées sur la qualité de l'eau.

De nombreuses méthodes existent pour simuler les infrastructures LID. Toutefois, peu d'entre elles ont été évaluées pour mesurer l'effet sur les eaux de ruissellement à l'égout à l'échelle de l'évènement pluvieux. La présente étude se propose donc également d'étudier

un certain nombre de méthodes utilisées couramment par les bureaux d'études pour modéliser des réseaux de drainage intégrant des infrastructures LID.

Pour atteindre ces objectifs, le premier chapitre du mémoire, la revue de littérature, traite du contexte général du ruissellement en milieu urbain en abordant ses impacts et ses causes, les méthodes LID permettant sa gestion ainsi que quelques études simulant les impacts des aménagements LID. Sur la base de la problématique exposée précédemment, le deuxième chapitre présente la méthode adoptée afin de comparer et d'analyser des scénarios d'implantation d'infrastructures LID. Le troisième chapitre présente les résultats de l'étude tandis que le quatrième chapitre apporte des éléments de discussion.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTERATURE

1.1 Le drainage urbain

Afin de modéliser au mieux un système de drainage en milieu urbain, il est nécessaire de comprendre les différents processus qui se déroulent lors du passage d'un événement pluvieux sur un bassin versant.

1.1.1 Le cycle de l'eau

Le cycle de l'eau est dynamique puisque la quantité et la qualité de l'eau d'un emplacement particulier peuvent varier grandement dans le temps. Le cycle consiste en une variation de processus se déroulant dans l'atmosphère, sur et sous la surface de la terre comme l'illustre la Figure 1.1

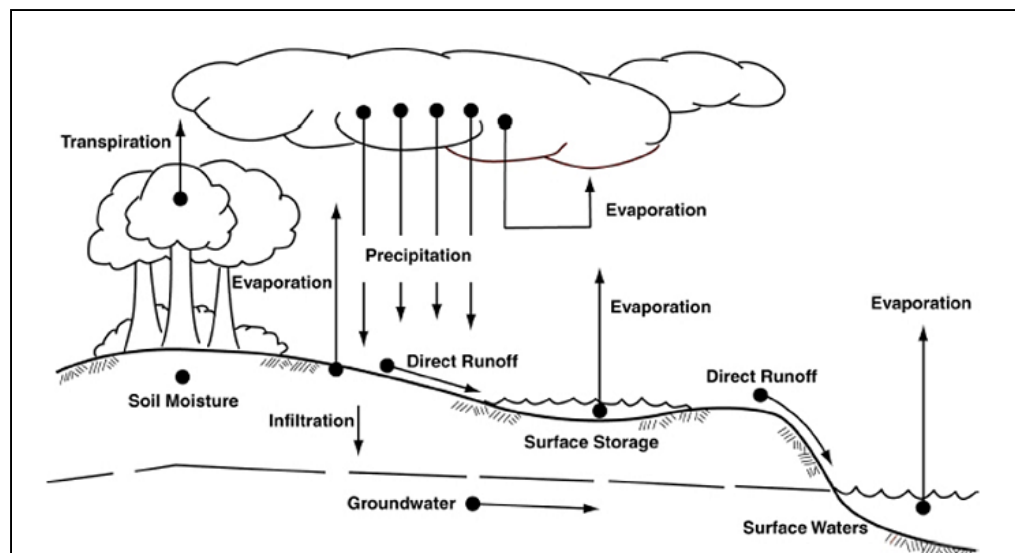


Figure 1.1 Cycle hydrologique
Tiré de (Shaver *et al.*, 2007)

Les *précipitations* prennent plusieurs formes : pluie, neige, grêle et neige fondue. Le volume total des précipitations est imprévisible et très variable. Les précipitations sont le processus le plus important dans un cycle hydrologique, puisqu'il s'agit de la source d'eau approvisionnant le cycle. L'*infiltration* se définit comme le passage de l'eau à travers l'interface air-sol. Elle est affectée par le type de sol, la durée des événements pluviaux, les conditions d'humidité du sol antérieures et la présence de végétation. L'eau qui se transforme de l'état liquide à l'état gazeux s'évapore, il s'agit du phénomène d'*évaporation*. La *transpiration* est le mécanisme par lequel l'eau passe à travers la végétation, pour ensuite s'évaporer. Le phénomène d'évapotranspiration est complexe et dépend de nombreux facteurs tels que la température, la force du vent, le type de végétation, etc. L'eau s'écoule en surface à un exutoire naturel ou artificiel. Cet écoulement est affecté par la précipitation, l'infiltration et la pente. L'*écoulement de surface* détermine la quantité des eaux de ruissellement qui rejoindra le récepteur (Shaver *et al.*, 2007).

Le processus d'*interception* n'est pas représenté sur le cycle. L'interception correspond à l'eau précipitée retenue par des obstacles présents sur le territoire. Ainsi, l'eau est provisoirement retenue, avant d'être évaporée. De même, l'*emmagasinement de surface* n'est pas représenté. Ce volume d'eau est celui stocké dans des dépressions du terrain, qui ne s'écoule pas et ne s'infiltré pas. Généralement, il n'aura pas une grande influence en milieu urbain (Walesh, 1989).

1.1.2 Impacts de l'urbanisation

La quantité d'eau

Des systèmes de drainage ont été développés dans les zones urbaines pour gérer les interactions entre les activités humaines et l'eau. Ces interactions sont de deux types : la première consiste à l'approvisionnement d'eau pour permettre la vie, la seconde est la transformation des sols qui perturbe le cycle naturel de l'eau. Ces interactions causent deux types d'eau qui requièrent un drainage. Le premier type, les eaux usées, se compose des eaux

qui ont été fournies pour garantir la vie, maintenir un niveau de vie et satisfaire les besoins de l'industrie ou de la ville. Après utilisation, ces eaux doivent être drainées puis traitées adéquatement afin d'éviter d'altérer l'environnement et de créer des problèmes de santé. Le second type, les eaux de ruissellement, sont la résultante de l'eau de pluie tombant sur les zones construites. Si les eaux de ruissellement ne sont pas drainées, elles causeront des inondations et des risques de pollution. Le drainage urbain gère donc ces deux types d'eaux « sales » afin de minimiser les conséquences pour la vie humaine et son environnement. Dans la plupart des zones urbaines, le drainage est composé d'un système complètement artificiel d'égouts. Les communautés isolées, quant à elles, traitent localement les eaux usées et les eaux de ruissellement sont drainées naturellement dans le sol. Ces principes plus viables sont à présent encouragés dans les systèmes de drainage urbain. Les effets de l'urbanisation sur le drainage sont multiples. Le drainage urbain remplace une partie du cycle naturel de l'eau. Dans la nature, lorsque l'eau de pluie tombe sur une surface naturelle, une partie de cette eau retourne à l'atmosphère grâce à l'évaporation, ou par la transpiration des plantes; une autre partie s'infiltre dans le sol et se convertit en eau souterraine; et enfin, une dernière partie ruisselle sur le sol. Les proportions d'eau infiltrée et ruisselée dépendent de la nature de la surface, du délai entre deux pluies, de l'intensité de la pluie, etc. et varient aussi durant une même pluie. L'eau souterraine et le ruissellement se dirigeront vers les cours d'eau avoisinants, mais l'eau de ruissellement sera beaucoup plus rapide dans ses déplacements. Le développement des zones urbaines, impliquant une couverture du sol par des surfaces artificielles, a une grande influence sur les processus mis en jeu. Les surfaces artificielles augmentent la quantité d'eau de ruissellement et donc augmentent le volume total d'eau atteignant la rivière pendant ou très tôt après la pluie, comme le représente la Figure 1.2.

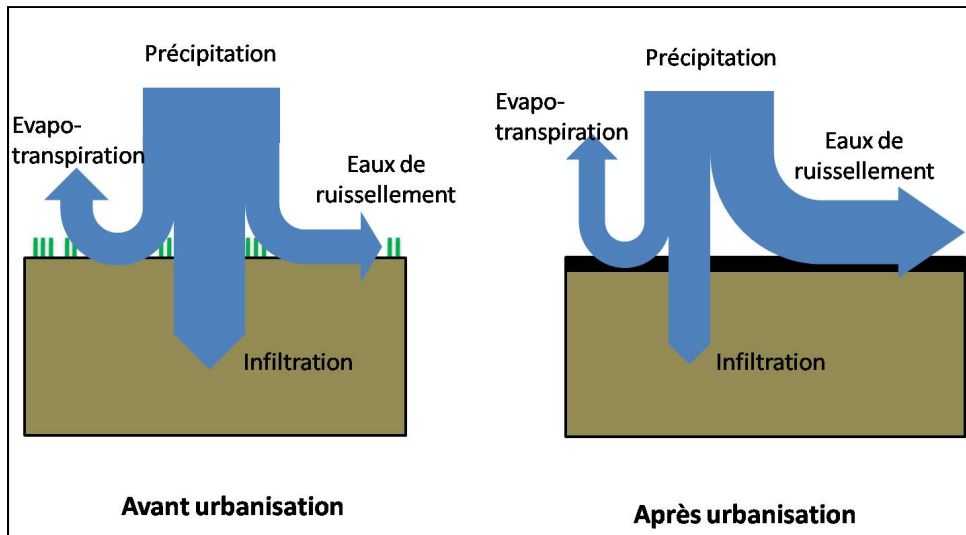


Figure 1.2 Impact du sol sur l'écoulement
Adaptée de (Butler et Davies, 2000)

Les eaux de ruissellement s'écoulent plus rapidement sur les surfaces compactes et dans le réseau d'égout que sur les surfaces naturelles et le long des ruisseaux. Cela signifie que le débit d'eau arrivera et diminuera d'ampleur plus rapidement, et le débit maximal sera plus important. Le danger de débordement soudain de la rivière est ainsi augmenté. Les conséquences pour la qualité de l'eau sont tout aussi importantes. Le ruissellement rapide des eaux de pluie lessive le sol de ses polluants et ses sédiments et les transporte dans la rivière. Ensuite, dans le cas des systèmes de drainage unitaire, les eaux usées se mélangent aux eaux de pluie ce qui favorise la pollution lors d'événements pluviaux d'importance pouvant provoquer des débordements. Dans les zones urbaines, le problème du ruissellement implique des traitements de l'eau par des stations d'envergure et donc coûteuses (Butler et Davies, 2000).

Depuis quelques dizaines d'années, l'approche du drainage urbain est en évolution. La fonction de base du drainage urbain est de collecter et de transporter les eaux usées et les eaux de ruissellement. Dans la plupart des pays urbanisés, il s'agit d'intercepter l'ensemble des eaux usées. Pour les eaux de ruissellement, l'objectif consiste à évacuer l'eau de pluie le plus rapidement possible pour réduire les contraintes pour les activités à la surface, particulièrement pour les routes. La suppression rapide des eaux de pluie a été longtemps vue

comme la preuve qu'un système de drainage était efficace (Butler et Davies, 2000). Le premier objectif du drainage est toujours de protéger la population et les biens des eaux de ruissellement, mais une attention nouvelle est portée aux impacts que l'eau drainée peut provoquer sur les cours d'eau récepteurs. Des méthodes plus naturelles pour disposer des eaux de ruissellement sont développées. Elles incluent l'infiltration, la détention et la rétention. L'intention générale est d'inverser le phénomène présenté à la Figure 1.3 : atténuer le pic de débit de l'eau de ruissellement et augmenter le temps d'écoulement jusqu'à l'exutoire.

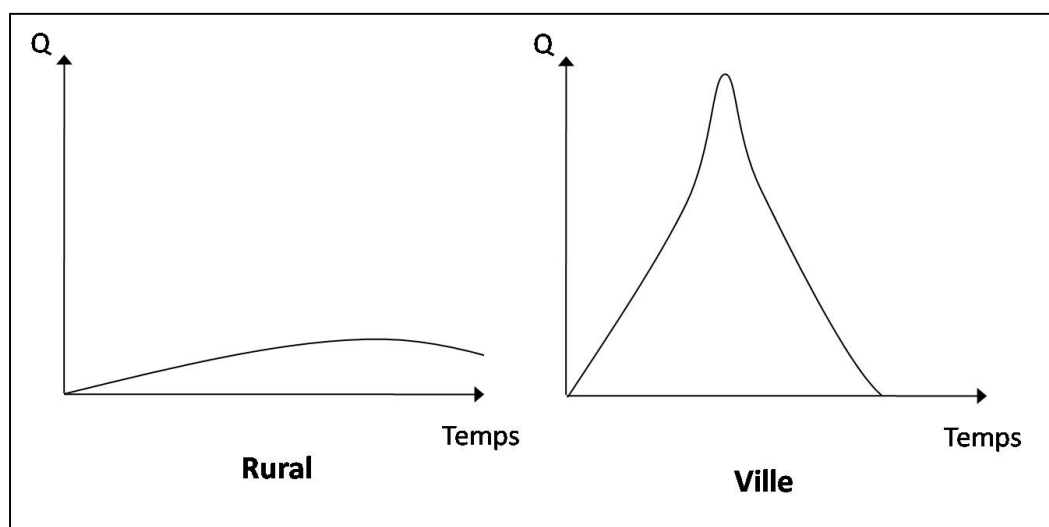


Figure 1.3 Comparaison de l'évolution du débit de ruissellement en fonction du milieu

Adaptée de (Butler et Davies, 2000)

La qualité d'eau

La dégradation causée par la pollution des eaux de ruissellement est sérieuse, et touche une grande partie de la population. L'imperméabilisation des terres peut provoquer des inondations, l'érosion des cours d'eau, la détérioration de l'habitat et la diminution de la qualité de l'eau. De nombreuses activités (industrie, entretien des pelouses, etc.) recouvrent chaque jour le sol d'éléments pouvant être nocifs. Ces polluants sont alors transportés jusque dans les cours d'eau par les eaux de ruissellement. Ils ont un impact important sur les milieux

naturels, mais aussi sur certaines activités commerciales et tertiaires : la pêche, la baignade, etc. La pollution des eaux de ruissellement constitue une préoccupation pour les organismes responsables de l'approvisionnement en eau potable. Ils accordent une attention particulière aux eaux de ruissellement, en particulier aux éléments nutritifs, bactéries et produits chimiques organiques toxiques. L'une des plus importantes conséquences de l'augmentation du volume et du débit des eaux de ruissellement est l'inondation et les dégâts matériels qui en découlent. Klein (1979) a montré qu'en raison de l'augmentation des surfaces imperméables dans un bassin versant, une inondation centenaire pouvait se produire tous les cinq ans si l'imperméabilité augmentait de 25 %, et pourrait se produire tous les ans si les surfaces imperméables augmentaient de 65 %. L'augmentation du volume et du taux de ruissellement des eaux pluviales érode les berges et cours d'eau. Du fait de cette érosion, les cours d'eau reçoivent un apport supplémentaire de sédiments. L'envasement et la sédimentation des ports et cours d'eau sont coûteux pour les communautés. L'augmentation de la température de l'eau constitue aussi une conséquence du ruissellement urbain. L'eau s'écoule rapidement et n'a donc pas le temps de se refroidir au contact du sol. Il a été montré que la température moyenne de l'eau augmentait directement avec le pourcentage d'imperméabilisation d'un bassin versant (Shaver *et al.*, 2007). Ces augmentations de température bouleversent les écosystèmes et entraînent notamment une prolifération des algues. Cela s'ajoute à la pollution transportée par les eaux de ruissellement qui nuit aux écosystèmes aquatiques. Les eaux de ruissellement peuvent aussi transporter des bactéries et virus, ce qui peut rendre la baignade, la pêche et les sports nautiques risqués pour la santé.

Impacts chiffrés (cas de Montréal)

Lors d'événements pluviaux intenses, la quantité d'eau acheminée vers le réseau de drainage dépasse la capacité de ce dernier. Dès lors, des cas de refoulements (ou surverses) peuvent avoir lieu à différents endroits du réseau (Bolduc, 2008). Il existe 74 bassins de drainage sur l'île de Montréal (Garant, 2009). Près du 2/3 de l'île de Montréal, principalement au Centre et à l'Est, est desservi par un réseau d'égouts unitaires. Le drainage du reste de l'Ouest de l'île s'effectue par un réseau séparatif où les eaux pluviales sont captées par un égout pluvial et

rejetées directement dans les cours d'eau. Selon le bilan 2008 des ouvrages de surverses du Ministère des Affaires Municipales, des Régions et de l'Occupation du Territoire (MAMROT) pour l'île de Montréal, il y a eu au total 1 205 épisodes de surverses; 907 causés par des pluies, 174 causés par la fonte des neiges, 81 provoqués par des situations dites d'urgence (panne, travaux), 35 pour des raisons autres (erreur humaine, obstruction) et 8 par temps sec (Laurin et Moreira, 2009). Dans les années 2000, la Station d'épuration des eaux usées de Montréal traitait entre 98,5 et 99,0 % des eaux usées produites sur son territoire. Entre le 1^{er} mai et le 15 septembre 1998, il y eut 23 déversements en temps de pluie provenant de l'intercepteur sud. Le retour aux conditions prévalant en temps sec nécessite environ trois jours suite aux déversements; ces événements réduisent de 50 % les activités récréatives, soit 3,5 jours par semaine en moyenne (Boulay, Cejka et Levesque, 1999).

Le Réseau de Suivi du Milieu Aquatique (RSMA) effectue des relevés tout au long de l'année pour suivre l'évolution de la qualité de l'eau en rive et dans les cours d'eau de l'agglomération de Montréal. Toutefois, il n'existe pas de données sur le volume des eaux débordées. Les données portent uniquement sur le nombre de déversements dans l'année, leur durée et sur la qualité d'eau des rives et des cours d'eau (Deschamps, 2010). Ainsi, il est difficile d'évaluer l'efficacité des mesures prises par la ville de Montréal, et de s'assurer que les fluctuations de la qualité de l'eau ne sont pas dues à d'autres paramètres. Sur l'année 2009, le RSMA conclut à une amélioration de la qualité d'eau en rive et des cours d'eau, mais explique cette augmentation par la faiblesse des précipitations annuelles (Deschamps, Breton et Mallet, 2009). Malgré un certain manque d'information, il apparaît évident, d'après ces quelques chiffres, que le problème des eaux de ruissellement représente une réalité en milieu urbain.

Les problèmes de pollution sont réels. Les villes prennent progressivement conscience de la dangerosité de gérer inadéquatement les eaux pluviales. De plus, les réseaux de drainage sont moins adaptés aux conditions actuelles, du fait des changements climatiques et des modifications du tissu urbain (Mailhot *et al.*, 2007). Une des solutions pour résoudre ces problèmes est de s'y préoccuper à la source, afin de réduire le plus tôt possible la quantité

d'eau qui ruissèlera. C'est pourquoi il est important de comprendre le processus de formation du ruissellement en milieu urbain.

1.2 La gestion intégrée des eaux pluviales ou Low Impact Development

Le *Low Impact Development* (LID) ou *Gestion Durable des Eaux de Pluie* (GDEP) au Québec (ou bien encore *Gestion intégrée des Eaux Pluviales* en France) constituerait une approche efficace pour contrôler les nuisances associées aux eaux de ruissellement et protéger le développement des bassins versants. L'approche LID ou GDEP se distingue des autres procédés ou processus par sa volonté de réduire les impacts dès le développement. Elle s'attaque aux problèmes du ruissellement à la source (Boucher, 2010).

1.2.1 Présentation de l'approche LID

Dans les vingt dernières années, de nouvelles approches de gestion des eaux urbaines ont été développées pour apporter des améliorations environnementales, mais aussi économiques, sociales et culturelles. Les procédés LID sont conçus pour retenir, stocker, infiltrer, ou traiter les eaux de ruissellement, et donc réduire les impacts du développement urbain. L'approche LID inclut les mesures structurelles telles que les marais, mares, fossés, réservoirs d'eau de pluie, aires de biorétention, bandes de filtration ou bien des tranchées d'infiltration. Elle inclut aussi des mesures non structurelles visant à réduire l'imperméabilité des nouvelles constructions, à prôner l'utilisation de sols perméables et de la végétation, à réduire les sources de contamination dès la source et à développer des programmes d'éducation. La démarche LID se focalise sur le contrôle à petite échelle des eaux de ruissellement. En réalité, elle considère les eaux de ruissellement comme une ressource plutôt que comme une nuisance (Boucher, 2010).

Tandis que la plupart des réseaux de drainage classiques utilisent des réseaux de conduites afin d'acheminer l'eau de pluie le plus rapidement possible, le LID utilise des techniques simples à petites échelles pour traiter le problème localement. Ainsi, c'est une démarche sur

mesure, chaque équipement s'adaptant aux conditions présentes sur le site. La construction d'un équipement a toujours pour premier objectif la réduction du débit de ruissellement par l'infiltration de l'eau pluviale ou sa réutilisation *in situ*. Le résultat obtenu est un environnement reproduisant les conditions hydrologiques pré-urbanisation (Lehner *et al.*, 1999). L'approche LID offre une très grande variété de techniques constructives et non constructives. Les infrastructures LID peuvent être pensées sur des terrains contraignants ou libres, sur un équipement existant ou en début de projet. Les opportunités d'appliquer les principes LID sont infinies : la quasi-totalité des caractéristiques d'un aménagement peut être modifiée pour contrôler le ruissellement (bâtiments, routes, trottoirs, cours, espaces verts). L'approche LID est particulièrement adaptée à la rénovation urbaine. Les aménagements demandent peu d'espaces et sont facilement intégrables aux infrastructures existantes (Wood-Ballard *et al.*, 2007).

1.2.2 Ses principes

L'approche LID est fondée sur le principe que la gestion des eaux de ruissellement doit tirer profit de ces eaux et non les éliminer au plus vite. Elle s'inspire des systèmes naturels. La combinaison de ces deux aspects crée un développement à faible impact environnemental dont les règles principales pourraient être :

- intégrer la gestion des eaux de ruissellement dans le développement d'un projet;
- utiliser des systèmes hydrologiques naturels;
- gérer l'eau de ruissellement aussi proche de la source que possible;
- créer un réseau d'aménagements à petite échelle.

L'approche LID utilise une approche systémique qui simule (mime) les fonctions hydrologiques de la nature. Ses stratégies s'appuient donc sur une bonne connaissance du cycle de l'eau et de l'écologie pour développer des techniques qui combinent une grande variété de procédés physiques (augmentation de l'interception, infiltration et évaporation, décantation et filtration des sédiments), chimiques (absorption, chélation, échange ionique),

et biologiques (transpiration, décomposition microbienne, absorption, nutrition) (Lehner *et al.*, 1999).

1.2.3 Les différentes mesures

Le Tableau 1.1 regroupe différentes mesures de gestion durable des eaux de pluie et distingue leur fonction. Ces mesures sont parfois désignées différemment d'un organisme à l'autre, la terminologie se conforme ici au LID.

Tableau 1.1 Les différentes mesures LID
Adapté de (Boucher, 2010) et de (Podolsky et MacDonald, 2008)

Application	Mesures	Réduction du volume de ruissellement	Infiltration	Rétention ¹	Détention ²	Contrôle de la qualité
Contrôle à la source	Jardin de pluie	X	X	X	X	X
	Bande filtrante					X
	Toiture verte	X		X	X	X
	Citerne			X		
	Déconnexion des gouttières	X	X			
	Pavage poreux	X	X			
	Forêt urbaine	X		X		
En réseau	Noue	X	X			X
	Fossé	X	X			
En aval du quartier	Bassin	X		X		
	Marais filtrants	X	X	X	X	X

¹ : Stockage de longue durée des eaux de ruissellement avec possibilité d'évapotranspiration ou de recyclage de l'eau ultérieurement.

² : Stockage de courte durée et vidange une fois l'événement pluvieux terminé.

Les aménagements du LID peuvent être divisés en trois catégories suivant leur apparition dans le processus de gestion des eaux de pluie (tableau 1.1). Certains aménagements sont conçus de façon à ce que les eaux de ruissellement franchissent deux ou trois mesures LID. Cette succession permet de créer plusieurs étapes de filtration des polluants et de ralentir d'autant plus la vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement. Les différents aménagements LID sont décrits en annexe I.

1.2.4 Des stratégies d'aménagements

Parallèlement à l'étude sur le contrôle hydrologique, l'approche de planification retenue pour un site devrait intégrer des stratégies d'aménagement qui permettent d'accroître le captage de l'eau à la source et de diminuer le ruissellement. La réduction de la largeur des rues et la diminution de la superficie des espaces de stationnement permettent de restreindre les surfaces imperméables. La présence d'un couvert végétal et d'arbres favorisera aussi la réduction des eaux de ruissellement. Le *Groupe interdisciplinaire de recherche sur les banlieues*, de l'Université Laval, a développé un modèle de « rue écologique », dans lequel la largeur des voies de circulation a été réduite de façon à intégrer un trottoir, une bande de percolation ou un fossé engazonné. La surface de pavage est réduite, de même que la quantité d'eau de ruissellement (Boucher, 2007). Ces stratégies d'aménagement peuvent être pensées à l'échelle de la parcelle, mais sont d'autant plus efficace à l'échelle d'un quartier (réduire la surface des voies de circulation et des stationnements, protéger et accroître les espaces naturels, etc.).

1.2.5 La problématique des arbres

Les arbres sont des éléments à part dans les infrastructures LID, puisqu'ils ne sont en général pas inclus en tant que tel. Pourtant, ils constituent au même titre que les toits verts un outil pour capter l'eau de ruissellement. La réponse de l'arbre à une pluie donnée en milieu naturel est bien documentée. De nombreuses espèces d'arbres ont été étudiées sous différentes conditions atmosphériques et sous différentes saisons. Les caractéristiques de l'olivier, du pin

maritime, du chêne, de l'acacia pour ne citer qu'eux sont ainsi parfaitement connues en milieu naturel. Les forêts urbaines sont documentées sur une échelle de temps étendu. Cette végétation urbaine est aussi composée d'arbres implantés individuellement qui contribuent à la viabilité de l'environnement urbain. Ils impactent les conditions climatiques locales et influent sur les eaux de ruissellement. En effet, la composition urbaine et les différents types d'arbres définissent la façon dans laquelle le ruissellement et la charge des polluants s'écoulent (Vaze et Chiew, 2003).

Du point de vue de l'hydraulique, l'effet le plus remarquable des arbres est l'interception de la pluie par le couvert forestier. Les arbres retiennent l'eau de pluie *in situ*, plus ou moins longtemps, ralentissant les débits vers l'exutoire. L'interception est définie comme la différence entre la pluie brute (la pluie qui tombe sur la cime) et la pluie au sol (Xiao *et al.*, 2000). Elle donne lieu à une perte d'interception (évaporation au-dessus du sol à distinguer de la transpiration), et à une redistribution au sol de la fraction interceptée, par l'intermédiaire du ruissellement sur les troncs et de l'égouttement des cimes. Elle est déterminée par trois facteurs principaux : la nature et l'ampleur de l'événement pluvieux, l'espèce de l'arbre et les conditions climatiques (vent, température, pression). La densité du couvert, le niveau d'entretien et la saison en cours sont aussi décisifs. Ces caractéristiques sont complexes à comprendre en milieu urbain, du fait des variations climatiques, d'une grande diversité dans les essences présentes et de conditions atmosphériques spécifiques (Shepherd, 2006). Les études sur l'interception des eaux de pluie par les arbres ont été conduites principalement dans des forêts naturelles, où l'importance de la couverture, de la distribution spatiale des arbres est connue. Plusieurs études ont montré le lien direct entre l'âge, l'espèce et la structure de l'arbre avec le volume intercepté. Dans les zones forestières, l'eau interceptée peut se mesurer jusqu'à 50% de la pluie nette (Scatena, 1990; Schellekens *et al.*, 1999). Globalement, les arbres à feuillage persistant interceptent plus que les arbres à feuillage caduc (Geiger, 2003). La plupart des études ont été réalisées annuellement, il existe peu de données sur des événements pluviaux ponctuels. La relation entre la pluie et l'interception dépend de l'échelle de temps considérée, les données obtenues sur une longue période ne peuvent pas être extrapolées à une durée plus courte. Il existe différents modèles

mathématiques simulant le processus hydrologique des arbres. Par exemple, le modèle de Gash révisé décrit les différentes étapes de l'interception d'une pluie par un arbre. Gash a distingué trois phases : une phase de mouillage (équation 1.1) où la pluie n'est pas assez forte pour saturer la canopée, une phase de saturation (équation 1.2) et une phase de séchage (équation 1.3) après que la pluie est cessée (Van Dijk et Bruijnzeel, 2001).

$$I = n\{c P'_G - S\} \quad (1.1)$$

$$I = \frac{\bar{E}}{\bar{R}} \sum_{j=1}^n (P_{Gj} - P'_G) \quad (1.2)$$

$$I = n S \quad (1.3)$$

avec I les pertes par interception (mm), P_{Gj} la pluie de mouillage (mm), P'_G la pluie nécessaire pour saturer la canopée (mm), $\bar{E}$ le taux d'évaporation moyen pour la canopée humide (%), S la capacité de la canopée (mm), n nombre d'événements quiaturent la canopée, $\bar{R}$ intensité moyenne de la pluie (mm/h) et c la fraction de couverture de la canopée.

Xiao *et al.* (1998) a utilisé ce modèle d'interception pour étudier l'impact de la forêt de Sacramento. Il a étudié l'interception d'une forêt urbaine pour cinq intensités de pluies (comprises entre une pluie biennale et une pluie centennale). Cette forêt offre une interception pluvieuse comprise entre 4,9 % et 19,7 %. Ces modèles sont en général utilisés à l'échelle de la ville pour étudier la forêt urbaine. Leur utilité à l'échelle d'une rue ou d'une parcelle ne semble toutefois pas avoir été démontrée.

1.3 La modélisation d'un réseau de drainage urbain

Des modèles ont été développés afin d'aider à la conception des infrastructures hydrauliques en zone urbaine. Ceux-ci ont évolué afin de répondre aux exigences de plus en plus pointues des concepteurs. La plupart intègrent des méthodes permettant de modéliser les LID. Le but des modèles dans l'ingénierie du drainage urbain est de représenter un système de drainage et ses réponses à différentes conditions. Les ingénieurs ont depuis toujours cherché à modéliser pour construire les systèmes de drainage. Les eaux qui s'abattent sur un bassin versant se

divisent selon trois phénomènes. D'abord, la pluie humidifie la surface du bassin, puis elle s'infiltre dans le sol, enfin elle ruisselle jusqu'à un point de captage. Pour tout bassin versant, qu'il soit situé en milieu urbain ou non, le volume et le débit des eaux de ruissellement sont calculés à partir :

- des caractéristiques de la pluie : intensité, durée et répartition spatio-temporelle;
- des caractéristiques de la surface du bassin versant : nature, pente, présence d'aménagements et imperméabilité;
- des lois hydrauliques (ou hydrologiques) relatives aux écoulements à surface libre.

La modélisation reproduit la relation qui existe entre une pluie et un hydrogramme de ruissellement à l'exutoire.

1.3.1 Méthodes manuelles

Il est important de faire la distinction entre les modèles mathématiques utilisés en hydrologie et les modèles informatiques qui utilisent eux-mêmes plusieurs modèles mathématiques. Les modèles peuvent être qualifiés de manuels lorsqu'à partir des équations, un utilisateur averti est capable de calculer les débits de sortie. Cette méthode manuelle permet d'étudier rapidement un événement pluvieux unique. Lorsqu'il s'agira d'étudier un réseau sur une échelle de temps plus longs, on préférera l'utilisation des modèles informatiques qui sont, pour certains, capables de simuler en continu.

Méthode rationnelle

La méthode rationnelle (équation 1.4) permet de calculer rapidement les débits de ruissellement maximaux pour des pluies uniformes tombants sur des bassins versants de faible superficie; c'est donc une méthode adaptée aux bassins versants urbains (échelle de quartier).

$$Q = K C i A \quad (1.4)$$

avec Q le débit maximal à l'exutoire (m^3/s), C le coefficient de ruissellement, i l'intensité moyenne maximale sur la durée t_c (mm/h), K facteur de conversion des unités et A la superficie du bassin versant (m^2).

La méthode rationnelle pose de nombreuses hypothèses qui réduisent énormément la complexité du bassin versant étudié. Par exemple, les surfaces imperméables sont censées être uniformément réparties sur le bassin versant. Malgré ces hypothèses simplificatrices, la méthode rationnelle est encore utilisée pour obtenir rapidement et aisément des valeurs des débits de ruissellement maximaux suffisamment précises pour intervenir sur de réseaux d'égouts pluviaux de taille réduite. Le défaut principal de cette méthode est qu'elle n'est pas en mesure de calculer les débits pour différentes conditions : pluies d'intensité variable dans le temps et l'espace, coefficients de ruissellement variables dans le temps, etc. (Brière, 2006).

Méthode TR55

Le département d'Agriculture des États-Unis a développé une méthode de calcul empirique basée sur le potentiel du sol à absorber une certaine quantité d'humidité. Sur la base d'observations, ce potentiel de stockage S est lié par une relation au paramètre CN (Curve Number) qui est une caractéristique du type de sol et de son degré initial d'humidité.

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \text{ avec } S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (1.5)$$

avec Q le débit à l'exutoire (m^3/s), P l'intensité cumulée (mm), S la hauteur de rétention maximale (mm) et CN le Curve Number.

Contrairement à d'autres méthodes manuelles, TR55 permet de calculer le débit maximal et le volume du ruissellement. Elle a aussi l'avantage d'être adapté aux zones urbaines. Néanmoins, cette méthode possède un grand désavantage : la restriction d'utiliser des événements pluvieux s'étalant sur 24 heures (Walesh, 1989).

1.3.2 Modèles informatiques

Les programmes informatiques pour la conception des systèmes de drainage ont émergé dans les années 70. Le premier modèle SWMM (Storm Water Management Model) est apparu aux États-Unis et est toujours en développement de nos jours (Rossman, 2009). En Europe, le modèle MOUSE (Modelling of Urban Sewers), développé au Danemark dans les années 80 est populaire (Rivard, 1998). À présent, il existe de très nombreux outils informatiques, certains concentrés uniquement sur certains aspects de la conception. Il y a essentiellement deux utilisations des modèles hydrauliques : la conception de nouveaux systèmes de drainage et l'analyse de l'existant. Pour la conception, les détails physiques du système sont déterminés afin que le drainage soit satisfaisant dans des conditions données. Dans le cadre de l'analyse de l'existant, les détails physiques sont réels, et l'utilisation du modèle vise à comprendre comment le système réagit à certaines conditions dans des conditions particulières (surcharge du réseau, inondation partielle, etc.), le but étant de trouver quelles améliorations apporter au système. Le même modèle peut être utilisé pour remplir les deux tâches, mais des outils spécialisés ont été développés.

Les modèles comme SMWW ou MOUSE, sont basés sur des relations entre relations mathématiques et paramètres physiques. Tous ces modèles impliquent des simplifications des paramètres physiques. Ils sont déterministes, une combinaison de données en entrée fournira toujours les mêmes résultats en sortie. Les résultats d'une modélisation sont ainsi à utiliser avec précaution et ne seront pas déclarés corrects dès la première simulation. Il existe aussi des modèles stochastiques qui prennent en compte les probabilités et permettent de simuler des éléments plus complexes, comme la qualité des eaux de ruissellement.

Un modèle déterministe doit représenter les entrants (précipitations et eaux usées) et les convertir en données requises pour la simulation : débit et hauteur d'eau. Le modèle mène à cette conversion en représentant le phénomène physique qui se joue par un modèle mathématique complexe. Cela sous-entend une bonne compréhension scientifique des

processus hydrologiques et hydrauliques ayant lieux et une simplification appropriée de certains facteurs (Butler et Davies, 2000).

1.3.3 Présentation des modèles les plus courants

Ainsi, tous les modèles ne sont pas équivalents. Certains traitent uniquement de l'aspect quantitatif des eaux de ruissellement (SIRDU, ILLUDAS). D'autres tiennent en compte en plus de l'aspect qualitatif, dans le but de quantifier les charges polluantes (SWMM, MOUSE).

Famille SMWW

Le modèle SWMM développé par l'agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA) est le modèle le plus couramment utilisé en Amérique du Nord. Il est d'utilisation libre et est toujours développé par de nombreux spécialistes ce qui en fait un outil très bien documenté et évolutif. Il existe aussi des déclinaisons commerciales de SWMM comme PC-SWMM ou XP-SWMM (Rossman, 2009).

Famille HYMO

Le modèle HYMO (Hydrologic Model) conçu en 1972 par le *United States Soil Conservation Service* (SCS) est utilisé au Canada dans sa version plus récente OTTHYMO. Il simule principalement le ruissellement des bassins versants ruraux, mais est parfois employé pour le ruissellement dans les réseaux majeurs et mineurs (Rivard, 1998).

Famille ILLUDAS

Ce modèle développé en 1974 par le département de l'eau de l'État de l'Illinois, qui a évolué pour donner naissance à ILUDRAIN, est toujours utilisé de nos jours. ILLUDAS a la capacité de modifier automatiquement la dimension des conduites pour répondre au débit maximal modélisé (Wanielista, 1993).

Famille HEC

Le modèle HEC (Hydrologic Engineering Center), développé par le corps de génie de l'armée des États-Unis, modélise, à partir d'hyétogrammes de précipitations, le ruissellement de bassins versants drainés par des réseaux complexes de rivières ou d'égouts pluviaux (Nix, 1994).

MOUSE/MIKE

Le modèle MOUSE a été développé par l'Institut Danois d'Hydraulique en 1983. Il contient un très grand nombre d'options pour modéliser les processus physiques. Ainsi, il permet de choisir entre plusieurs modèles hydrauliques pour représenter les écoulements au sein du bassin versant : onde cinématique, onde dynamique et onde diffusive. La suite MIKE a remplacé MOUSE ces dernières années. La version MIKE URBAN intègre notamment un module de SIG.

1.4 Modélisation des quartiers

Les études consistant à modéliser des bassins versants urbains sont nombreuses. Les échelles d'études sont diverses : à l'échelle de la région urbaine, du quartier, du lotissement en passant par la ville. Certaines études présentent une échelle de temps de plusieurs années alors que d'autres se focalisent sur quelques événements pluviaux précis. La présente section résume les résultats d'études menées pour l'évaluation qualitative des infrastructures LID en milieu urbain.

1.4.1 Modélisation d'un quartier de Laval

Fuamba *et al* (2010) a modélisé un quartier en développement à Laval de 7,88 ha d'un pourcentage d'imperméabilité moyen de 30 %. PC-SWMM a été utilisé pour appliquer une pluie de Chicago (pluie de conception) de 1/2 ans et de 1/10 ans (Fuamba *et al.*, 2010). Trois objectifs ont été fixés pour l'étude : l'infiltration d'un minimum de 75 % des pluies faibles, la réduction d'au moins 30 % du débit de pointe à l'exutoire et l'amélioration de la qualité des

rejets. L'étude a défini cinq scénarios avec des imperméabilités différentes (de 10 % à 30 % d'imperméabilité), répondant aux objectifs sélectionnés. Des infrastructures LID ont ensuite été sélectionnées pour répondre à ce taux d'imperméabilité. Les hypothèses d'implantation des infrastructures LID ont été simplifiées, puisque les infrastructures LID sont considérées comme des surfaces perméables. Elles ne produiront pas de ruissellement. Pour répondre au premier objectif, l'étude prévoit d'atteindre un objectif de 25 % d'imperméabilité par l'implantation de bordures perméables et des trottoirs drainants sur 11,5 % de la surface totale et la réduction de l'imperméabilité des parcelles de lotissement de moitié grâce à des aménagements paysagers. L'étude ne donne pas de renseignements pour atteindre le second objectif. Le troisième objectif sera atteint grâce à l'implantation d'un jardin de pluie. Cette étude reste très sommaire quant aux choix des infrastructures LID. Elle ne présente pas des résultats tenant compte de la totalité des processus hydrologiques liés à l'utilisation des infrastructures LID.

1.4.2 SWMM et l'évapotranspiration

Roehr et Kong (2010) ont modélisé l'implantation de toits verts sur une surface de 0,4 ha en utilisant SWMM. Il considère la taille d'un quadrilatère d'immeubles de Vancouver. Le toit vert est simulé comme étant une structure de limon sableux tandis que l'infiltration utilise la méthode Green-Ampt. L'ensemble des pluies de l'année 2006 a été simulé sur le bassin versant. Les résultats obtenus ont été combinés avec l'équation 1.6 qui modélise l'évapotranspiration (Roehr et Kong, 2010).

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1.6)$$

avec ET_c = évapotranspiration maximale (mm), ET_0 = évapotranspiration de référence pour une espèce végétale donnée (mm) et K_c = coefficient Crop.

La valeur du coefficient K_c est affectée par la nature de la végétation, sa hauteur, sa durée de cycle, et son taux de croissance, mais aussi par la fréquence des pluies. K_c est toujours établi expérimentalement au début, pour une région et une culture données, puis ensuite confiné

dans des tables pour une utilisation ultérieure dans la même région ou dans une région similaire. Les valeurs du coefficient K_c sont théoriquement comprises entre 0 et 1. Un K_c de 0,3, correspondant aux plantes à faible teneur en eau, a été choisi pour les toits extensif composés de sebum (Roehr et Kong, 2010).

Le ruissellement du toit correspond alors à la différence entre le ruissellement SWMM et l'évapotranspiration calculée. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'un toit en bitume (asphalte) et à des résultats *in situ*. Cette méthode a conduit à des résultats fiables pour la simulation annuelle de la réponse des toitures vertes (Roehr et Kong, 2010). Elle conclut à une réduction annuelle de 20 % du ruissellement par les toits verts. Néanmoins, elle présente des limites en ce qui concerne la simulation d'événements pluviaux sur une période plus courte.

1.4.3 Réponse des infrastructures LID aux averses

Le guide de la gestion des eaux de ruissellement publié par la Colombie-Britannique incorpore le résultat de l'étude du comportement d'une aire résidentielle soumise à une pluie de forte intensité d'une durée courte (Stephens, Graham et Reid, 2002). L'augmentation de la fréquence des averses est l'un des effets des changements climatiques. Un scénario de référence et quatre scénarios d'implantation d'aménagements LID ont été testés avec une pluie centennale. Cette étude montre que la combinaison des aménagements LID réduit considérablement le débit maximal d'eau ruisselée (Stephens, Graham et Reid, 2002). L'implantation de toits verts de 30 cm d'épaisseur sur l'ensemble des toits du quartier et de surfaces poreuses sur les surfaces de stationnement et de circulation induit une réduction de 80 % du débit maximal d'eau ruisselée. L'ajout de tranchées drainantes au bord des routes au scénario précédent provoque une réduction de 92 % du débit maximal d'eau ruisselée. Ces résultats sont intéressants. Néanmoins, la méthodologie utilisée dans cette étude n'est pas présentée; il est ainsi nécessaire de relativiser les résultats chiffrés, car les hypothèses de simulation ne sont pas énoncées.

1.4.4 L'Élément Hydrologique Urbain (EHU)

La plupart des modèles modélise le ruissellement par la simulation des surfaces imperméables. Ils ne prennent pas en compte l'influence réelle du sol. Les surfaces perméables saturées contribuent aussi au ruissellement (Berthier, 2001). Le sol joue donc un rôle central, et d'autant plus avec les techniques de gestion intégrée des eaux pluviales, qui mettent à profit la capacité d'infiltration du sol. Le laboratoire des Ponts et Chaussées de Nantes a ainsi développé un modèle tenant compte des caractéristiques du sol (Berthier, 1999). L'Élément Hydrologique Urbain (EHU) modélise une parcelle unitaire et la voirie adjacente. Le EHU est composé de quatre éléments : voirie, bâtiment, sol et évacuation des eaux pluviales (Figure 1.4).

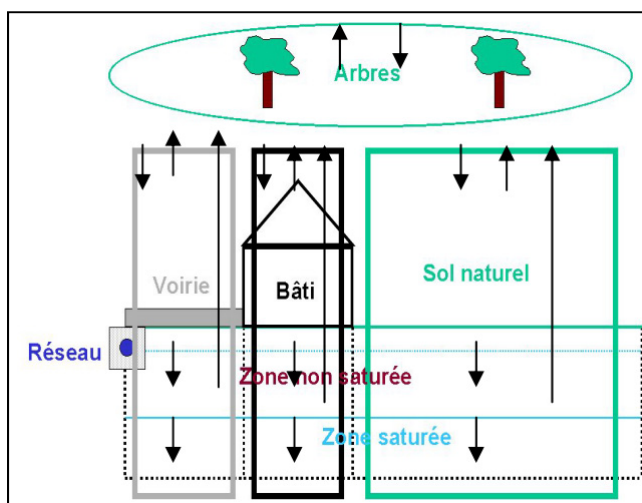


Figure 1.4 L'élément hydrologique urbain
Tirée de (Morena, 2004)

Le bassin versant sera décrit comme un ensemble de EHU relié entre eux par un système de drainage. Il simule trois composantes du débit : le ruissellement des surfaces imperméables, le ruissellement des surfaces naturelles et le drainage d'eau par le sol. Un bilan hydrologique est calculé pour chaque composante : interception, infiltration et évapotranspiration. Le modèle a été testé sur le site de Rezé (Nantes) et présente des résultats intéressants. La forme de l'hydrogramme à l'exutoire n'est pas modifiée par les surfaces naturelles et le drainage

d'eau par le sol. Le volume d'eau ruisselé est augmenté, de l'ordre de 11%, à l'année par rapport à une modélisation traditionnelle car les surfaces perméables produisent du ruissellement une fois qu'elles sont saturées. (Berthier, 2001). Une limite apparaît dans le raisonnement : les surfaces naturelles sont généralisées, l'arbre étant étudié de la même façon que la pelouse. L'étude précise des aménagements LID serait peu réalisable avec cette méthode. Berthier *et al.* (2001) a estimé que le modèle EHU expliquait 15% de la variabilité du coefficient d'écoulement. Cette approche montre la voie pour d'autres approches dans la modélisation hydrologique urbaine.

1.4.5 Synthèse

Les études proposant de modéliser la réponse hydraulique en milieu urbain sont nombreuses. Néanmoins, peu d'études se sont intéressées à modéliser avec précision la réponse des infrastructures LID d'un quartier à un événement pluvieux. Les études modélisant des scénarios d'aménagement mixant plusieurs infrastructures LID tout en conservant un aspect réaliste sont rares. Aussi, il est vite apparu que modéliser des infrastructures LID était une tâche complexe et que chacun créait sa propre méthode de modélisation. Dans cette optique, plusieurs méthodes de modélisation ont été étudiées et comparées. L'objectif final est, dans le cas de la présente démarche, de trouver la méthode la plus adéquate pour modéliser les modifications sur le quartier choisi et atteindre les objectifs de la présente étude définis en introduction de ce mémoire.

1.5 L'utilisation de SWMM pour modéliser des aménagements de gestion intégrée des eaux de pluie

SWMM représente un système de drainage comme des transferts d'eau entre plusieurs modules à l'aide d'objets (Butler et Davies, 2000). Le module « atmosphère » représente les chutes de pluie et de polluants sur la surface simulée. Le module « surface », qui est représenté par un ou plusieurs bassins versants, reçoit les précipitations en provenance du module « atmosphère » sous forme de neige ou de pluie. Le débit sortant est envoyé soit au

module « souterrain » sous forme d'infiltration, soit au module « transport » sous forme de ruissellement. Le module « transport » contient l'ensemble des éléments nécessaires à la création d'un réseau d'adduction. Il peut aussi définir des unités de traitement et de stockage (Akan, 2003). Ainsi, SWMM permet la modélisation des deux réseaux de drainage (majeur et mineur), soit :

- la représentation simultanée du ruissellement de surface le long du tracé des rues et sa captation par les puisards (réseau majeur),
- l'écoulement hydraulique en conduite (réseau mineur).

1.5.1 Hydrologie

1.5.1.1 Bassin versant

SWMM est un modèle distribué ce qui signifie que l'aire d'étude peut être sous-divisée en un nombre quelconque de sous bassins irréguliers, afin de mieux représenter les effets qu'auront la topographie, la typologie du sol et les réseaux de drainage sur la génération du ruissellement. Le sous bassin versant idéal est un rectangle avec une pente uniforme qui draine les eaux de pluie à un exutoire unique. De plus, chaque sous bassin se divise en trois zones : une zone imperméable avec de l'emmagasinement de surface, une zone imperméable sans emmagasinement de surface et une zone perméable avec emmagasinement de surface. La zone perméable permet de simuler l'infiltration dans le sol (Gironás, Roesner et Davis, 2009).

Les caractéristiques hydrologiques de chaque sous bassin sont définies par un certain nombre de paramètres d'entrée. Les paramètres requis pour les deux types de surfaces, perméable et imperméable, sont la pente, la rugosité définie par le coefficient de Manning, l'imperméabilité soit le pourcentage de surfaces imperméable par rapport à la surface totale, l'emmagasinement de surface modélisé par un coefficient et le pourcentage de surfaces imperméable sans emmagasinement de surface (Rossman, 2009). Les caractéristiques hydrologiques d'un bassin versant sont définies par les paramètres présentés par le Tableau

1.2. Il s'agit de caractéristiques intrinsèques au bassin versant. Ils existent pour le paramètre d'emménagement, qui est la hauteur d'eau stockée sur la surface du bassin versant et le coefficient de rugosité n des tables où sont indiquées des valeurs recommandées selon le type de bassin versant modélisé. D'autres paramètres existent pour définir les écoulements souterrains, la présence de neige ou de polluants sur le bassin versant.

Tableau 1.2 Caractéristiques d'un bassin versant

Aire	Surface du bassin versant.	ha
<i>Width</i>	La « largeur » du bassin versant peut être définie comme le rapport entre la surface du bassin versant et la longueur du chemin le plus long que l'eau peut emprunter pour le traverser. Il ne s'agit pas d'une mesure physique de la largeur mais d'un paramètre de réglage.	m
Pente	La pente moyenne du bassin versant : elle est la même pour les surfaces perméables et imperméables.	%
Imperméabilité	Le pourcentage de surface imperméable sur le bassin versant dans laquelle la pluie ne peut pas s'infiltrer. C'est le paramètre le plus sensible dans SWMM.	%
Coefficient de rugosité n	C'est le coefficient de rugosité de l'équation de Manning-Strickler caractéristique de la nature des sols. Des valeurs séparées sont à définir pour les portions perméables et imperméables du bassin versant puisque le n perméable est généralement plus grand que le n imperméable.	$s/m^{1/3}$
Paramètre d'emménagement D	C'est la hauteur d'eau stockée sur la surface du bassin versant. Elle représente des phénomènes tels que les dépressions du sol, l'interception par les végétaux ou bien le mouillage des surfaces. Elle doit être dépassée avant de voir apparaître du ruissellement. Différentes valeurs peuvent être utilisées pour les portions perméables et imperméables du bassin versant.	mm
Pourcentage de surface imperméable sans emménagement	C'est le pourcentage de la surface imperméable dépourvue de stockage dans les dépressions du sol.	%
Routage des sous surfaces	Ce paramètre permet de définir la façon dont le ruissellement rejoint l'exutoire. Trois options sont disponibles : Perméable (il traverse la surface imperméable puis la surface perméable pour rejoindre l'émissaire), Imperméable (il traverse la surface perméable puis la surface imperméable pour rejoindre l'émissaire) et Émissaire (il traverse les deux surfaces parallèlement jusqu'à l'émissaire).	
Pourcentage de routage	Pourcentage de ruissellement drainé entre les sous surfaces.	%

1.5.1.2 L'infiltration

Trois différentes méthodes pour modéliser les pertes par infiltration dans l'aire perméable du bassin versant sont utilisables dans SWMM.

Horton (équation 1.7) est un modèle empirique qui exprime la décroissance exponentielle, au cours d'une averse, de la capacité d'infiltration du sol depuis une valeur initiale jusqu'à une valeur limite qui exprime le potentiel d'infiltration à saturation. En effet, plusieurs observations montrent que la capacité d'infiltration d'un sol diminue très rapidement au début de l'infiltration, mais par la suite, la décroissance est plus progressive et tend vers un régime constant, proche de la valeur de la conductivité hydraulique à saturation (Figure 1.5).

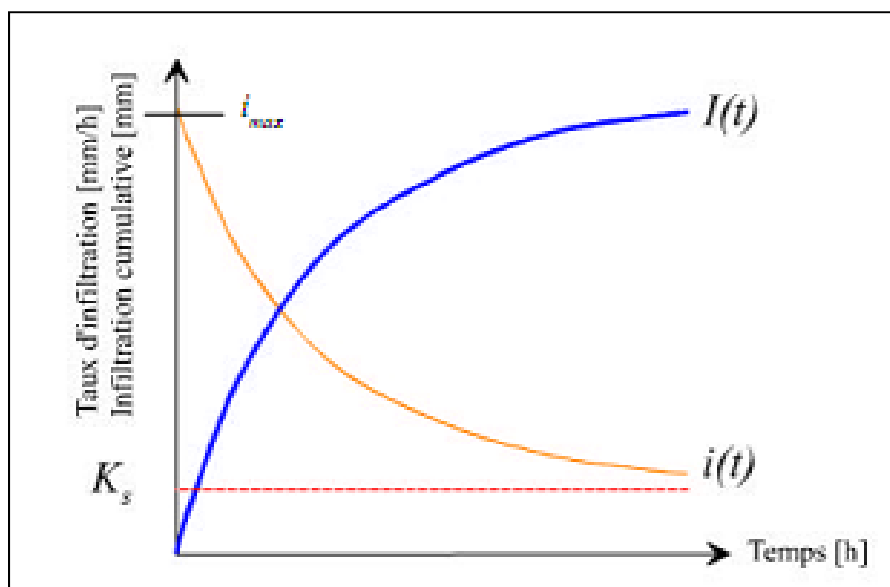


Figure 1.5 Évolution du régime d'infiltration et de l'infiltration cumulative au cours du temps
Tirée de (Telliez, 2010)

Les paramètres de ce modèle sont donc les taux minimum et maximum d'infiltration, une constante de temps qui fixe la vitesse de la décroissance et la durée d'assèchement du sol (Gironás, Roesner et Davis, 2009).

$$i(t) = i_{min} + (i_{max} - i_{min})e^{-kt} \quad (1.7)$$

avec i_{max} la capacité d'infiltration maximale du sol (mm/h), i_{min} la capacité d'infiltration minimale dans le sol (mm/h) et k une constante de temps (h).

Le modèle Green-Amp (équation 1.8) est basé sur une approche plus physique. Il décrit le mouvement de l'eau dans le sol et notamment les forces de gravité et de succion, en fonction de certains paramètres du sol. Le processus d'infiltration de l'eau dans le sol est le suivant : la pluie qui arrive sur le sol y pénètre régulièrement selon un front d'humidification qui progresse en profondeur sous l'effet des forces de gravité et de succion (Figure 1.6). Les paramètres principaux sont le potentiel de succion, les teneurs en eau initiale et finale, la conductivité hydraulique et la charge hydraulique (Telliez, 2010).

$$\frac{dI(t)}{dt} = K_S \left(\frac{(h_0 - h_f)(\theta_f - \theta_0)}{I(t)} + 1 \right) \quad (1.8)$$

avec $I(t)$ la vitesse d'infiltration (mm/h), K_S la conductivité hydraulique du sol saturé (mm/h), h_0 la hauteur d'eau au niveau de la surface du sol (mm), h_f le potentiel de succion du front humide (mm), θ_f la teneur en eau finale du sol (%) et θ_0 la teneur en eau initiale du sol (%).

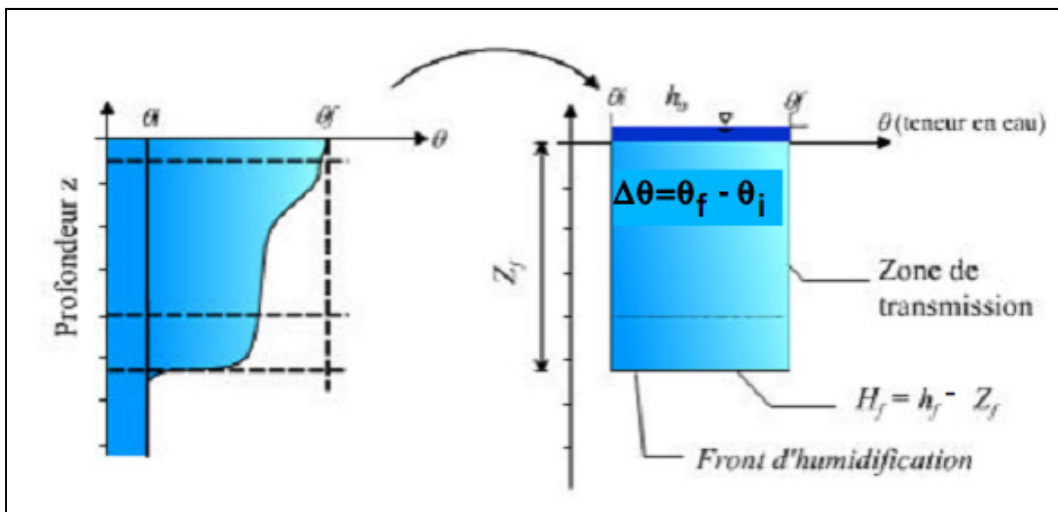


Figure 1.6 Schéma du processus d'infiltration Green Ampt
Tirée de (Telliez, 2010)

La méthode Curve Number est dérivée d'une méthode SCS Curve Number, très utilisée dans des modélisations simplifiées du ruissellement (équation 1.5). Elle assume que la capacité totale d'infiltration du sol peut être trouvée à l'aide du Curve Number qui permet une diminution de cette capacité en fonction de la pluie cumulée (USDA, 1986). Ce Curve Number, un coefficient d'aptitude au ruissellement intermédiaire permet d'estimer la capacité d'infiltration maximale du sol dépendamment du type de sol, des conditions d'humidité initiales du sol et de l'occupation du sol. Il varie entre 0 et 100 et est d'autant plus grand que les surfaces sont imperméables. Cette méthode représente l'infiltration d'une façon plus simplifiée que les méthodes Horton et Green-Ampt.

1.5.1.3 L'évaporation

L'évaporation intervient pour l'eau stagnante sur les surfaces du bassin versant, pour l'eau souterraine et pour l'eau stockée. Elle peut être définie comme une constante, un groupe de valeurs moyennes ou calculées à partir de valeurs quotidiennes de température et de vitesse du vent.

1.5.1.4 La précipitation

La pluie est la principale variable dans une simulation quantitative du ruissellement urbain. Le volume et le débit du ruissellement vont dépendre directement de l'ampleur de la pluie, de sa dimension temporelle et spatiale sur le bassin versant. Chaque bassin versant est relié à un module de création de pluie qui aide à construire des hyétogrammes de pluie, ou à les importer.

1.5.1.5 Le ruissellement

Chaque bassin est traité comme un réservoir non linéaire. Les entrants sont la précipitation et le ruissellement provenant d'autres bassins. Les sortants sont l'infiltration, l'évaporation et le

ruissellement. La capacité de ce réservoir correspond à la hauteur maximale d'eau stockée par la surface. La Figure 1.7 illustre la formation du ruissellement dans SWMM.

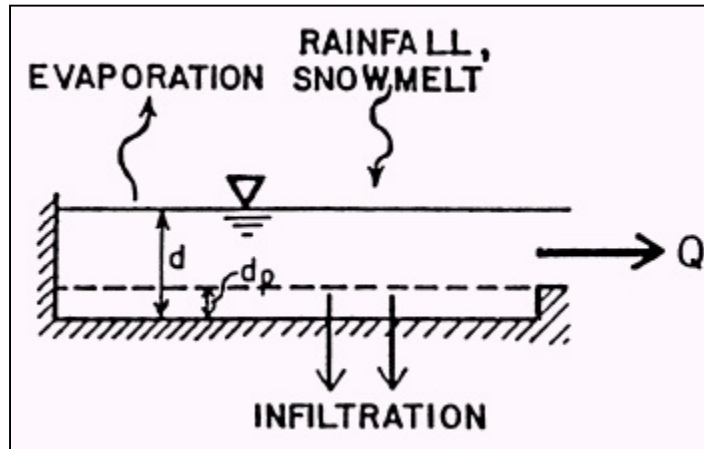


Figure 1.7 Représentation du ruissellement
Tirée de (Rossman, 2009)

Le ruissellement, Q , se produit seulement lorsque la hauteur d (mm) dans le réservoir excède la hauteur de stockage, d_p (mm), le débit sortant est alors donné par l'équation de Manning :

$$Q = W \frac{1.49}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (1.9)$$

avec W la largeur du bassin versant (m), S sa pente (%) et n son coefficient de rugosité ($\text{s/m}^{1/3}$).

1.5.2 Hydraulique

1.5.2.1 Les éléments : nœuds et liaisons

SWMM modélise un réseau de transport comme une série de nœuds connectés par des collecteurs. Les collecteurs contrôlent le débit entre le nœud précédent et le nœud suivant. Ils sont des conduites, mais peuvent aussi être des orifices, des pompes et des déversoirs. Les nœuds sont des éléments de jonction comme des regards, mais peuvent aussi être des

partiteurs ou des unités de stockage. Ils définissent les élévations du réseau. L'eau circulant dans ce réseau à travers collecteurs et nœuds rejoint finalement un nœud final, l'émissaire. Les paramètres définissant les nœuds et collecteurs sont nombreux, mais seulement ceux utilisés dans la présente étude vont être présentés dans le Tableau 1.3.

Tableau 1.3 Caractéristiques hydrauliques

Paramètres	Unités
Longueur de la conduite	m
Géométrie de la conduite	---
Coefficient de rugosité n	$s/m^{1/3}$
Hauteur d'eau maximale	m

1.5.2.2 Les modèles de routage

Le modèle de routage ou de cheminement est le procédé qui en combinant tous les intrants du système simule leur parcours à travers le réseau à chaque pas de temps de simulation. La modélisation de l'écoulement graduellement varié et non permanent dans le réseau repose sur la résolution des équations de Barré de St Venant (Bedient, Hubert et Vieux, 2002). Ces équations, au nombre de deux, traduisent la conservation de la masse (équation 1.10) et la conservation de la quantité de mouvement le long de l'écoulement (équation 1.11).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (1.10)$$

$$\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial x} + J = 0 \quad (1.11)$$

avec Q le débit, x l'abscisse, t le temps, S la surface mouillée, V la vitesse, H la charge hydraulique et J la perte de charge unitaire.

SWMM utilise trois modèles de transfert. Ils correspondent à trois degrés de sophistication dans la résolution des équations (Telliez, 2010). Le modèle Steady Flow est une translation immédiate de l'hydrogramme de l'entrée à la fin du réseau sans délais ni modification du flux. Il considère à chaque pas de temps de calcul, que l'écoulement est permanent et uniforme. Les hydrogrammes entre l'entrée et la sortie des conduites, ne subissent ni décalage dans le temps, ni amortissement. Ce modèle ne peut représenter ni les effets de stockage de l'eau dans les réseaux, ni les inversions du sens de l'écoulement, ni les écoulements en charge.

Le modèle de l'onde cinématique permet de modéliser la modification du débit par les collecteurs. Il constitue une simplification de l'équation de la quantité de mouvement. Il permet de représenter des écoulements dans lequel débit et tirant d'eau varient à la fois dans le temps et dans l'espace. Cela se traduit par un décalage temporel ainsi qu'un amortissement des hydrogrammes entre l'entrée et la sortie d'un collecteur (Telliez, 2010). Cependant, il ne prend en compte ni les influences aval, ni les inversions du sens d'écoulement.

Le modèle de l'onde dynamique est le plus puissant : il permet de modéliser tous les événements observables dans un réseau de drainage, inondations, surcharges de débit, remous car il résout les équations complètes de Barré de Saint Venant et produit donc théoriquement les résultats les plus précis. Avec ce modèle, il est possible de représenter les écoulements en charge dans les collecteurs, lorsque le débit y excède le débit à pleine section. Ce modèle permet de représenter les effets de stockage dans le réseau, les phénomènes d'influence aval, l'inversion du sens de l'écoulement et les écoulements en charge. Il peut être appliqué à n'importe-quel réseau. Chacune de ces méthodes emploie l'équation de Manning pour relier le débit à la profondeur et à la pente (Telliez, 2010). Dans le cadre de la présente étude, le modèle de l'onde cinématique sera utilisé parce que le réseau hydraulique est peu complexe.

CHAPITRE 2

MATÉRIEL ET MÉTHODES

L'étude se propose de quantifier les effets des aménagements LID sur les eaux de ruissellement en milieu urbain. Les différents éléments méthodologiques utiles à cette étude sont décrits à la Figure 2.1. La définition des objectifs de l'étude a permis de mettre en avant les lignes directrices de la démarche de réalisation des présents travaux. Afin de quantifier les impacts des infrastructures LID, il était nécessaire de modéliser un quartier de référence avec une réponse hydraulique connue, afin d'étudier sa réaction à l'implantation de plusieurs aménagements LID. Plusieurs scénarios d'implantation devaient être testés. Suite à la définition de ces objectifs, il a été possible de sélectionner un modèle de simulation hydrologique. Le choix s'est orienté vers le logiciel de simulation SWMM.

Les étapes suivantes, réalisées de front, constituent celles préalables à la modélisation du quartier de référence. Il a fallu sélectionner le quartier à modéliser, créer les pluies qui seraient déversées sur le quartier et enfin sélectionner un modèle d'infiltration des eaux. L'étape suivante consistait à la modélisation du quartier de référence à proprement dite. Il était ensuite temps de définir les différents scénarios d'implantation des infrastructures LID. La contrainte majeure était la forte densité du quartier choisi et donc le peu de latitude pour implanter ces aménagements. Quatre infrastructures ont été sélectionnées (toits verts, fossés, pavé poreux et arbres plantés) pour composer les scénarios. Au cours de l'étude, il est apparu que les moyens de simuler les infrastructures LID n'avaient pas été évalués. Comme il existe de nombreuses méthodes, l'étape suivante a résidé à l'étude de quelques méthodes de modélisation des toits verts et des arbres. Une fois cette étape menée à bien, les scénarios ont été modélisés en utilisant les infrastructures LID définies. Plusieurs simulations ont été réalisées pour tester des modifications de paramètres des infrastructures LID.



Figure 2.1 Étapes de l'étude

2.1 Sélection du modèle SWMM

Le choix du modèle est primordial et doit être mené à bien de façon logique en se questionnant sur un nombre de critères. L'objectif associé à l'utilisation du modèle dans le cadre de la présente étude est qu'il soit capable de fournir un hydrogramme de sortie à l'exutoire des eaux de ruissellement, et ce, le plus simplement possible.

Les modèles les plus simples sont ceux à événement unique. La méthode rationnelle n'est à cet égard pas adaptée à ce type d'événement. Le coefficient de ruissellement est considéré comme constant durant toute la durée de la pluie et ce quelle que soit l'intensité de la pluie, alors qu'il est variable au cours de la pluie. Dans le cas du LID, il est d'autant plus intéressant que ces coefficients varient, puisque les surfaces perméables sont davantage sujettes à des variations. Ensuite, cette méthode ne produit qu'un hydrogramme approximatif. Or, dans le cadre de cette étude, il est nécessaire d'obtenir en sortie un hydrogramme, afin d'identifier la venue et la durée des pics de débit à la sortie de l'exutoire. Enfin, la méthode rationnelle ne tient pas compte des conditions antérieures aux précipitations. Le bassin-versant est supposé sec. Ainsi, la méthode rationnelle ne permet pas de bien mettre en pratique les principes de gestion intégrée des eaux pluviales (Rivard, 1998).

L'ensemble des modèles à événement unique (méthode rationnelle, TR20, TR55, etc.) posent de nombreuses hypothèses simplificatrices. Ils assument tous que les infrastructures vertes sont sèches au début de l'événement pluvieux. Cette hypothèse a peu de chance d'être respectée en pratique, puisque les aménagements sont prévus pour ralentir l'eau au maximum et favoriser l'infiltration progressive de l'eau. Ils sont donc longs à drainer l'eau, et les probabilités qu'un nouvel événement pluvieux se produise sont grandes. Ces modèles ne sont donc pas adaptés. Les modèles à simulation continue semblent davantage en mesure de modéliser les phénomènes d'infiltration et de transpiration en fonction du temps (Beyerlein, 2010).

Bien qu'il existe un très grand nombre de modèles, des sondages réalisés par Welsh auprès des organisations de gestion des eaux publiques et privées montrent que seulement un faible nombre d'entre eux sont répandus et fréquemment utilisés. Ainsi, SWMM, ILLUDAS et HEC sont les plus fréquents (Welsh, 1989). Plusieurs arrondissements de Montréal dont l'arrondissement de Verdun utilise XP-SWMM, une version payante éditée par l'éditeur privé *XP software* basée sur SWMM. Il reprend le même principe de base que SWMM, ajoutant certaines fonctions telles que la visualisation en 2D des conduites.

SWMM peut être utilisé pour toutes les échelles, de l'échelle locale de quartier à celle plus globale. Il peut modéliser le LID même si initialement il n'était pas prévu pour ce type d'utilisation. Néanmoins, il est flexible dans son utilisation et permet ce type d'usage. L'infiltration est modélisée par la sortie d'un réservoir. De plus, son développement se poursuit. SWMM est utilisé dans le cadre de travaux de recherche (Elliott et Trowsdale, 2007). D'après Roehr et Kong (2010), l'utilisation de SWMM avec le modèle d'infiltration Green Ampt donne des résultats assez proches de la réalité et plus réalistes que ceux donnés par la méthode TR55 pour la modélisation des toits verts.

2.2 Modélisation du quartier de référence

La zone d'étude a été sélectionnée pour son coefficient d'imperméabilité important. Située dans l'Arrondissement du Sud-Ouest dans le quartier Saint-Henri (Montréal), la parcelle sélectionnée est un tronçon de la rue Beaudouin compris entre la rue Notre-Dame Ouest et la rue Sainte-Émilie. Il s'agit d'une rue totalement imperméable sans végétation comme le montre la Figure 2.2. Les bâtiments de deux étages bordant la rue sont accolés directement aux trottoirs. La surface totale de la parcelle est de 0,81 hectare et son taux d'imperméabilité est estimé à 95 %.



Surfaces	Aire (ha)	Répartition (%)
Toitures	0,45	55,6
Chaussée	0,18	22,2
Trottoirs	0,14	17,3
Stationnement	0,04	0,5
Parcelle (total)	0,81	

Figure 2.2 Schématisation du quartier d'étude et répartition des surfaces
Adaptée de Google Maps

2.2.1 Bassins versants

La parcelle a été découpée en trois groupes de sous bassin versants. Le sous bassin versant principal représente la rue et les trottoirs. Ses caractéristiques sont décrites au Tableau 2.1. Les toitures, constituant le deuxième sous bassins, ont quant à elles été représentées unitairement. Cela a permis de modifier plus précisément les caractéristiques des toits de la parcelle. Les 45 toits modélisés ont été considérés comme des surfaces totalement imperméables et sans dépression, ce qui est la norme dans l'ensemble des modélisations. Les deux aires de stationnement (en gris sur la Figure 2.2), modélisées unitairement et constituant le troisième sous bassin versant, présentent un asphalté plus poreux et usé; les paramètres d'imperméabilité et de stockage de surface ont donc été ajustés en conséquence.

Tableau 2.1 Caractéristiques du bassin versant principal

Aire (ha)	0,34
<i>Width</i> (m)	14,4
Pente (%)	0,5
Imperméabilité (%)	95
Coefficient de rugosité n imperméable ($s/m^{1/3}$)	0,011
Coefficient de rugosité perméable ($s/m^{1/3}$)	0,24
Paramètre d'emmagasinement D imperméable (mm)	1,3
Paramètre d'emmagasinement D perméable (mm)	2,54
Pourcentage de surface imperméable sans emmagasinement (%)	100

2.2.2 Pluies utilisées

Les pluies les plus fréquentes, c'est-à-dire inférieures à 12 mm d'hauteur totale d'eau précipitée, devraient être totalement capturées sur le site et réutilisées ou infiltrées autant que possible. Les pluies comprises entre 12 et 38 mm d'hauteur d'eau précipitée sont responsables d'environ 75 % des débordements et peuvent donc être qualifiées de pluies clés en termes de déplacement de masse de polluants (Huber, Cannon et Stouder, 2006). Les pluies de cette catégorie devraient être stockées pour aider le drainage traditionnel. Les pluies supérieures sont moins fréquentes et ne sont en général pas prises en compte pour la conception des infrastructures LID (Huber, Cannon et Stouder, 2006).

De manière à approfondir l'étude des scénarios proposés, plusieurs pluies ont été créées (Figure 2.3). Une pluie inférieure de 12 mm a permis d'étudier le système pour des pluies fréquentes qui doivent être capturées sur site. Une pluie de 24 mm a été étudiée afin d'évaluer le système dans un cas critique avec l'observation de la saturation des infrastructures LID. Ces pluies sont tirées de l'étude de modélisation de toits verts menés par Hilten *et al* (2008). Les pluies dites décennales et centennales n'ont pas été testées puisqu'elles étaient trop importantes pour les objectifs avoués du LID. Enfin, deux événements pluviaux enregistrés par la station météorologique de l'arrondissement Verdun ont été utilisés pour simuler des situations plus complexes (Underground, 2011). La « Verdun 1 » est une pluie de 32 mm d'une intensité maximale de 6 mm/h avec une trainée assez importante. La « Verdun 2 » est une précipitation de 32 mm composée de deux événements pluviaux de faible intensité (intensité maximale de 2,4 mm/h) mais de longue durée (34 heures). Le premier événement de 21 mm a permis d'étudier la réponse du quartier avec un système saturé lors du passage du deuxième événement de 11 mm.

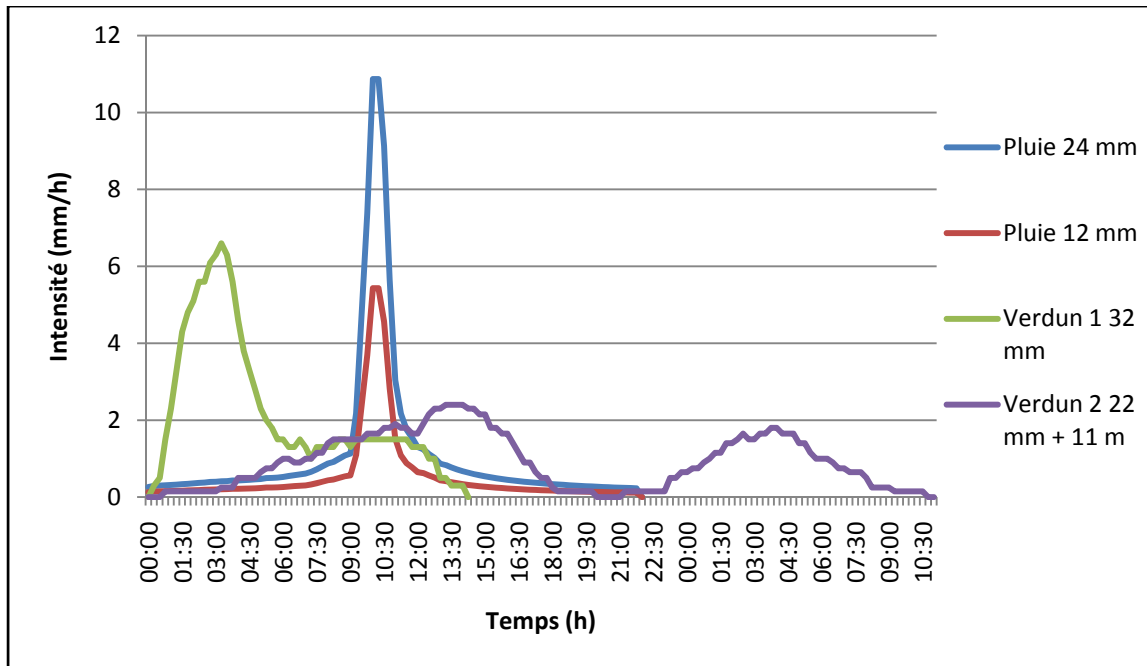


Figure 2.3 Présentation des pluies de l'étude

2.2.3 Infiltration

Une étude comparative à l'aide de plusieurs simulations a été menée afin de déterminer la méthode d'infiltration la plus efficace dans le cadre de la présente étude. Les résultats de simulation obtenus ont été sensiblement les mêmes (Figure 2.4). La méthode Horton apparaît comme étant la plus complexe puisqu'elle requiert de déterminer six paramètres au préalable. Les méthodes CN et Green Ampt ont donc été utilisées lors des différentes simulations de cette étude. Le choix d'une méthode d'infiltration n'influence pas les résultats de la modélisation du quartier de base, puisque le phénomène d'infiltration est minime du fait de sa très forte imperméabilité. Le choix de la méthode d'infiltration se fait généralement en comparant les données obtenues avec le modèle d'infiltration testé avec les données recueillies sur le terrain à l'exutoire du bassin versant. Cette méthode n'a pas pu être utilisée ici, à cause de l'impossibilité de procéder à des prélèvements sur le terrain.

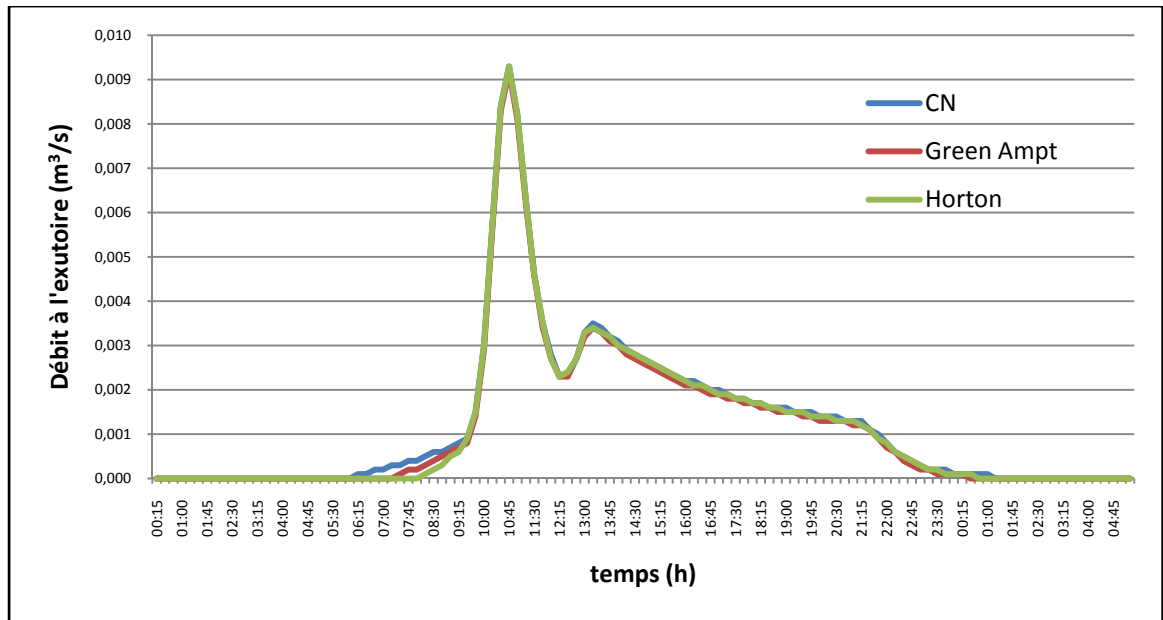


Figure 2.4 Comparaison des méthodes d'infiltration

2.2.3.1 Évaporation

L'évaporation a été fixée comme étant une constante d'une valeur de 1,39 mm/h, ce qui correspond à l'évaporation moyenne annuelle pour la région de Montréal (Glorieux, 2010). Il existe plusieurs formules pour calculer l'évapotranspiration des plantes, mais le coefficient d'évaporation sous SWMM est global à tout le bassin.

2.2.4 Aspect hydraulique

La modélisation du réseau hydraulique, représentée à la Figure 2.5, a été simplifiée. Le réseau majeur (ruissellement de surface le long du tracé) tient compte de l'écoulement des toits. Le réseau mineur (réseau hydraulique) est réduit à sa plus simple expression; il transporte d'abord l'eau en provenance des toits dans une conduite, puis récupère l'eau ruisselée de l'ensemble du réseau.

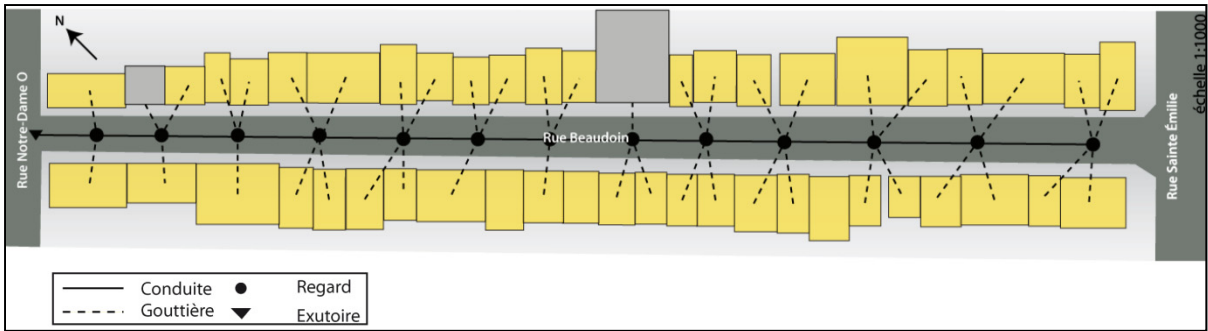


Figure 2.5 Représentation du quartier de référence

Le réseau hydraulique se compose de 13 regards qui collectent chacun le débit excédentaire d’un groupement de quatre toits, de 13 conduites d’une longueur variable pour convoyer le ruissellement sur 226 mètres jusqu’à l’émissaire situé à l’extrémité de la rue (rue Notre-Dame O). Les caractéristiques principales du réseau hydraulique sont détaillées au Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Caractéristiques du réseau hydraulique

Longueur de la conduite (m)	14 à 18 mètres
Géométrie de la conduite	Circulaire
Coefficient de rugosité n ($s/m^{1/3}$)	0,13
Hauteur d’eau maximale (m)	1 m

2.3 Procédure de modélisation des éléments LID

La modélisation d'un réseau de drainage est chose courante de nos jours. Modéliser les mesures LID est une procédure plus complexe. Certains aménagements comme les fossés et les pavés poreux sont aisés à représenter. D'autres présentent des caractéristiques plus délicates à simuler, c'est notamment le cas lorsque des végétaux sont utilisés. Le quartier d'étude, du fait de sa haute densité, ne peut accueillir qu'un nombre limité d'infrastructures LID (Damodaram *et al.*, 2010). Deux dispositifs principaux ont été répartis sur le quartier : les toitures vertes et les pavés poreux. La structure de toits verts utilisée actuellement au Québec est relativement légère et prévue pour résister à des températures extrêmes. Les toits les plus récents utilisent des espèces de sédum, qui réduisent considérablement l'épaisseur et le poids des toits verts. Les toits verts choisis et modélisés ont été de type extensif avec une épaisseur totale d'environ 10 centimètres. Des rangées d'arbres plantés ont également été implantées. La mise en place d'un fossé a également été envisagée; elle sera discutée plus loin.

2.3.1 Méthodes de modélisation considérées et testées (toits verts)

De nombreuses méthodes sont utilisées pour modéliser les toits verts. Quatre ont été choisies pour une évaluation comparative. L'ensemble (100 %) des toits du quartier d'étude a été modélisé avec des toits verts afin d'obtenir un signal de réponse significatif (réponse visible). En effet, une modélisation d'un scénario d'implantation de 25 % de toits verts, quoique plus réaliste, produisait des fluctuations peu visibles. Deux pluies ont été appliquées afin de comparer les réponses des toits verts avec ces quatre méthodes. L'une des méthodes est basée sur une étude (Hilten, Lawrence et Tollner, 2008) vérifiée par des résultats *in situ*. Elle constitue ici la méthode de référence.

La méthode de référence : HYDRUS-1D

Hilten, Lawrence et Tollner (2008) ont utilisé un logiciel de modélisation de transfert de flux HYDRUS-1D pour développer un modèle de toit vert extensif. Le modèle a été développé pour obtenir la réponse d'un toit vert d'une dizaine de centimètres d'épaisseur à différentes pluies à l'échelle de l'événement pluvieux. L'hydrogramme de sortie du toit vert a été publié pour cinq pluies (Hilten, Lawrence et Tollner, 2008). Ces hydrogrammes de sortie ont été affectés aux toits imperméables du présent quartier d'étude afin de reproduire la réponse du toit vert étudié par Hilten, Lawrence et Tollner (2008). Deux pluies ont été utilisées lors de tests avec SWMM : une pluie de 12 mm et une pluie de 24 mm (Hilten, Lawrence et Tollner, 2008). Ainsi, la pluie simulée (12 mm ou 24 mm) est appliquée sur le bassin versant à l'exception des toits. Une pluie fabriquée, l'hydrogramme de sortie des toits verts de l'étude HYDRUS -1D, est appliquée sur les toits qui sont totalement imperméables (asphalte). Cette méthode permet d'obtenir en sortie des toits, la réponse des toits verts à la pluie simulée. À l'exutoire, le ruissellement obtenu est donc une combinaison de la pluie appliquée sur le bassin et de la pluie fabriquée correspondante appliquée sur les toits. Les résultats ont montré que la pluie de 12 mm est captée en totalité par le toit qui agit alors comme un réservoir de stockage (le toit ne produit pas de ruissellement). Quant à la pluie de 24 mm, elle est captée partiellement puis le toit atteint son volume maximum et produit du ruissellement. Ces résultats ont été comparés à ceux produits par les autres méthodes.

La méthode Green Ampt

Plusieurs méthodes sont utilisées au sein des bureaux d'études pour modéliser les toits verts. La méthode traditionnelle consiste à modéliser le toit vert comme une surface perméable avec un taux d'infiltration prenant en compte la réponse spécifique du sol du toit vert. Le toit vert constitue une surface imperméable à 15 % (Manwaring, 2010). La méthode d'infiltration utilisée est celle de Green Ampt avec des paramètres d'infiltration correspondant à un sol de limon sableux (Roehr et Kong, 2010). Le Tableau 2.3 présente les paramètres du toit vert lié à l'utilisation de la méthode d'infiltration Green-Ampt.

Tableau 2.3 Caractéristiques d'un toit vert avec la méthode d'infiltration Green-Ampt

Aire (ha)	Surface du toit vert
<i>Width</i> (m)	Largeur du toit vert
Pente (%)	2
Imperméabilité (%)	15
Coefficient de rugosité n imperméable ($s/m^{1/3}$)	0,011
Coefficient de rugosité perméable ($s/m^{1/3}$)	0,24
Paramètre d'emmagasinement D imperméable (mm)	1,3
Paramètre d'emmagasinement D perméable (mm)	3,81
Pourcentage de surface imperméable sans emmagasinement (%)	100
Méthode d'infiltration	Green Ampt
Conductivité (mm/h)	10,9
Potentiel de succion (mm)	110
Teneur en eau initiale (fraction)	0,236

La méthode du Curve Number

L'utilisation du Curve Number pour le toit vert implique de modéliser à nouveau le quartier d'étude avec la méthode d'infiltration CN. Le CN est un paramètre empirique qui tient compte de l'utilisation de la surface, du type de sol, de la couverture végétale et des conditions d'humidité (Damodaram *et al.*, 2010). Un certain nombre d'études ont cherché à déterminer le CN des toits verts. Il a été évalué entre 84 et 90, le CN d'un toit traditionnel étant 98 (Getter, Rowe et Andresen, 2007). La valeur de CN d'un toit vert extensif d'une épaisseur de 7,62 centimètres avec une pente de 2 % a été définie comme étant 86 (Carter et Rasmussen, 2006). Chaque toit du présent quartier d'étude a ainsi été remplacé par un toit vert avec les caractéristiques du Tableau 2.4.

Tableau 2.4 Caractéristiques d'un toit vert avec
la méthode d'infiltration Curve Number

Aire (ha)	Surface du toit vert
<i>Width</i> (m)	Largeur du toit vert
Pente (%)	2
Imperméabilité (%)	0
Coefficient de rugosité n imperméable ($s/m^{1/3}$)	0,011
Coefficient de rugosité perméable ($s/m^{1/3}$)	0,24
Paramètre d'emmagasinement D imperméable (mm)	1,3
Paramètre d'emmagasinement D perméable (mm)	3,81
Pourcentage de surface imperméable sans emmagasinement (%)	100
Méthode d'infiltration	Curve Number
Curve Number	86
Temps de séchage (jour)	4

LID Control

SWMM 5 permet de modéliser plusieurs composantes LID. Un module d'édition d'infrastructures LID permet de créer cinq types de LID : les aires de biorétention, les pavés poreux, les tranchées d'infiltration, les fossés et les barils de récupération d'eau de pluie. L'infrastructure LID est représentée comme une combinaison de couches verticales dont les propriétés sont définies par unité de surface. Pendant la simulation, SWMM réalise un bilan d'eau entre chaque couche pour déterminer la quantité d'eau en mouvance et la quantité d'eau stockée. Il y a plusieurs combinaisons possibles suivant le type d'infrastructure. Le toit vert est considéré comme une aire de biorétention avec des caractéristiques spécifiques puisqu'il est délimité par le toit et que l'eau ne s'infiltrera pas dans le sous-sol. Il sera défini par une couche surface qui décrit le processus d'infiltration dans le sol, une couche de sol qui définit les propriétés physiques créant la percolation, une couche de stockage qui décrit les

propriétés de la couche de gravier et enfin un module drain permet de configurer le drainage s'il a lieu (Figure 2.6).

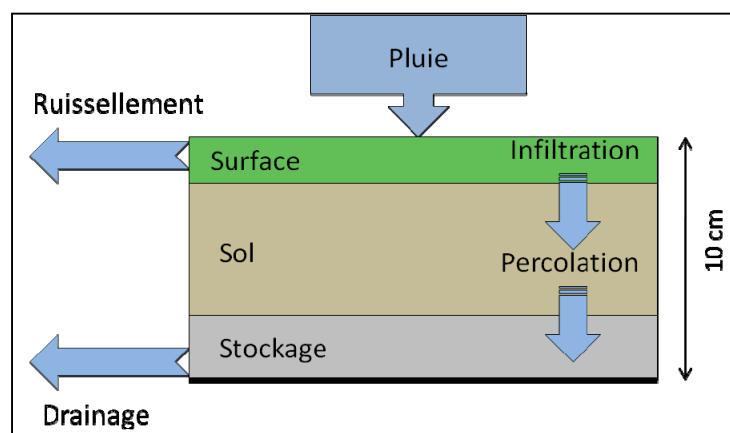


Figure 2.6 Illustration du fonctionnement du module LID control
Adapté de (Rossman, 2009)

Un premier test a été réalisé à l'aide de ce module, et ce, à partir de caractéristiques utilisées dans l'étude HYDRUS-1D (Hilten, Lawrence et Tollner, 2008). Le toit est d'une épaisseur de 10 centimètres. Sa composition se répartit entre 80 % de billes d'ardoise et d'argile expansée et 20 % de matière organique. Un drain est installé à 1,0 centimètre du fond comme c'était le cas dans l'étude de Hilten (2008). Les caractéristiques de sol du module du toit vert sont issus des paramètres utilisés par Roehr et Kong (2010), correspondant à un sol de limon sableux (Roehr et Kong, 2010). Ce module LID a été appliqué sur la surface totale de chaque toit du quartier d'étude. Trois autres tests ont été menés avec des compositions de sol différentes (Tableau 2.5).

Tableau 2.5 Caractéristiques des quatre toits verts testés avec le module LID control

Composition des toits verts	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4
Surface				
Hauteur d'eau stockée (mm)	5	5	5	5
Couverture végétale (fraction)	1	1	1	1
Coefficient de rugosité n ($s/m^{1/3}$)	0,24	0,24	0,24	0,24
Pente (%)	2	2	2	2
Sol	limon sableux	limon	limon fin	limon argilo sableux
Épaisseur (mm)	85	85	85	85
Porosité (fraction)	0,453	0,463	0,501	0,398
Capacité au champ (fraction)	0,19	0,232	0,284	0,244
Point de flétrissement (fraction)	0,085	0,116	0,135	0,136
Conductivité (mm/h)	10,9	3,3	6,6	1,5
Pente de la courbe log conductivité	9	8	7	10
Potentiel de succion (mm)	110	89	170	220
Stockage				
Hauteur (mm)	15	15	15	15
Ratio de vide	0,5	0,5	0,5	0,5
Conductivité (mm/h)	-	-	-	-
Facteur d'encrassement	-	-	-	-
Drainage				
Coefficient de drainage (mm/h)	2	2	2	2
Exposant de drainage	0,5	0,5	0,5	0,5
Hauteur du drain (mm)	10	10	10	10

2.3.2 Méthodes de modélisation considérées et testées (arbres)

La pluie de 24 mm est appliquée sur le bassin versant principal auquel des rangées d'arbres ont été implantées. Deux méthodes de modélisation des arbres ont été comparées : la méthode CN et la méthode LID control. Elles se basent sur la modification des caractéristiques globales du bassin versant. Les arbres sont modélisés comme des rectangles de 30 m² répartis sur l'ensemble du bassin versant. Cette valeur est une moyenne réalisée sur la base de mesure de photos satellites Google Maps d'arbres à Montréal. Deux configurations ont été testées : l'implantation de 16 arbres et de 32 arbres soit 13 % et 26 % de la superficie du bassin versant couverts par des arbres.

Méthode traditionnelle (Curve Number)

Au même titre que les toits verts, il est possible de modéliser des rangées d'arbres en modifiant les coefficients d'imperméabilité, de stockage de surface et de rugosité. La méthode d'infiltration est aussi adaptée afin de rendre compte des caractéristiques d'interception, de percolation et d'infiltration d'un arbre (Tableau 2.6).

Tableau 2.6 Caractéristiques du bassin versant en fonction de l'implantation d'arbres plantés avec la méthode traditionnelle

Scénarios	Bassin versant initial	Bassin versant 16 arbres	Bassin versant 32 arbres
Coefficient d'imperméabilité (%)	95,0	82,4	69,6
Coefficient de rugosité perméable (s/m ^{1/3})	0,24	0,40	0,40
Paramètre d'emmagasinement D perméable (mm)	2,54	7,62	7,62
Curve Number	98	83	83

LID Control

Cette méthode reprend le principe développé pour la modélisation des toits verts avec le module LID de SWMM 5. Le module LID est utilisé pour créer des aires de biorétention comparable à des arbres plantés. La modélisation de l'infiltration dans le sous-sol est définie, ce qui évite de créer un drain. À l'inverse du toit vert, où le module LID remplaçait la surface totale du toit imperméable, le module arbre a été ajouté au bassin versant principal. Les paramètres du bassin versant, coefficient d'imperméabilité et largeur, ont été ajustés pour prendre en compte l'ajout de ces éléments LID (Tableau 2.7).

Tableau 2.7 Caractéristiques du bassin versant en fonction de l'implantation d'arbres plantés avec la méthode LID Control

Scénarios	Bassin versant initial	Bassin versant 16 arbres	Bassin versant 32 arbres
Coefficient d'imperméabilité (%)	95,0	94,3	93,3
<i>Width</i> (m)	14	12	8

Le Tableau 2.8 présente les caractéristiques de l'arbre modélisé par le module LID control. Les paramètres sont issus du manuel SWMM 5 (Rossman, 2009).

Tableau 2.8 Caractéristiques d'un arbre
avec le module LID control
Adapté de (Rossman, 2009)

Surface	
Hauteur d'eau stockée (mm)	1520
Couverture végétale (fraction)	1
Coefficient de rugosité n ($s/m^{1/3}$)	0,4
Pente (%)	0
Sol	
Épaisseur (mm)	610
Porosité (fraction)	0,5
Capacité au champ (fraction)	0,1
Point de flétrissement (fraction)	0,05
Conductivité (mm/h)	30,2
Pente de la courbe log conductivité	6
Potentiel de succion (mm)	61
Stockage	
Hauteur (mm)	305
Ratio de vide	0,5
Conductivité (mm/h)	508
Facteur d'encrassement	-
Drainage	
Coefficient de drainage (mm/h)	0
Exposant de drainage	0
Hauteur du drain (mm)	0

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

3.1 Modélisation des infrastructures LID

De nombreuses méthodes sont utilisées pour modéliser les infrastructures vertes. La première partie du présent chapitre présente les résultats comparatifs entre quatre méthodes de modélisation de toits verts et deux méthodes de modélisation d'arbre.

3.1.1 Résultats comparatifs (toits verts)

Deux pluies ont été appliquées afin de comparer les réponses des toits verts avec quatre méthodes de modélisation. L'une des méthodes est basée sur une étude (Hilten, Lawrence et Tollner, 2008) vérifiée par des résultats *in situ*. Elle constitue ici la méthode de référence. Deux autres méthodes utilisent des modèles d'infiltration connus, Green-Ampt et Curve Number. Elles jouent sur les coefficients d'imperméabilité et d'infiltration pour reproduire le fonctionnement des toits verts. Enfin, la dernière méthode testée utilise un module de création d'infrastructure LID, LID Control, de SWMM. Il permet de réaliser un bilan de transfert d'eau entre les différentes couches composant un toit vert. Le sol utilisé s'apparente à du limon sableux. La Figure 3.1 présente les courbes de débit d'eau ruisselée par chaque méthode.

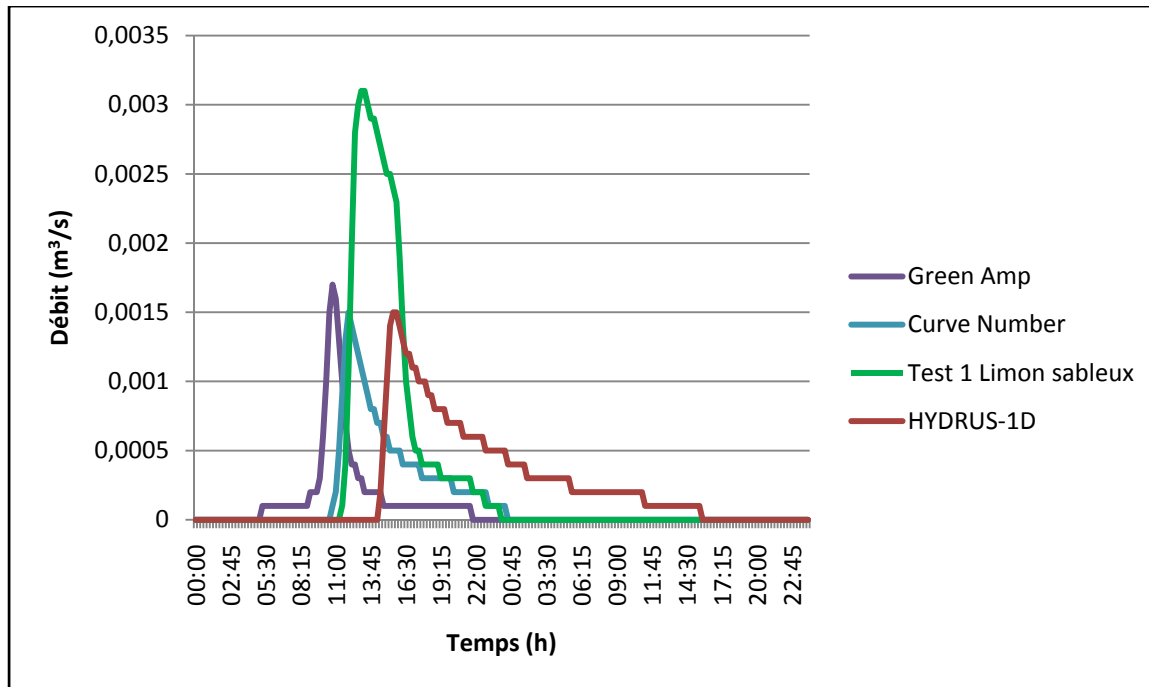


Figure 3.1 Comparaison des débits d'eau ruisselée des toits verts du quartier entre les quatre méthodes de modélisation (pluie de 24 mm)

La méthode Green-Ampt

Pour la pluie de 12 mm, les toits verts simulés selon la méthode Green Ampt produisent 800 cm³ d'eau, ce qui est négligeable. Le modèle a des difficultés à simuler la retenue complète de l'eau par les toits verts. Quant à la pluie de 24 mm, elle montre un débit maximal semblable de l'ordre de $1,7 \times 10^{-3}$ m³/s et de $1,5 \times 10^{-3}$ m³/s (Figure 3.1). Ce résultat est égal à celui obtenu avec la méthode Horton. Néanmoins, le retard du pic obtenu avec HYDRUS-1D, correspondant à la rétention de l'eau par le toit vert, n'est pas bien simulé par la méthode Green-Ampt puisque le ruissellement intervient 5h15 après le début de la pluie alors qu'il intervient 9h plus tard avec HYDRUS-1D (Figure 3.1). Une autre divergence est le volume total rejeté par l'ensemble des toits verts du quartier. Celui correspondant à HYDRUS-1D est de 47 m³ alors qu'il est de seulement 16 m³ pour la méthode Green Ampt.

D'autres tests ont été réalisés pour tenter de rapprocher le fonctionnement du modèle Green-Ampt à celui du modèle HYDRUS-1D. Le constat est que l'augmentation du taux d'imperméabilité accroît le volume ruisselé (ce que l'on souhaite), mais augmente aussi le

débit maximal et réduit le temps de réponse du réseau. L'eau ruissellera avec plus d'intensité et plus rapidement. On s'aperçoit donc que pour un même débit maximal, le volume rejeté est moindre pour la modélisation utilisant Green Ampt. Le volume est en fait infiltré dans le sous-sol ce qui dans le cas des toits verts n'est pas réaliste. L'utilisation de Green-Ampt implique de modéliser en addition un réseau d'eau souterraine pour diriger l'eau infiltrée vers le réseau de drainage.

La méthode du Curve Number

Concernant la simulation avec la pluie de 12 mm, la modélisation CN répond correctement puisqu'elle n'engendre pas de ruissellement. Avec la pluie de 24 mm, le débit maximum atteint $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ pour les deux simulations (Figure 3.1). Il semble que ce soit le paramètre aisé à reproduire puisque c'était déjà le cas dans le test précédent. En ce qui a trait au temps de rétention, le ruissellement intervient 3h45 plus tard pour la modélisation HYDRUS-1D. Le volume ruisselé simulé avec le Curve Number (24 m^3) est très inférieur à celui obtenu avec HYDRUS-1D (47 m^3).

Le paramètre CN ne permet pas de calibration. Ainsi, il est impossible de régler le temps de rétention, ou bien encore le volume ruisselé. Il est aussi impossible d'effectuer des changements concernant la géométrie du toit vert. Ce paramètre produit de meilleurs résultats que Green-Ampt, mais manque de souplesse et de précision pour être utilisé par la suite dans la présente étude.

LID control

La pluie de 12 mm ne produit pas de ruissellement, ce qui est conforme aux attentes et au modèle de référence HYDRUS-1D. Avec la pluie test de 24 mm, le ruissellement est largement supérieur aux valeurs attendues. Le débit maximal d'eau ruisselée obtenu par la méthode LID control est de $3,1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, la référence étant à $1,5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 3.1).

Trois autres tests ont été effectués avec des paramètres de sol différents correspondant à du limon, du limon fin et du limon argilo-sableux. Aucun toit vert ne parvient à modéliser

parfaitement les caractéristiques du ruissellement défini par la méthode HYDRUS-1D (Figure 3.2). Le temps de rétention est par contre maîtrisé pour les trois tests. La hauteur du drain influence principalement le temps de rétention. L'eau déversée sur le toit percole à travers les différentes couches, puis remplit le volume de la surface de stockage. La hauteur du drain définit le temps de remplissage de ce volume sans écoulement.

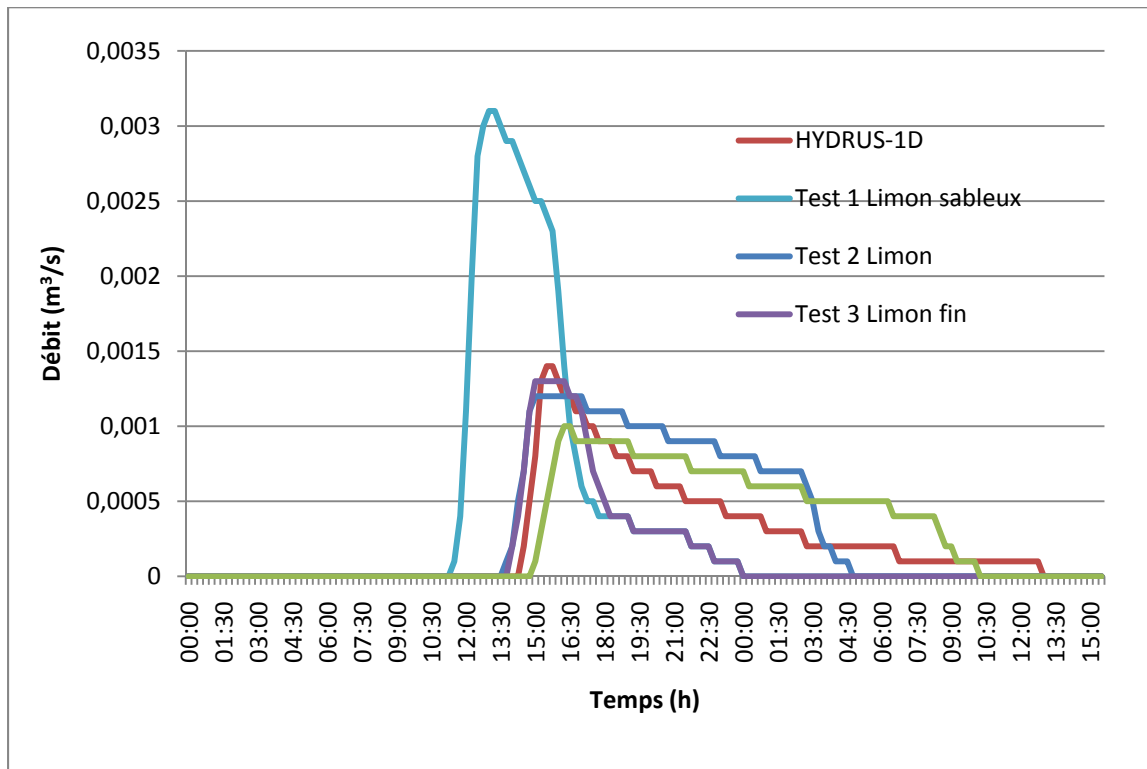


Figure 3.2 Comparaison des débits d'eau ruisselée des toits verts du quartier entre la méthode LID control modifiée et la méthode de référence (pluie de 24 mm)

Le limon fin modélise un débit maximal à peu près égal à celui obtenu avec la méthode HYDRUS-1D. La modification de l'épaisseur permet de réduire les débits atteints, mais ne reproduit pas la répartition spatiale de la courbe, le volume ruisselé étant différent. Néanmoins, les toits verts issus du test 2 et du test 3 présentent des profils similaires à ceux désirés, d'autant plus que de nombreuses caractéristiques issues de l'étude HYDRUS-1D sont manquantes. Le test 4 est par contre trop éloigné du profil voulu. Ces toits ont aussi été testés avec la pluie de 12 mm. Aucun ruissellement n'en résulte. La possibilité de mélanger

ces sols a été testée, mais n'a pas présenté d'amélioration par rapport aux résultats du test 2 et du test 3.

L'effet retard d'une toiture verte est fonction de ses dimensions, sa composition et de sa pente, mais aussi de son historique : une toiture déjà saturée aura un effet retard plus faible que cette même toiture après une période de sécheresse. Il n'est donc pas évident de caractériser l'effet retard par un simple indice. La rétention des toitures vertes ne peut donc être caractérisée par une valeur unique s'appliquant à tous les types de toitures vertes (De Cuyper, Dinne et Van De Vel, 2006). Cette situation rend difficile la modélisation des toitures vertes à partir des logiciels de modélisations hydrologiques généralistes. La méthodologie de modélisation des toits verts du quartier d'étude utilisera la méthode LID SWMM avec les caractéristiques des tests 2 et 3. Ainsi, deux toits verts seront testés ayant des caractéristiques hydrologiques différentes.

3.1.2 Résultats comparatifs (arbres)

Deux méthodes de modélisation d'arbres sont testés avec la pluie de 24 mm. La première méthode utilise les fonctions classiques de SWMM. Elle prévoit de paramétrer l'implantation d'arbres sur l'ensemble du quartier grâce à la modification globale de l'imperméabilité et de la capacité d'infiltration du bassin versant. Cette méthode est comparée à module LID Control de SWMM, qui doit permettre de modéliser l'arbre à partir de la simulation d'une aire de biorétention correctement paramétrée.

Avec l'implantation de 16 arbres et une pluie de 24 mm, le bassin versant produit 73 m³ de volume d'eau ruisselé pour le LID control et 71 m³ pour la méthode traditionnelle. Le débit maximal d'eau ruisselé est de $8,4 \times 10^{-3}$ m³/s pour les deux méthodes. L'implantation de 32 arbres pour une pluie de 24 mm produit un volume ruisselé de 61 m³ pour la méthode LID control et 59 m³ pour la méthode traditionnelle. Les débits maximaux sont de $6,8 \times 10^{-3}$ m³/s pour le LID control et de $7,2 \times 10^{-3}$ m³/s pour la méthode traditionnelle. Les deux méthodes

produisent des résultats sensiblement équivalents, tant en termes de débit maximal que de volume total ruisselé (Figure 3.3).

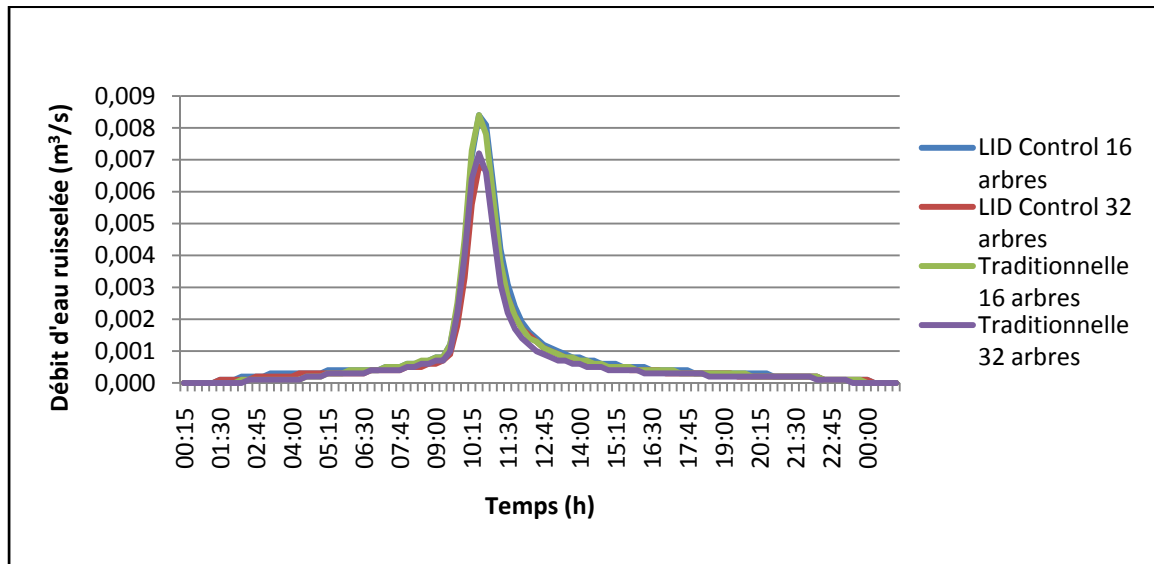


Figure 3.3 Comparaison des débits à l'exutoire pour deux méthodes de modélisation des arbres plantés (pluie de 24 mm)

La méthode traditionnelle est peu malléable puisqu'il n'y a pas la possibilité de modéliser les différentes variations possibles du couvert végétal, ni de paramétrer le sol. Aussi, le coefficient d'infiltration est modifié pour l'ensemble du bassin versant, ce qui influence l'infiltration globale du quartier et non pas seulement celui des arbres. Cette méthode est jugée trop imprécise. En examinant le comportement du module LID couche par couche, il apparaît qu'il réagit comme une surface perméable classique (Figure 3.4). L'eau s'infiltré dans le sol, puis s'infiltre dans le sous-sol. La végétation n'impacte ni la quantité d'eau s'infiltrant dans le sol, ni la vitesse d'infiltration. La modification des paramètres de cette couche végétation n'a pas eu d'effet sur la sortie.

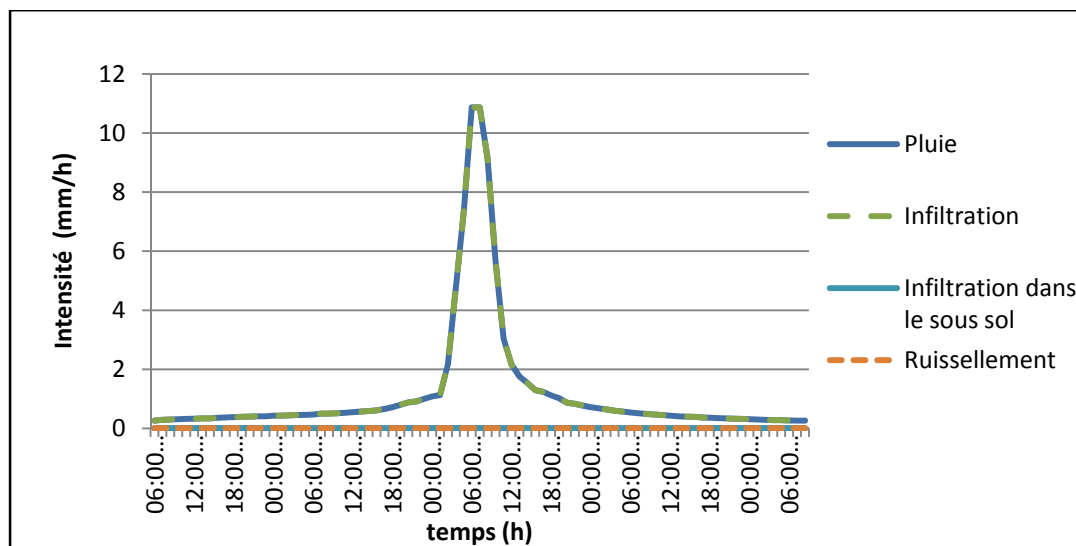


Figure 3.4 Réponse d'un arbre avec la méthode LID Control (pluie de 24 mm)

Il semblerait que ce module ne soit pas désigné pour modéliser correctement la couverture végétale des arbres. Une autre contrainte est que l'arbre étudié était défini comme un rectangle de 30 m² ce qui représente sa couverture végétale, son emprise au sol étant inférieure à cette valeur. Le LID control crée quant à lui un module de 30 m² comprenant une couche végétale de 30 m², une couche sol de 30 m² et une couche de stockage de 30 m² également. L'arbre créé par le LID control est disproportionné. Cette méthode engendre une surestimation des impacts positifs de l'arbre. Le module n'est pas donc pas utilisable pour modéliser des arbres avec de larges couvertures végétales. Pour éviter ce problème de surestimation, il a été décidé d'implanter sur le quartier d'étude des arbres de petite taille avec une couverture végétale restreinte. L'objectif était de faire correspondre la surface du couvert et la surface de l'emprise au sol d'un arbre. La surface de l'arbre est ainsi limitée à 2,4 m², ce qui garantit une cohérence entre la taille du couvert et la surface de la couche de sol lors de l'utilisation du LID control (Figure 3.5).

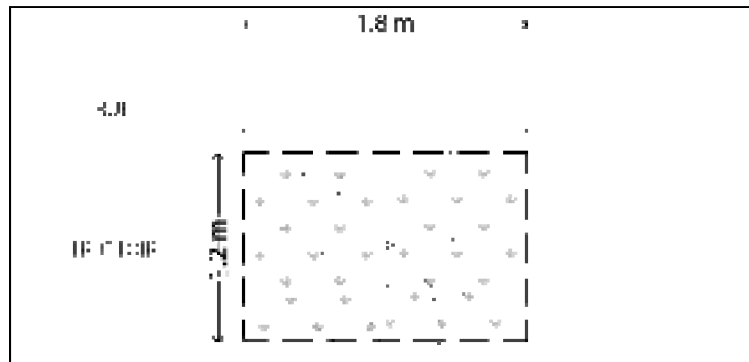


Figure 3.5 Dimensionnement de l'arbre sur le trottoir
Adaptée de (Bureau of Environmental Services 2008)

3.1.3 Pavés poreux

L'étude s'est limitée à la modélisation de pavage poreux. La méthode CN n'a pas été utilisée, car il n'existe pas de coefficient unique pour cette infrastructure (Damodaram *et al.*, 2010). Traditionnellement, la méthode Green-Ampt était utilisée. Le pavé poreux était considéré comme une surface poreuse avec un apport en ruissellement latéral en provenance des surfaces alentour (Huber, Cannon et Stouder, 2006). Le module LID Control de SWMM paraît plus adapté à ce cas. La végétation n'est pas un problème puisqu'il s'agit de modéliser une surface minérale. Le module pavé comprend une couche supplémentaire par rapport au module dédié aux aires de biorétention, soit la couche pavée qui permet de définir en détails les types de pavés utilisés grâce à ces caractéristiques hydrauliques. Le module pavé est réparti sur le bassin versant principal et ses caractéristiques sont ajustées au besoin. Aucun drain n'a été intégré au pavé. Les caractéristiques détaillées du pavé poreux utilisé sont décrites au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Caractéristiques de pavé poreux avec le module LID Control

Surface	
Hauteur d'eau stockée (mm)	1,3
Couverture végétale (fraction)	0
Coefficient de rugosité n ($s/m^{1/3}$)	0,024
Pente (%)	1
Pavé	
Épaisseur (mm)	100
Ratio de vide	0,12
Surface imperméable (fraction)	0
Conductivité (mm/h)	7315
Facteur d'encrassement	0
Stockage	
Hauteur (mm)	305
Ratio de vide	0,5
Conductivité (mm/h)	508
Facteur d'encrassement	-
Drainage	
Coefficient de drainage (mm/h)	0
Exposant de drainage	0
Hauteur du drain (mm)	0

3.1.4 Fossés

Le fossé est une structure simple en comparaison des autres infrastructures LID. À nouveau, le LID Control a été utilisé. Il est alors nécessaire de définir la géométrie du fossé avec sa profondeur, sa pente longitudinale, sa pente transversale et son coefficient de rugosité n (Tableau 3.2). Le fossé est simulé avec une couverture herbeuse.

Tableau 3.2 Caractéristiques de fossés avec le module LID Control

Surface	
Hauteur d'eau stockée (mm)	610
Couverture végétale (fraction)	1
Coefficient de rugosité n ($s/m^{1/3}$)	0,2
Pente longitudinale (%)	3
Pente transversale (%)	5

3.2 Scénarios

Cinq scénarios de base ont été testés, ainsi que le quartier de référence. Ils utilisent les éléments LID suivants : toits verts, arbres, pavés poreux et fossés. Les scénarios respectent les caractéristiques contraignantes du quartier et préservent les fonctions actuelles des espaces.

3.2.1 Toits verts

Le toit vert implanté est de type extensif d'une épaisseur de 10 cm d'épaisseur et est constitué d'une couverture végétale composée de différents sébums. Les gouttières restent connectées au réseau pour évacuer le trop-plein. La couche de sol est d'abord modélisée avec les caractéristiques hydrauliques du limon.

3.2.2 Arbres

Le module arbre est un rectangle de $2,4 \text{ m}^2$. La couverture végétale de l'arbre est égale à la surface du sol. Bien que cela puisse paraître petit, la dimension de ce module arbre a suivi les règles et plans de la ville de Portland en matière de verdissement de son espace public (Bureau of Environmental Services, 2008). L'implantation de ces modules prévoit un arbre

tous les 10 mètres linéaires de la rue. Ainsi, 16 modules peuvent être implantés sur la rue par trottoir. L'arbre est modélisé avec ses feuilles, sa couverture végétale est maximale.

3.2.3 Pavés poreux

Il s'agit de béton poreux. Il est implanté au niveau des zones de stationnement, soit sur la surface totale d'une parcelle, soit sur les bas-côtés de la route sous la forme de bandes de 250 mètres de long et d'une largeur de 2,5 mètres. Ces bandes traitent l'eau de ruissellement de la rue et la convoient jusqu'à l'exutoire si nécessaire.

3.2.4 Fossés

Les fossés sont dessinés comme des bandes d'une longueur de 250 mètres pour une largeur de 1,2 mètre en bordure de trottoir. Les arbres seront implantés au sein de ce dispositif. La Figure 3.6 illustre l'implantation d'un arbre au sein du fossé.

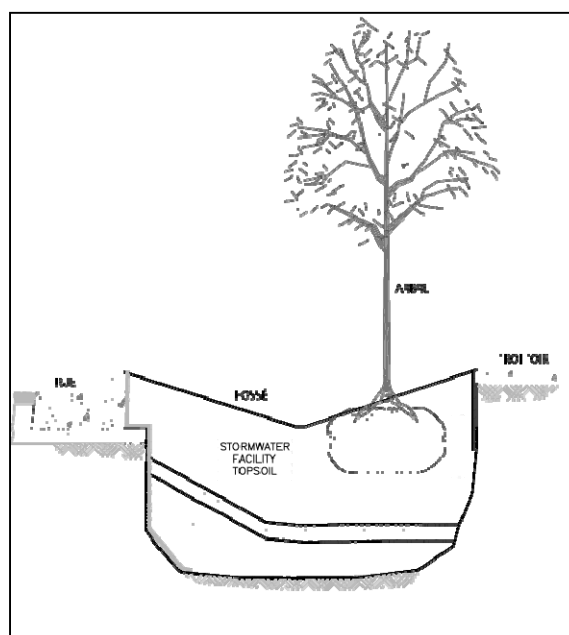


Figure 3.6 Schéma d'implantation d'un arbre au sein du fossé de drainage
Adaptée de (Bureau of Environmental Services, 2008)

3.2.5 Descriptif des scénarios

Essentiellement, le scénario 1 teste la réponse des toits verts et le scénario 4 celle des autres infrastructures. Les scénarios 2, 3 existent pour visualiser les effets de modifications sur le quartier d'étude. Enfin, le scénario 5 se veut le plus réaliste. Le taux d'implantation des infrastructures se veut plus modeste, notamment en ce qui concerne les toits verts. Les scénarios sont décrits en détails au Tableau 3.3. La Figure 3.7 montre les types d'installation de chaque structure. La chaussée est représentée en gris clair. Les stationnements longeant la chaussée peuvent être transformés en surface poreuse par l'implantation de pavé poreux. Les scénarios prévoient l'implantation d'une ou de deux bandes de stationnements poreuses. De même, les arbres sont implantés par rangées sur l'un ou les deux trottoirs. Les fossés forment des bandes longeant les trottoirs tout le long de la rue. Enfin, deux parcelles de stationnement sont traitées avec du pavage poreux.

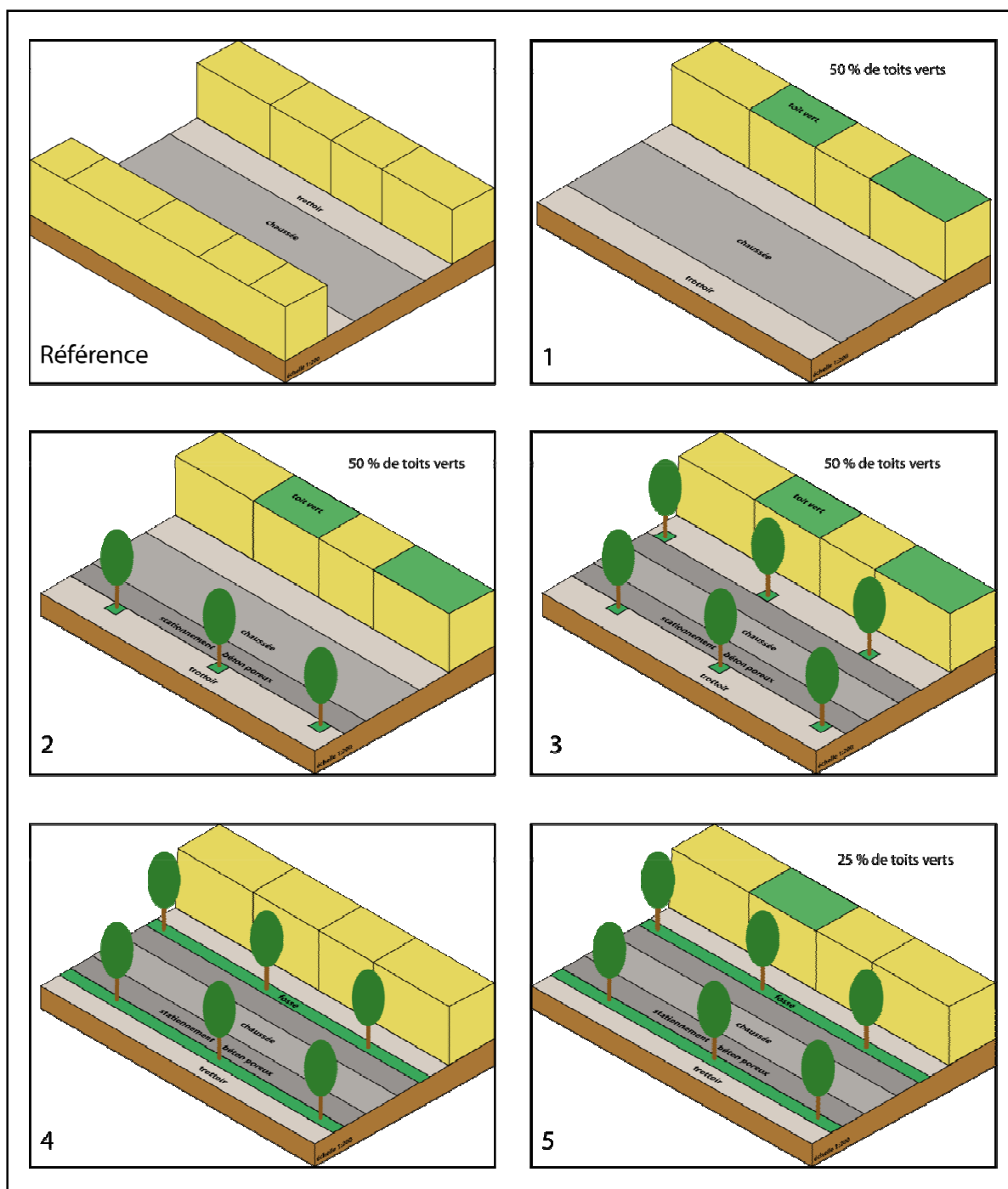


Figure 3.7 Processus d'implantation des infrastructures LID par scénario

Tableau 3.3 Descriptif des scénarios

Infrastructures LID	Référence	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Toit vert	--	50 % des toitures	50 % des toitures	50 % des toitures	--	25 % des toitures
Surface (m²)		2270	2270	2270	0	1134
Pavé poreux	--	2 parcelles	2 parcelles 1 bande	2 parcelles 2 bandes	2 parcelles 2 bandes	2 parcelles 2 bandes
Surface (m²)		353	903	1453	1453	1453
Arbres	--	--	1 rangée	2 rangées	2 rangées	2 rangées
Surface (m²)			39	77	77	77
Fossé	--	--	--	--	2 bandes totales	2 bandes totales
Surface (m²)					600	600
Surface LID totale (m²) (%)	0	2623 (32%)	3212 (40%)	3800 (47%)	2130 (26%)	3264 (40%)

Les coefficients d'imperméabilité et la largeur du bassin versant ont été modifiés selon le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 Caractéristiques du bassin versant pour les cinq scénarios

Caractéristiques	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4	Scénario 5
Coefficient d'imperméabilité (%)	95,0	94,0	92,4	89,6	89,6
<i>Width</i> (m)	14,4	10,0	6,0	6,0	6,0

3.3 Analyse par pluies

3.3.1 Pluie de 12 mm

Cette pluie de faible intensité teste les capacités du quartier dans un état de fonctionnement normal. Les mécanismes de chaque dispositif LID devraient ainsi être visibles. La Figure 3.8 présente l'évolution du débit à l'exutoire en fonction du temps. Le débit maximal est atteint à 10h45 quel que soit le scénario. Les infrastructures LID diminuent le volume d'eau ruisselée, mais ne créent pas de retard dans l'apparition du pic de débit. Ainsi, l'analyse des résultats revient à analyser la réduction de volume et de débit maximal par scénario (Figure 3.9 et Figure 3.10).

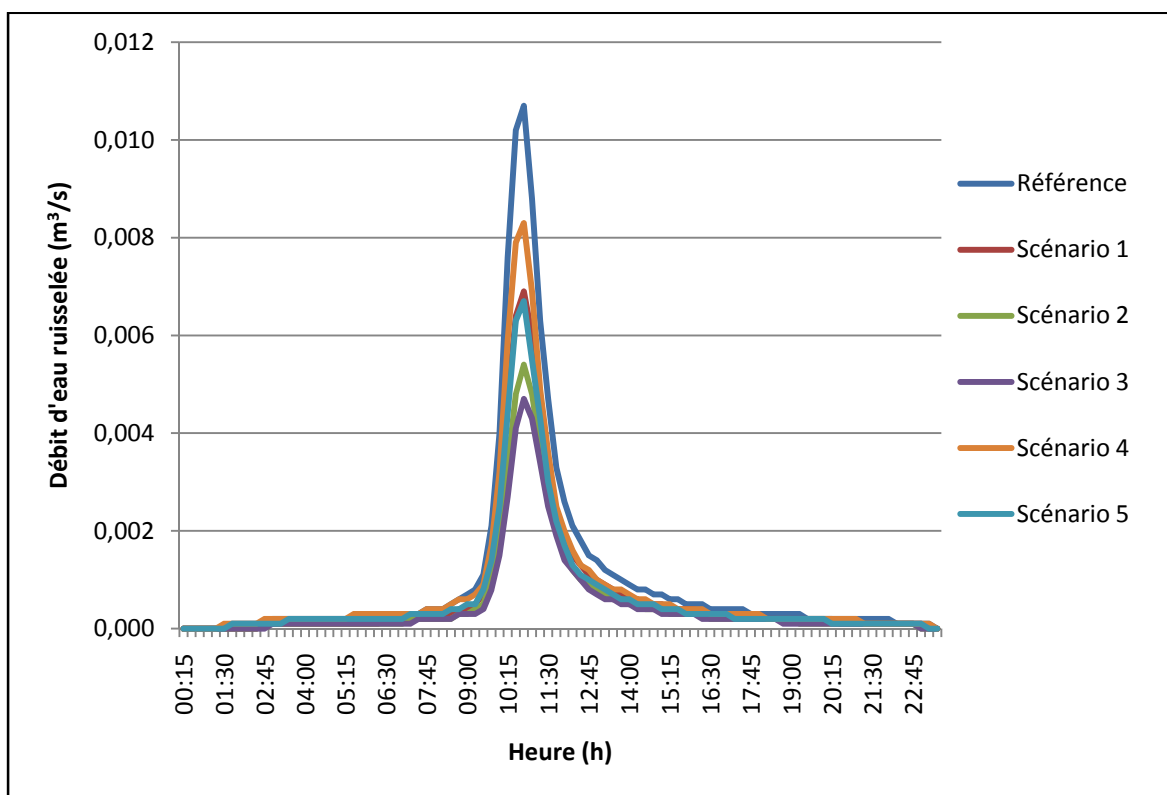


Figure 3.8 Évolution du débit à l'exutoire (pluie de 12 mm)

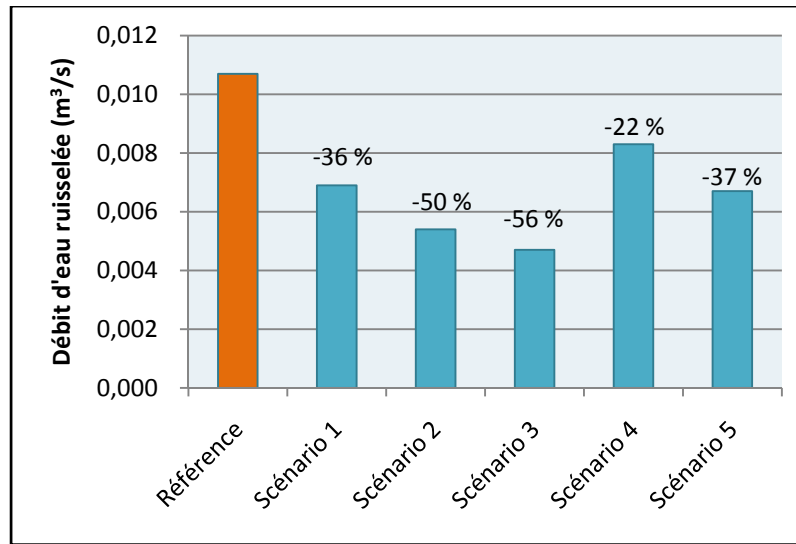


Figure 3.9 Réduction du débit maximal à l'exutoire
(pluie de 12 mm)

Le scénario 1, qui prévoit l'implantation de toits verts sur 50 % des toits du quartier, réduit le débit maximal de 36 % (Figure 3.9) et le volume d'eau écoulée (ruisselée) de 34 % (Figure 3.10). Le scénario 2 implante au quartier une rangée d'arbres et une bande de stationnements poreuse. Cet ajout permet une réduction supplémentaire de 14 %, tant en termes de débit maximal que de volume d'eau ruisselée.

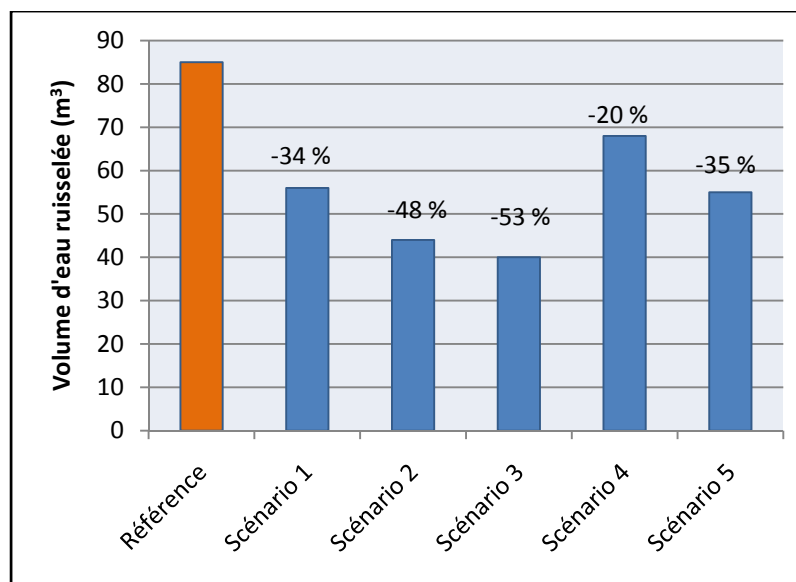


Figure 3.10 Réduction du volume d'eau ruisselée
(pluie de 12 mm)

Le scénario 3, doublant la quantité d'arbres et les pavés poreux, présente une diminution du débit maximum de 56 % (Figure 3.9) et une diminution du volume d'eau ruisselée de 53 % (Figure 3.10). Le scénario 4 illustre le poids des infrastructures LID hors toits verts; la réduction est de l'ordre de 20 % en tenant compte uniquement des arbres, des pavés poreux et des fossés. Les fossés apportent un gain de 2 % en termes de réduction de débit maximal et de 1 % en termes de volume d'eau ruisselée. Le scénario 5 allie les toits verts et les infrastructures du scénario 4; il présente un gain de 37 % en termes de réduction du débit maximal et de 35 % en terme volume d'eau ruisselée.

3.3.2 Pluie de 24 mm

De même que pour la pluie de 12 mm, les infrastructures LID provoquent une diminution du volume d'eau ruisselée et une réduction du débit maximal. Contrairement à la pluie de 12 mm, des retards interviennent en début de pluie, mais ne sont pas assez significatifs pour retarder la venue du pic de débit. De même, en fin de pluie, la trainée est plus ou moins longue suivant les scénarios (Figure 3.11).

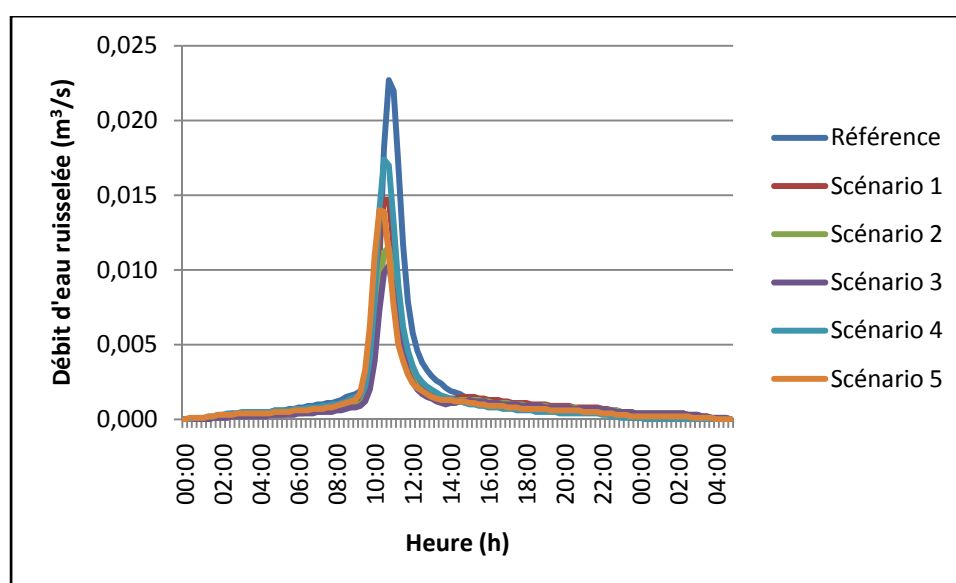


Figure 3.11 Évolution du débit à l'exutoire (pluie de 24 mm)

Le scénario 1, qui prévoit l'implantation de toits verts sur 50 % des toits du quartier, réduit le débit maximal de 35 % (Figure 3.12) et le volume d'eau écoulée (ruisselée) de 21 % (Figure 3.13). Une réduction de 49 % du débit maximal et de 35 % du volume d'eau ruisselée sont constatées pour le scénario 2 composé d'une bande de pavés poreux et d'une rangée d'arbres plantés. Le scénario 3, qui double la surface de pavés et d'arbres, présente une diminution du débit maximal de 55 % et du volume d'eau ruisselée de 41 %.

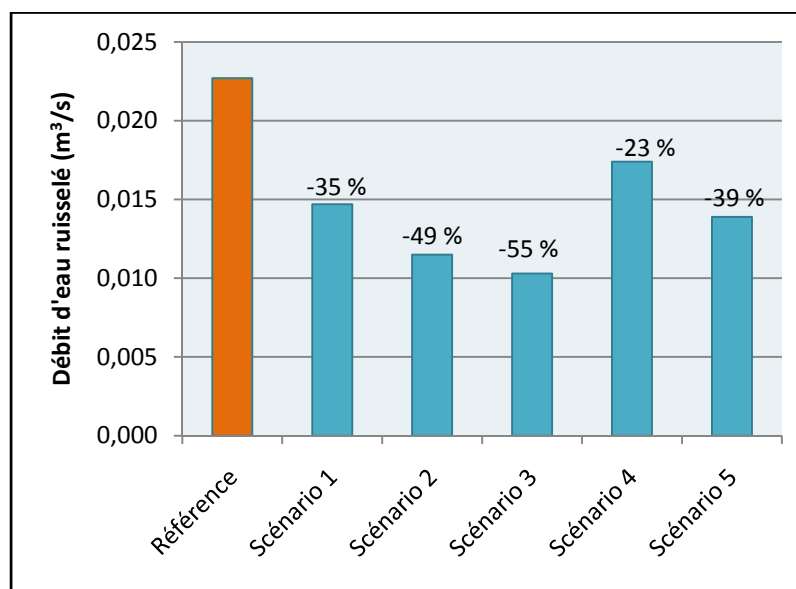


Figure 3.12 Réduction du débit maximal à l'exutoire (pluie de 24 mm)

Le scénario 4 assure une réduction de l'ordre des 20 % aussi bien en termes de réduction du débit maximal, qu'en termes de volume d'eau ruisselée. Enfin, le scénario 5, alliant le scénario 4 et des toits verts, présente une diminution du débit maximal de 39 % et du volume d'eau ruisselée de 30 %. Contrairement à la pluie de 12 mm, les résultats obtenus diffèrent pour le volume de ruissellement et le débit maximal.

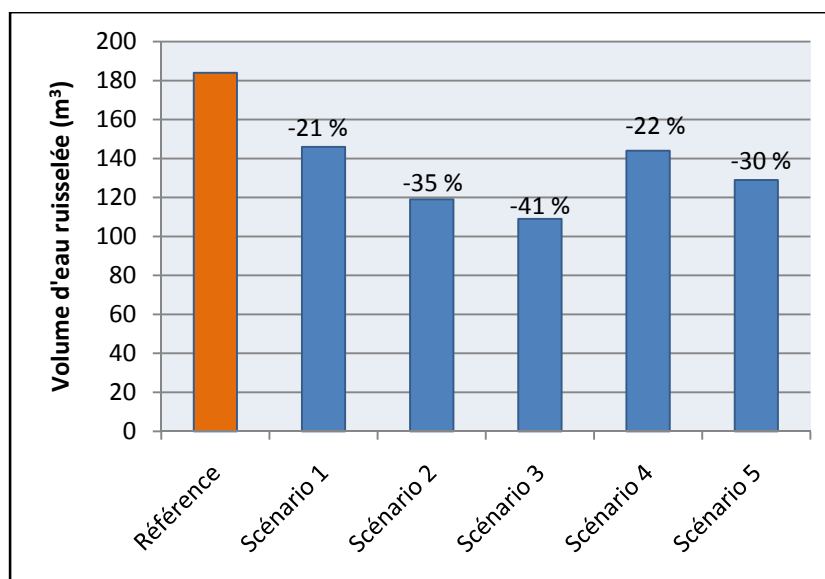


Figure 3.13 Réduction du volume d'eau ruisselée
(pluie de 24 mm)

Cette différence est de l'ordre de 14 % pour les scénarios 1, 2, 3, de 9 % pour le scénario 5 et de seulement 1 % pour le scénario 4 en faveur du débit maximal. La comparaison des résultats de la pluie de 24 mm par rapport à ceux de la pluie de 12 mm montre que la réduction du débit maximal est du même ordre de grandeur avec un écart maximal de 3 % pour le scénario 5. Les scénarios 1, 2 et 3 présentent des réductions de volume d'eau ruisselée pour la pluie de 24 mm de seulement 60 à 70 % de celle fournie pour la pluie de 12 mm. Les scénarios 4 et 5 offrent plus de garanties, puisque le scénario 4 obtient un meilleur score pour la pluie de 24 mm. Le scénario 5 offre une réduction à hauteur de 86 % de celle offerte pour la pluie de 12 mm. Les toits verts présents en grande quantité semblent avoir des difficultés à capter le volume d'eau écoulée sur le quartier.

3.3.3 Pluie Verdun 1 (32mm)

La pluie Verdun 1 est une pluie forte de longue durée de 32 mm. On s'attend donc à des différences marquées en termes de volume ruisselé, notamment en ce qui concerne la longueur de la trainée. La trainée des scénarios 1, 2 et 3 et 5 se prolonge sur 9h30 par rapport aux scénarios 4 et de référence (Figure 3.14).

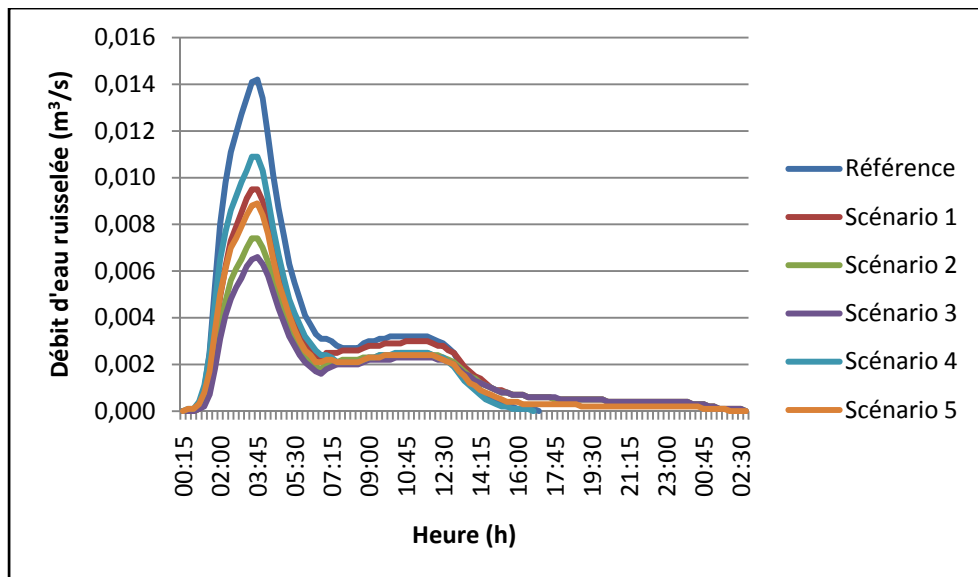


Figure 3.14 Évolution du débit à l'exutoire (pluie Verdun 1, 32 mm)

Le scénario 1 présente une réduction du débit maximal de 33 % et de 17% du volume d'eau ruisselée (Figure 3.15 et Figure 3.16). L'ajout d'une rangée d'arbres et de béton poreux porte la réduction à 48 % du débit maximal et à 32 % du volume ruisselé. Le doublement de ces surfaces entraîne une diminution de 54 % du débit maximal ruisselé et de 37 % du volume ruisselé.

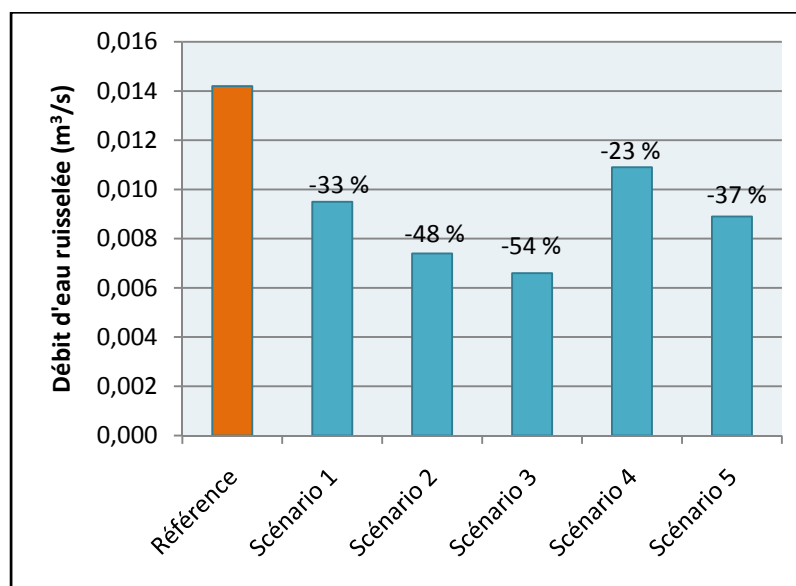


Figure 3.15 Réduction du débit maximal à l'exutoire (pluie Verdun 1, 32 mm)

Ainsi, l'écart entre la réduction du débit et le volume d'eau ruisselée est de 16 % en faveur du débit pour les scénarios 1, 2 et 3. Le scénario 4, sans toits verts, offre une réduction similaire du débit maximal et du volume d'eau ruisselée de 22 %. Enfin, le scénario 5 présente une réduction de 37 % du débit maximal et de 28 % du volume d'eau ruisselée soit un écart de performance de 9 % en faveur du débit.

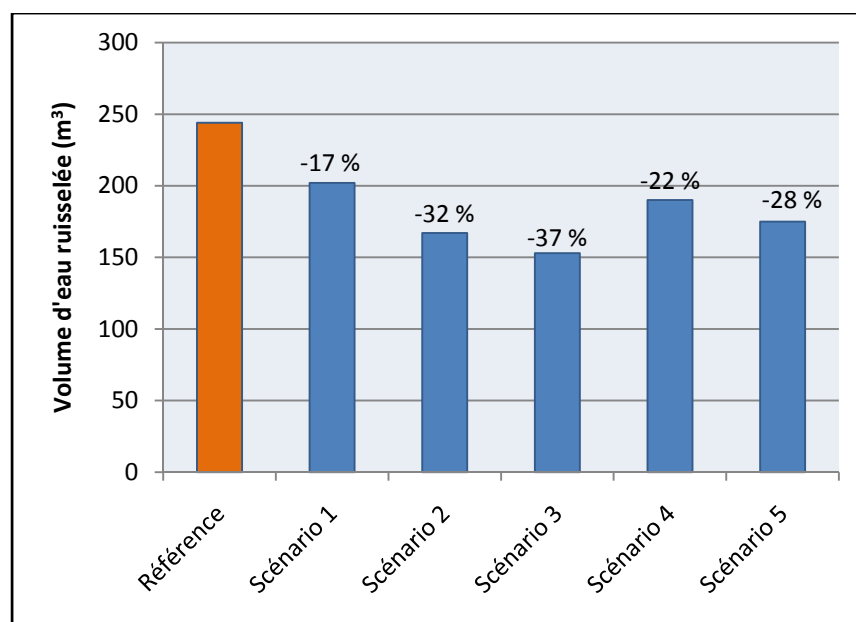


Figure 3.16 Réduction du volume d'eau ruisselée
(pluie Verdun 1, 32 mm)

La comparaison de ces taux de réduction avec les résultats de pluies précédentes montre que les mêmes scénarios proposent des réductions de débit maximal d'eau ruisselée similaires. En ce qui concerne le volume d'eau ruisselée, les taux de réduction sont réduits avec la pluie Verdun 1, pour les scénarios 1, 2, 3 et dans une moindre mesure 5. Seul le scénario 4 présente un taux de réduction constant. Les toits verts semblent en difficulté dans le traitement du volume d'eau ruisselée.

3.3.4 Pluie Verdun 2 (21 mm + 11 mm)

La particularité de cette pluie est de présenter deux pics successifs de 32 mm au total (Figure 3.17), l'un de 21 mm et l'autre de 11 mm, justifiant ici leur analyse détaillée dans le cadre des présentes simulations.

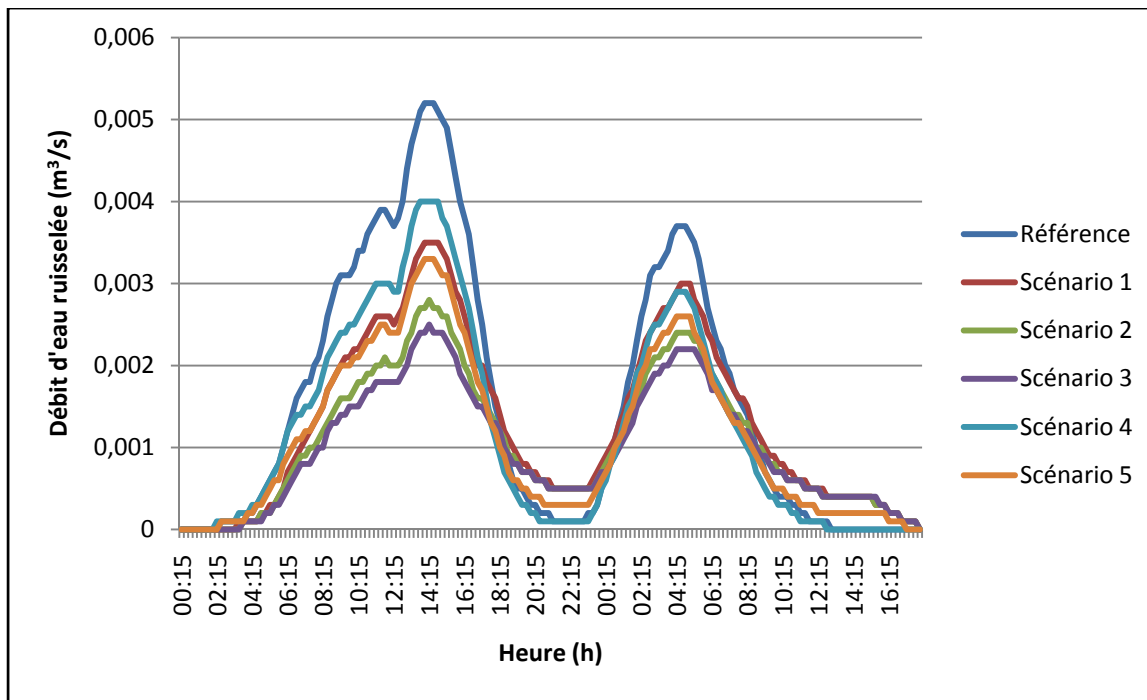


Figure 3.17 Évolution du débit à l'exutoire
(pluie Verdun 2, 21 mm + 11 mm)

La Figure 3.18 présente la réduction du premier pic et du second pic. Les réductions du premier pic de débit maximal sont du même ordre que la pluie de Verdun 1 avec des variations de seulement quelques pour cent. Le deuxième pic correspond à un événement pluvieux plus faible que celui du premier pic. Ainsi, d'après les résultats obtenus en pluie de 12 mm, une réduction plus importante sur le deuxième pic est à prévoir, sans compter le phénomène de saturation.

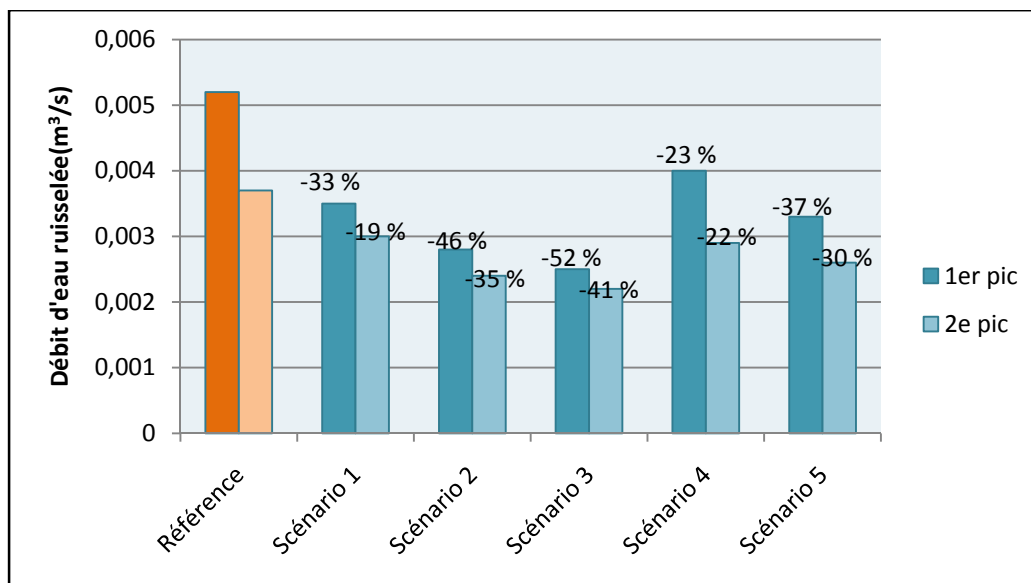


Figure 3.18 Réduction du débit maximal à l'exutoire
(pluie Verdun 2, 21 mm + 11 mm)

Concernant le deuxième pic de débit maximal, le scénario 1 le réduit de 19 %. Le scénario 2 présente une réduction de 35 % et le scénario 3 de l'ordre de 41 %. Le scénario 4 offre quant à lui une diminution de 22 %, pourcentage semblable au premier pic de débit maximal. Le scénario 5 produit une réduction de près de 30 %. La part de volume ruisselé réduit est équivalente à celle de la pluie Verdun 1 (Figure 3.19).

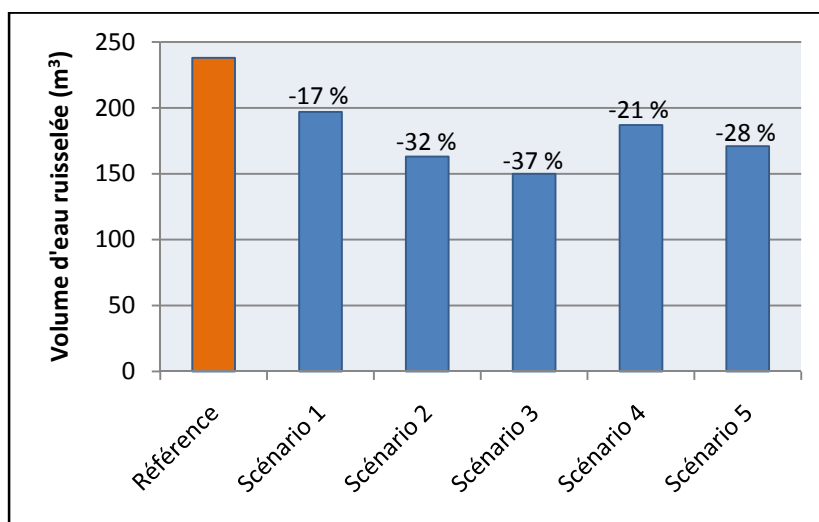


Figure 3.19 Réduction du volume d'eau ruisselée
(pluie Verdun 2, 21 mm + 11 mm)

Le quartier répond moins bien au deuxième pic, puisque le taux de réduction des pics de débit est moindre (Figure 3.20). Les scénarios 1, 2 et 3 sont les plus touchés par ce phénomène de saturation. Le scénario 5 est touché dans une moindre mesure, et le scénario 4 ne semble pas touché. Les scénarios 1, 2 et 3 disposent d'une grande quantité de toits verts. Il apparaît à la vue de ces résultats que les toits verts sont en difficulté avec un sol mouillé.

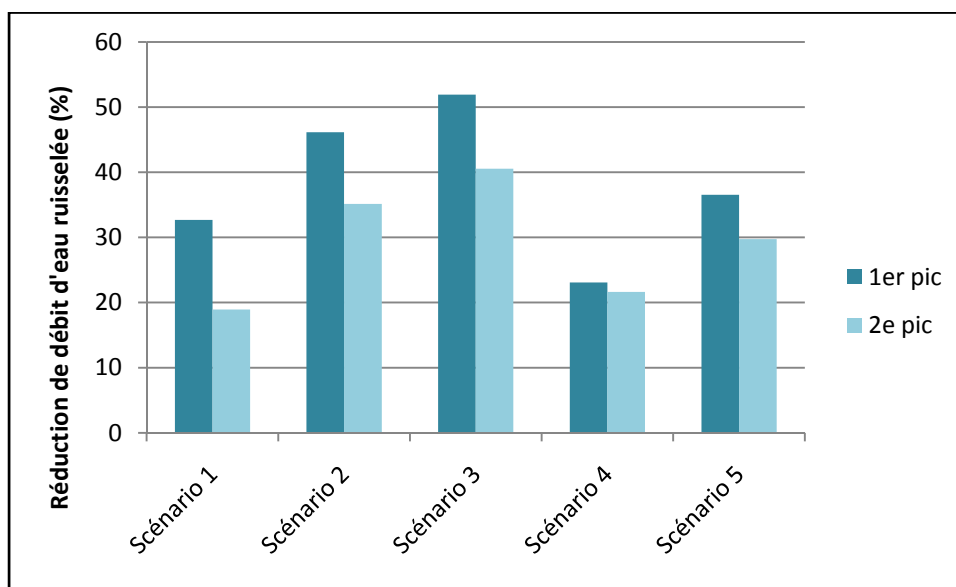


Figure 3.20 Taux de réduction du débit maximal
(pluie Verdun 2, 21 mm + 11 mm)

3.4 Analyse des scénarios

3.4.1 Résultats bruts

Le scénario 3 est le plus efficace concernant la réduction du débit maximal avec des pourcentages de réduction supérieurs à 50 %, suivi de près par le scénario 2 (Figure 3.21). Le scénario 5, bien que moins significatif en termes d'effet, offre une réponse équilibrée entre les différentes réductions des pics de débit maximal. Les scénarios 1, 2 et 3 présentent des

variations suivant la pluie appliquée. Le scénario 4 présente un taux de réduction faible de l'ordre des 20 % quelle que soit la pluie appliquée sur le quartier.

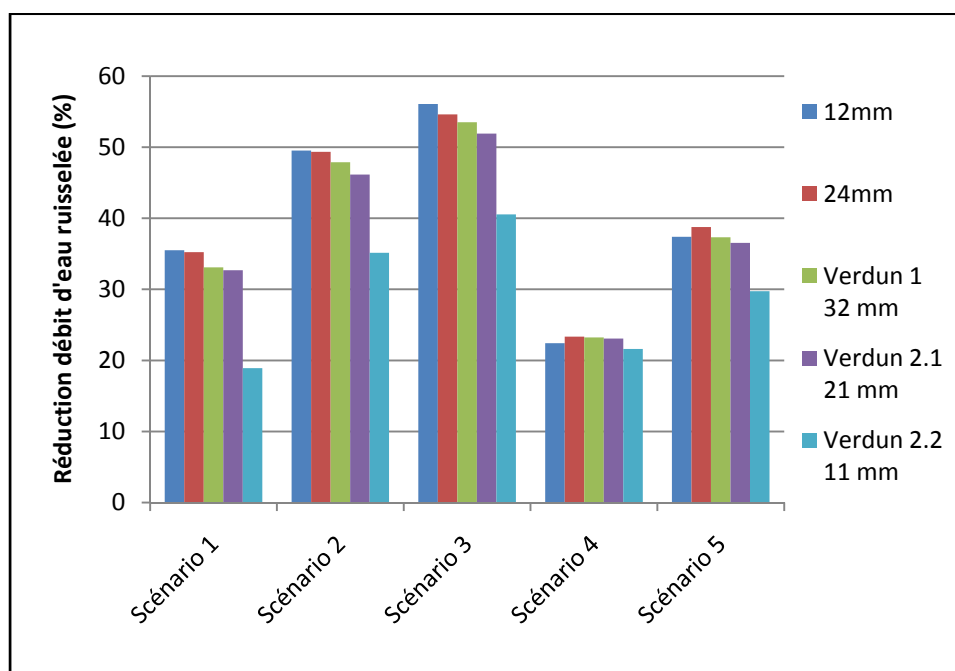


Figure 3.21 Taux de réduction du débit maximal par scénario

Par ailleurs, à la lumière de la Figure 3.22, les scénarios 1 et 4 sont ceux qui contribuent le moins à la réduction (rétention) du volume d'eau ruisselée. Le scénario 3 présente le taux de rétention maximal, avec une valeur voisinant 40 %. Les scénarios 2 et 5 présentent des taux de rétentions assez similaires, avec un avantage pour le scénario 2 pour la pluie de 12 mm. Le scénario 4 a une réponse atypique comparée aux autres scénarios, puisque l'ensemble des scénarios répond différemment aux différentes pluies testées. Le scénario 4 a quant à lui une réponse uniforme quelle que soit la pluie appliquée. Les infrastructures LID hors toits verts sont donc moins influencées par la force de la pluie. Elles traitent le même montant d'eau ruisselée en valeur relative.

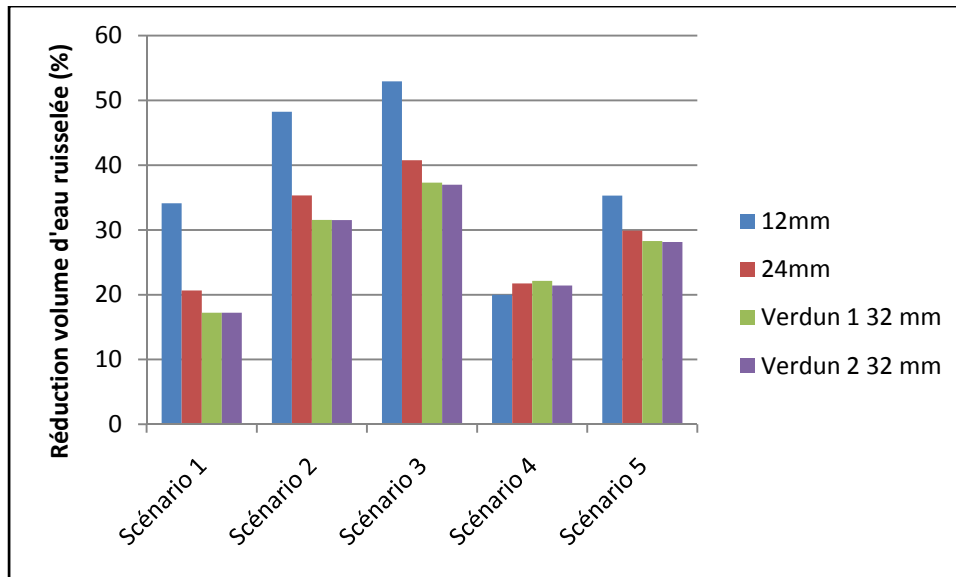


Figure 3.22 Taux de réduction du volume par scénario

Par ailleurs, la comparaison des résultats au sein d'un même scénario montre que la réduction du débit maximal ne varie pas énormément, excepté pour la pluie Verdun 2. Cela met en évidence l'importance du phénomène de saturation dans l'efficacité de certaines infrastructures LID, ici les toits verts. En ce qui concerne la réduction du volume d'eau ruisselée, les taux sont fluctuants suivant la pluie déversée avec notamment un écart considérable entre la pluie de 12 mm et les autres pluies, excepté pour le scénario 4. La difficulté du toit vert à capter un gros volume d'eau explique ce phénomène.

3.4.2 Rendement

Le rendement d'un scénario peut être défini comme le rapport entre le gain de réduction de du débit maximal et/ou du volume d'eau ruisselée et la surface occupée par les infrastructures LID en m^2 . Il s'agit de pondérer les résultats afin de mesurer l'impact des infrastructures LID. En effet, en zone urbaine, la surface est généralement une contrainte majeure, voire critique, et cela d'autant plus dans le quartier d'étude. Une infrastructure LID pour une même surface peut ainsi être évaluée par rapport à son taux de réduction du ruissellement. Plus son score est haut, plus l'infrastructure LID est jugée efficace.

Les résultats précédents ont été divisés par la surface occupée par les infrastructures LID pour chaque scénario (Figure 3.23 et Figure 3.24).

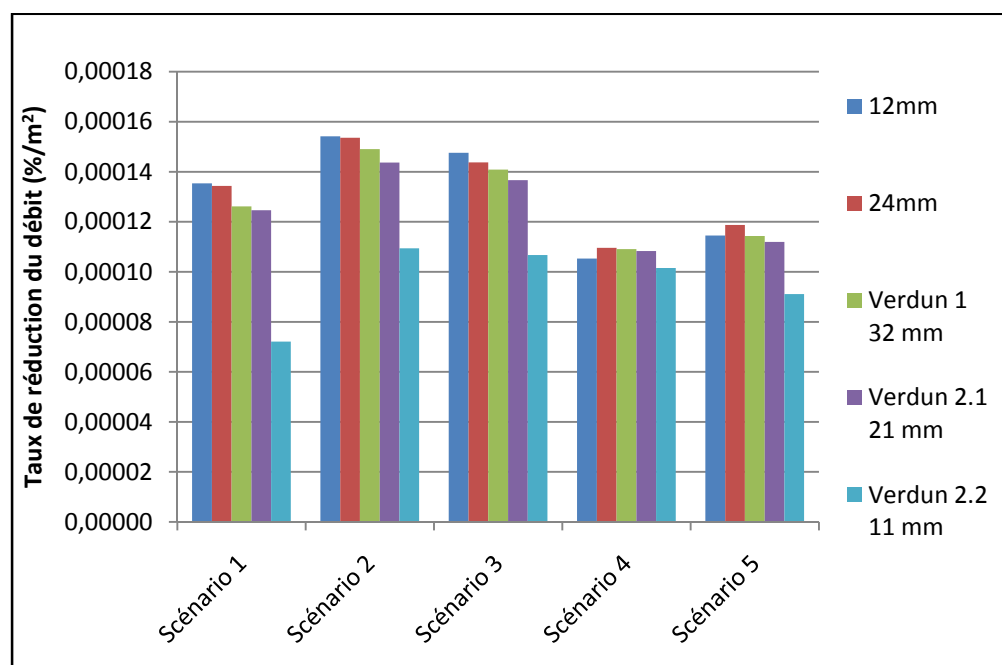


Figure 3.23 Taux de réduction du débit maximal par unité de surface

Par rapport aux résultats précédents, les scénarios 1 et 4 ont été réévalués à la hausse (Figure 3.23). Les scénarios 1, 2 et 3 présentent les taux de réduction par surface les plus performants pour les pluies de 12 mm, de 24 mm et de Verdun 1(32 mm). Le deuxième pic de la pluie Verdun 2 (11 mm) cause des difficultés aux scénarios 1, 2 et 3. Les scénarios 4 et 5 gèrent mieux le deuxième pic de la pluie Verdun 2. Le scénario 4 est le plus homogène, tout comme les résultats obtenus précédemment. Le scénario 4 est composé d'infrastructures LID hors toits verts qui performant quel que soient les événements pluvieux, ce qui ne semble pas être le cas des toits vert composant en grand nombre les scénarios 1, 2 et 3.

La Figure 3.24 présente les résultats obtenus de taux de réduction de volume d'eau ruisselée exprimés par unité de surface. Cette analyse graphique présente une réévaluation des scénarios 1, 4 et 5. En tenant compte de leur occupation, le rendement des scénarios 4 et 5

avoisine les performances des scénarios 2 et 3. Les scénarios 2, 3, 4 et 5 sont efficaces à réduire le volume. Le scénario 1 présente des difficultés pour les pluies moyennes et fortes tandis que la pluie de 12 mm est très bien captée pour l'ensemble des scénarios. Il apparaît que les toits verts sont efficaces à réduire les pluies de faible durée et de faible intensité. Les pluies fortes posent toutefois des difficultés.

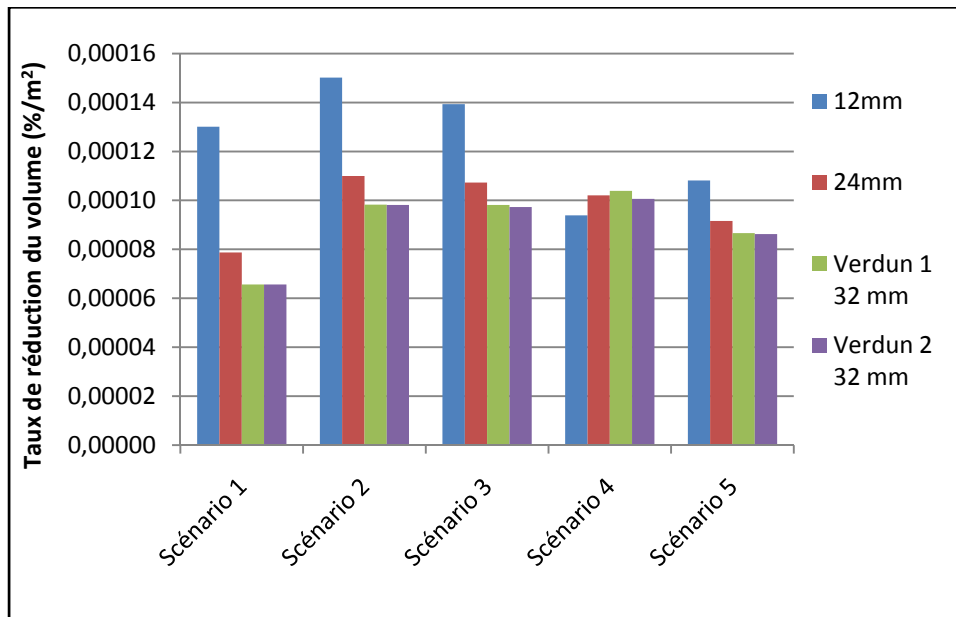


Figure 3.24 Taux de réduction du volume d'eau ruisselée par unité de surface

Les scénarios 2 et 3 sont les plus performants. Le rapport de surface occupée a permis de mettre en évidence les bons résultats des scénarios 4 et 5. Le scénario 1 est en difficulté pour réduire le volume, mais est performant dans le traitement du débit maximal.

3.5 Comparaison des infrastructures LID

Le scénario 5 est utilisé pour comparer la réponse de chacune des infrastructures LID. Les deux pluies extrêmes qui sont la pluie de 12 mm et la pluie Verdun 2 ont été appliquées au bassin versant. La réduction des débits maximaux (Figure 3.25) et des volumes d'eau ruisselée (Figure 3.26) est analysée.

Les pavés poreux et toits verts diminuent le débit maximal de l'ordre des 20,0 % avec la pluie de 12 mm. Les pavés poreux ont des performances constantes, puisqu'ils réduisent d'environ 19,0 % les deux pics de débit dans la pluie Verdun 2. Dans cette simulation, ils ont le même comportement avec un sol sec, qu'avec un sol mouillé. Les toits verts présentent une réduction plus faible de l'ordre de 15,4 % du débit maximal pour le premier pic de débit de la pluie Verdun 2 et de seulement 8,1 % pour le second pic de débit. Les toits verts sont plus performants dans le traitement des pluies faibles et avec un sol sec. Les fossés et arbres présentent une réduction de seulement quelques pour cent pour la pluie de 12 mm et nulle pour la pluie de Verdun 2.

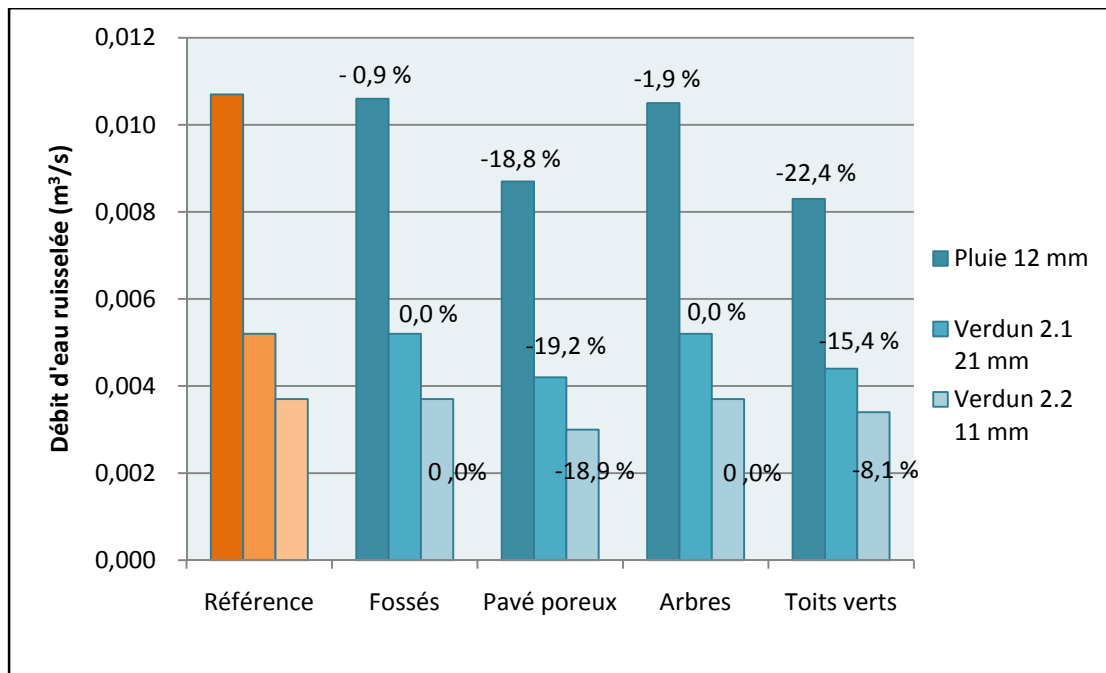


Figure 3.25 Réduction du débit maximal à l'exutoire par infrastructure LID issue du scénario 5 (pluies 12 mm et Verdun 2)

La réduction du volume d'eau ruisselée présente des résultats comparables à ceux de réduction du débit maximal (Figure 3.26). Les fossés sont inefficaces à réduire le volume ruisselé. Les pavés poreux réduisent le volume de l'ordre de 19 % quelle que soit la pluie.

Les arbres offrent une réduction de 1,2 % et 1,3 %. Enfin, la réponse des toits verts varie, une réduction de 16,5 % du volume est obtenue avec la pluie de 12 mm, et de 8,1 % avec la pluie Verdun 2. Comme on l'avait supposé précédemment, les toits verts sont efficaces à réduire les volumes pour des pluies faibles.

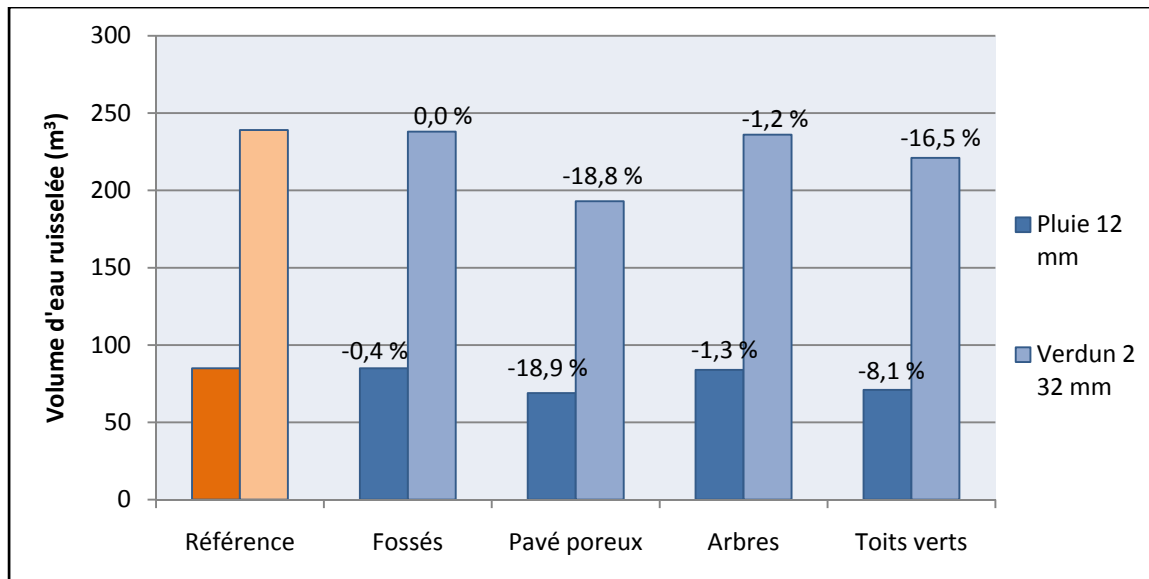


Figure 3.26 Réduction du volume d'eau ruisselée par infrastructure issue du scénario 5 (pluie de 12 mm et pluie Verdun 2)

Le rendement, correspond au rapport entre le taux de réduction du volume d'eau ruisselée ou du débit maximal et la surface des aménagements LID. Le rendement pour la pluie de 12 mm des pavés poreux, des arbres et des toits verts est présenté dans la Figure 3.27. Les arbres sont largement favorisés par ce calcul, puisqu'ils représentent une superficie totale de 77 m². Pour comparaison, 1130 m² de toits verts et 1100 m² de pavé poreux sont implantés. Bien que les pavés poreux et les toits verts offrent des réductions plus importantes, les arbres fournissent un meilleur rendement. La réduction du débit maximal est plus efficace que la réduction du volume d'eau ruisselée pour les toits verts et les arbres.

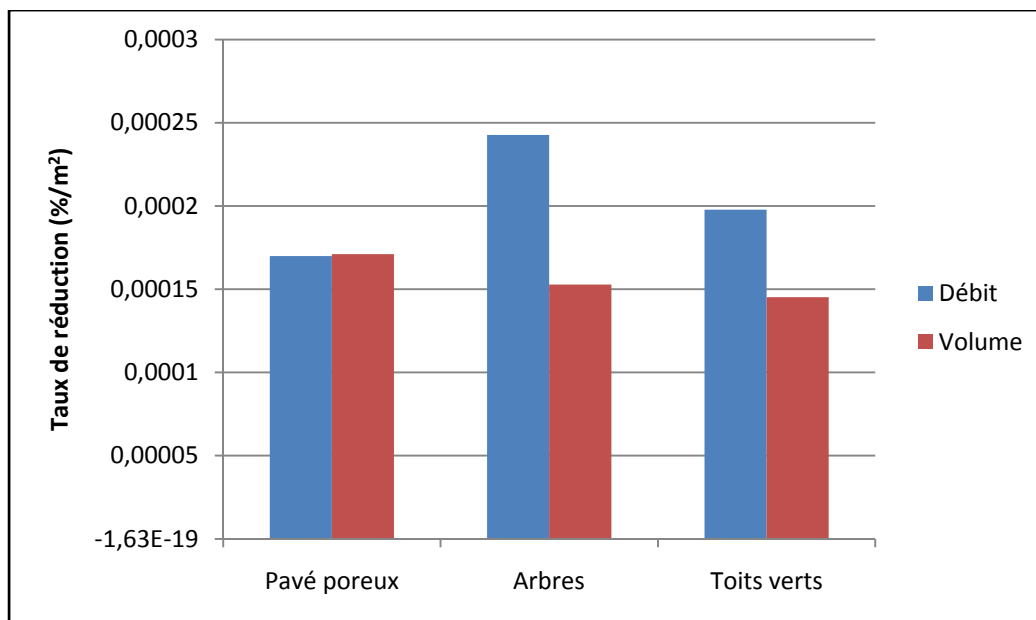


Figure 3.27 Taux de réduction du débit maximal et du volume d'eau ruisselée par unité de surface par infrastructure, issu du scénario 5 (pluie 12 mm)

La Figure 3.28 présente les taux de réduction par unité de surface pour la pluie Verdun 2 (21 mm + 11 m). Les pavés poreux présentent une réduction forte du volume d'eau ruisselée, et des deux pics de débit maximal. Les arbres ne parviennent pas à réduire le débit maximal, mais présentent un bon rendement pour la réduction du volume. Les toits verts sont limités en termes de réduction de volume et de réduction du second pic de débit maximal. Néanmoins, ces rendements sont à relativiser, car la réponse des arbres était faible, de l'ordre du pour cent.

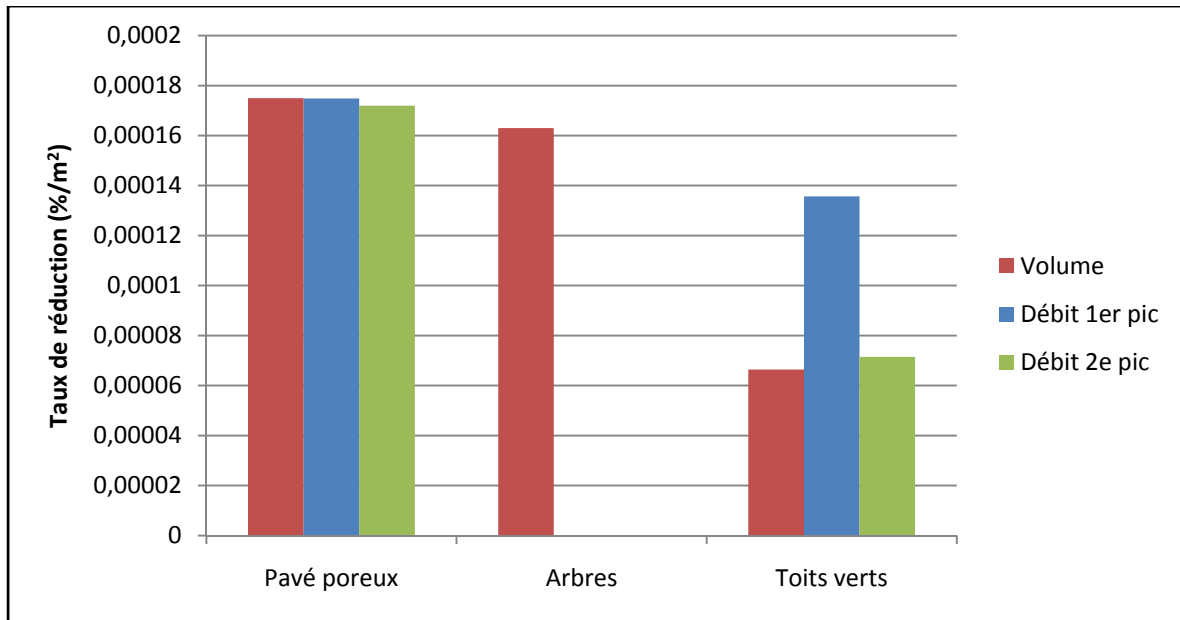


Figure 3.28 Taux de réduction du débit maximal et du volume d'eau ruisselée par unité de surface par infrastructure, issu du scénario 5 (pluie Verdun 2, 21 mm + 11 mm)

3.6 Modification des toits verts avec le scénario 5

Les caractéristiques physiques des toits verts ont été modifiées pour introduire un nouveau matériau de référence, le limon fin. Ce nouveau scénario a été testé avec les quatre pluies. À la lumière des résultats présentés à la Figure 3.29, la modification du toit vert n'influence pas les résultats pour la pluie de 12 mm. La réduction du volume d'eau ruisselée est équivalente pour les deux types de toit vert. La réduction du volume d'eau ruisselée est plus significative, quoique faible en valeur absolue, pour les pluies de 24 mm, Verdun 1 (32 mm) et Verdun 2 (21 mm et 11 mm) avec des écarts entre 3 et 1 % (Figure 3.29).

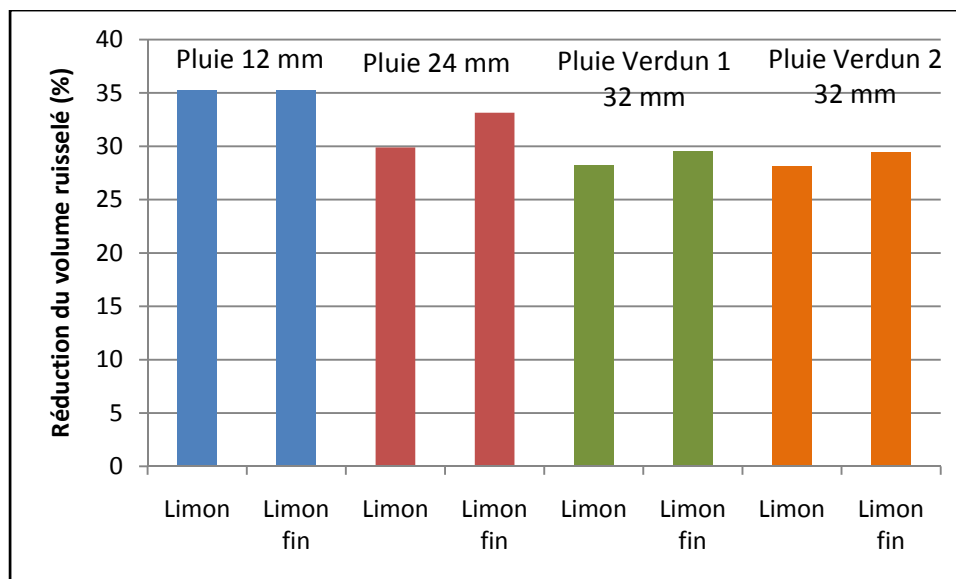


Figure 3.29 Comparaison des réductions du volume ruisselé pour deux types de toit vert pour le scénario 5

Les débits maximaux ne sont pas modifiés par le changement de matériaux du toit vert pour la pluie de 12 mm, la pluie de 24 mm et la pluie de Verdun 1 (32 mm). La pluie de Verdun 2 (21 mm + 11 mm) produit une dégradation du taux de réduction du débit maximal (Figure 3.30). Ainsi, la modification du sol du toit vert a pour conséquence d'amplifier le phénomène de saturation du toit vert.

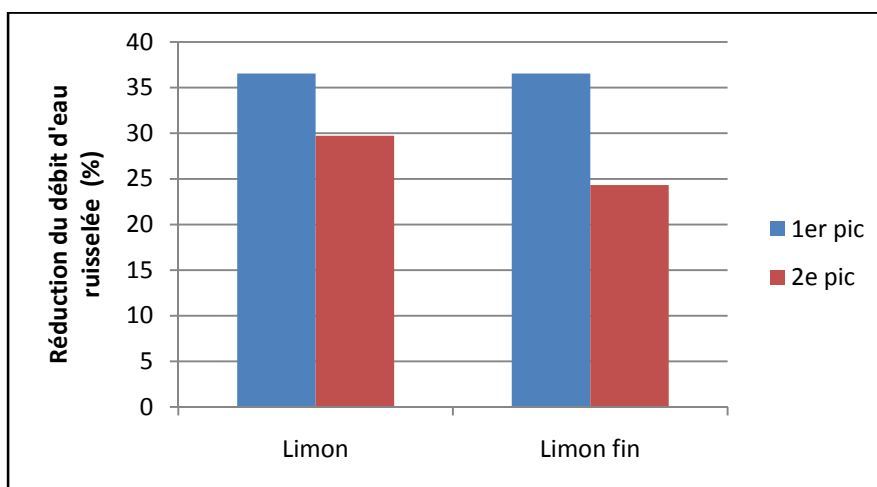


Figure 3.30 Réduction du débit maximal pour deux types de toits verts pour le scénario 5 (pluie de Verdun 2 ; 21 mm + 11 mm)

3.7 Interprétation et synthèse

La pluie de 12 mm est captée correctement par tous les scénarios. Ce fait n'est pas surprenant étant donné que les LID sont conçus à cet effet. Les pluies de 24 mm et de Verdun 1 (32 mm) présentent des résultats inférieurs de captation du ruissellement. La pluie Verdun 2 (21 mm + 11mm) met en évidence les problèmes de saturation des toits verts, le deuxième pic présentant un taux de réduction plus faible.

Pour le débit, la meilleure réduction est obtenue pour les scénarios 2 et 3. Ils bénéficient de l'implantation des toits verts qui sont performants dans la réduction du pic de débit maximal. Le scénario 1 produit une diminution de l'ordre de 30 % avec les quatre pluies. Les autres infrastructures, arbres, fossés et bandes de béton poreux sont moins performantes à atténuer le débit maximal. Si l'on considère la pluie de 12 mm, la réduction du débit et du volume est équivalente. La pluie de 24 mm a mis en évidence que les toits verts montrent une réponse différente entre la réduction du débit et du volume. Ils aident à réduire le pic de débit maximal et sont plus limités pour réduire le volume d'eau produit par le quartier. Concernant l'interception du volume d'eau ruisselée, la pluie de 12 mm est bien captée. Le scénario 4 présente le moins bon résultat et le scénario 3 le meilleur résultat.

Ainsi, les toits verts sont très performants dans le traitement du pic de débit maximal pour des pluies faibles. Ils offrent moins de performances pour des pluies fortes. Un sol mouillé réduit aussi fortement l'efficacité des toits verts. La rétention du volume d'eau n'est pas non plus la caractéristique dominante des toits verts. Les pavés poreux présentent une efficacité moindre en termes de réduction de débit maximal. Leur intérêt réside dans le fait que leur réponse est stable pour l'ensemble des pluies. Leur rendement est ainsi deux fois plus élevé que celui des toits verts pour les fortes pluies. Les pavés poreux présentent aussi l'avantage de traiter avec la même efficacité le volume d'eau ruisselée que le débit d'eau ruisselée. Les arbres en termes de résultats bruts offrent une réduction de débit maximal minime et seulement pour des pluies de faible intensité. La surface du bassin versant couverte d'arbres était très faible, ce qui procure à l'arbre un bon rendement. Le fossé, quant à lui, offre une

réduction particulièrement faible pour une occupation surfacique conséquente (600 m²). Il ne semble pas être en mesure de freiner suffisamment l'eau s'écoulant pour permettre son infiltration.

3.7.1 Le problème du rendement

Il est important de noter que le fonctionnement des infrastructures LID n'est pas le même pour tous. Les toits verts traitent uniquement le ruissellement propre à leur surface, tandis que le stationnement poreux traite 24 % de la surface du bassin versant principal soit la totalité de la rue alors qu'il n'occupe que 11 % du territoire. Les fossés traitent 29 % de la surface du bassin versant principal, soit les bordures des trottoirs non végétalisés, alors qu'ils n'occupent que 7 % du territoire. De même, le scénario 2 est plus efficace que le scénario 3, puisqu'avec seulement une bande de béton poreux, le système traite l'ensemble du ruissellement de la rue. Le scénario 3 utilise lui deux bandes. Ainsi, bien que le scénario 3 présente des résultats bruts plus efficaces, rapportés à la surface de LID, le scénario 2 est le plus performant, considérant la surface de LID.

3.7.2 L'aspect temporel

La présentation graphique des différents résultats a mis en évidence que la courbe de sortie à l'exutoire n'est pas décalée par l'ajout des infrastructures LID. Peu importe le scénario et la pluie modélisée, le débit maximal n'a pas subi de décalage. Le décalage provoqué par les toits verts ou les fossés est masqué par le ruissellement global du quartier. À l'échelle de l'infrastructure LID, ce retard était visible, mais dilué dans le quartier d'étude. Ce constat est amplifié par la très grande imperméabilité du quartier étudié. L'étude d'un quartier plus perméable laisse voir un décalage lié aux infrastructures LID (Stephens, Graham et Reid, 2002). Ainsi, on ne voit pas de retour avec le LID dans un quartier très imperméable. Cette disparation du retard serait également visible à l'échelle d'une ville tout entière. Néanmoins, cette disparation du retard n'indique pas qu'il n'existe plus, puisque la réduction du débit

maximal est la conséquence directe de la rétention temporaire de l'eau de ruissellement par les infrastructures.

3.7.3 La saturation

La pluie Verdun 2 a mis en évidence que toutes les infrastructures LID ne réagissent pas de la même façon lorsqu'elles ont été imprégnées d'eau au préalable par un premier événement pluvieux. Si les scénarios 2 et 3 sont performants à traiter une pluie simple, ils présentent davantage de difficultés lorsque le sol est mouillé. Le scénario 4 n'est pas sujet à ce problème. En effet, les fossés, les bandes poreuses de stationnements ainsi que les arbres infiltrent l'eau captée dans le sous-sol. Les toits verts stockent l'eau infiltrée après l'événement pluvieux pendant un certain laps de temps nécessaire à la vidange de la couche de stockage.

3.7.4 La modification du toit vert.

Le toit vert avec limon fin produit une réponse avec un pic de débit maximal plus haut et une trainée plus courte, ce qui se manifeste par une réduction du volume total d'eau ruisselée. Cette différence explique la différence de volume entre le scénario 5 et le scénario 5 modifié. Le limon fin a donc plus de difficulté à atténuer le pic de débit maximal produit par le quartier. Cette situation s'amplifie lorsque le toit vert est imprégné d'eau préalablement. Ainsi, lors de la modification des caractéristiques des toits verts et plus globalement des infrastructures LID, il peut être nécessaire de favoriser un paramètre, la réduction du volume d'eau ruisselée ou bien la réduction du débit maximal.

3.7.5 Un scénario plus adapté

Le scénario 5 est le plus intéressant en vue d'une implantation sur un quartier. Le scénario 4 présente un bon taux d'efficacité, mais a atteint son maximum. Il est difficile d'augmenter son efficacité en ajoutant d'autres surfaces. La surface de couverture végétale des arbres est

le seul paramètre qui pourrait potentiellement être amélioré. Le scénario 5 constitue un compromis efficace alliant la performance des toits verts à la bonne réponse des infrastructures LID du scénario 4 à la saturation. Ainsi, la réponse du scénario peut être améliorée aisément en ajoutant des toits verts au quartier. La modification du fossé est aussi à prévoir : une végétation plus dense pourrait être prévue pour ralentir le débit d'écoulement et faciliter l'infiltration. Cela engendrait une réduction plus conséquente du débit maximal et du volume d'eau ruisselée.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

4.1 Les méthodes de simulation

Les modèles informatiques sont nombreux pour simuler les systèmes de drainage. Les méthodes de simulation au sein d'un même outil informatique sont tout aussi diverses. La simulation d'un système de drainage suit un schéma connu et est largement documentée. Les infrastructures LID sont soumises à davantage d'interprétations. Les infrastructures d'ingénierie (bassin de rétention) sont quant à elles relativement bien simulées. Bien qu'il existe des méthodes différentes, les résultats obtenus sont semblables et ces infrastructures sont mieux comprises. En ce qui concerne les infrastructures naturelles, les différentes méthodes présentent de grandes disparités. Les anciennes méthodes consistaient à représenter l'impact de ces infrastructures en modifiant les paramètres du bassin versant. Deux moyens sont utilisés : la modification du bassin versant à la source en jouant sur le coefficient d'imperméabilité et la largeur du bassin ainsi que la création d'éléments de stockage. Actuellement, les coefficients ne sont pas assez flexibles ou connus pour représenter la réalité. Aussi, un autre problème est que les entreprises ou laboratoires utilisent des coefficients développés en interne. Ces méthodes induisent une part de subjectivité. Manwaring, lors d'un webinaire sur la simulation des infrastructures LID, recommandait de modéliser le toit vert en utilisant l'option perméable du routage du ruissellement et avec des coefficients de Horton correspondant au sable (Manwaring, 2010). L'imperméabilité du toit vert était fixée à 15 %. Néanmoins, le sol d'un toit vert n'est pas comparable à du sable, sa conductivité est beaucoup trop importante. À présent, les développeurs des simulateurs cherchent à développer des modules plus réalistes pour les infrastructures LID. Ces modules utilisent des paramètres physiques réalistes pour décrire les infrastructures LID couche par couche. Ils seront plus aisés d'utilisation. Néanmoins, on constate des manques concernant la modélisation de la végétation.

4.2 L'arbre

La difficulté liée à la simulation des arbres dans les différents scénarios testés a déjà été discutée précédemment. L'utilisation de coefficient pour modéliser l'arbre n'est actuellement pas une avenue viable, ce qui a conduit à l'utilisation du module LID de SWMM. Ce module permet la modélisation de l'arbre comme une aire de biorétention. Cette approche est valable pour les arbres de petite taille avec un couvert végétal égal à l'emprise au sol de l'élément arbre dans la rue. Pourtant, il serait particulièrement intéressant d'étudier l'impact de rangées d'arbres matures sur le ruissellement urbain. À Montréal, il n'est pas rare que le feuillage forme une véritable allée couverte. Il est, à l'heure actuelle, impossible d'évaluer cette situation avec le module LID. En effet, le module LID est construit de la sorte qu'il simule la surface de la canopée égale à la surface d'occupation au sol de l'arbre. Pour un arbre de grande taille planté dans une rue, il est impossible de définir les différents types de sol présents sous la canopée (rue, trottoir, sol meuble). La solution serait de revenir aux méthodes traditionnelles, en modifiant les paramètres du bassin versant avec toute la part de subjectivité que cela implique. L'arbre est un élément complexe à modéliser. Des chercheurs américains ont développé un modèle, UFORE, simulant l'ensemble des processus hydrologiques en cours lorsqu'un arbre reçoit une pluie (Wang, Endreny et Nowak, 2008). I-Tree (anciennement UFORE) peut être utilisé pour étudier les rangées d'arbres. Il permet de générer des bilans d'interception annuels et des coûts économisés grâce à cette interception. C'est un outil d'analyse très performant à l'échelle d'une ville, mais pas adapté à l'échelle de l'événement pluvieux. La ville de Barcelone l'a notamment utilisé pour analyser l'état de sa couverture végétale. Il prend en compte les forêts urbaines, les arbres plantés, mais aussi les arbustes et les aires gazonnées. La dernière version de I-Tree Hydro a été spécialement créée pour modéliser les impacts des modifications du couvert boisé et du taux d'imperméabilisation d'un bassin versant sur le ruissellement urbain. Elle est capable de fournir un hydrogramme de sortie pour différentes pluies (USDA Forest Service, 2010). Les données d'entrée sont complexes à maîtriser pour les non-spécialistes des arbres. Toutefois, on peut imaginer, dans un avenir proche, que SWMM disposera d'outils similaires pour évaluer les impacts du couvert boisé sur un système de drainage.

4.3 La simulation continue

Lors de la modélisation des infrastructures LID, la simulation continue est fréquemment abordée. Les données utilisées regroupent typiquement les données climatiques d'une dizaine d'années avec un pas de temps d'une heure. La sortie d'une simulation continue est un hydrogramme continu; il est analysé statistiquement. La simulation continue est utile pour modéliser les processus d'infiltration et d'évaporation (Kuch, 2010). Elle est décrite comme l'unique façon de modéliser la vie des plantes et les pertes réelles dues à l'évapotranspiration et à l'infiltration. En effet, elle permet l'utilisation de fichiers climatiques afin de calculer l'évaporation en fonction de la température et du vent. Pour étudier un événement pluvieux particulier, on lance la simulation continue puis on procède à un zoom sur l'événement, celui-ci étant donc modélisé avec tous les processus hydrologiques. La force de la simulation continue est que le programme déterminera lui-même les conditions antécédentes à l'événement pluvieux sélectionné. Elle retire le paramétrage des conditions d'humidité du sol au manipulateur. Dans le cadre de la présente étude, le recours à une pluie dotée de deux événements pluviaux répond à ce principe puisque SWMM a modélisé la saturation progressive du sol tout au long de la première pluie. Ainsi, le recours à une pluie d'une durée de 10 ans paraît peut-être disproportionné pour étudier un événement pluvieux.

4.4 La question de la végétation

Malgré le recours à la simulation continue, l'évaporation pose toujours problème. Dans SWMM, l'évaporation est calculée ou fixée comme un coefficient à base quotidienne ou mensuelle. Ce coefficient est global au bassin versant. Dans le cadre de la modélisation d'infrastructures LID, cette hypothèse est fautive. En effet, le coefficient d'évaporation est fonction de l'espèce végétale (Glorieux, 2010). Une étude visant à choisir le modèle le plus adapté pour simuler le ruissellement issu des toitures vertes a montré que l'utilisation de la méthode Green-Amp seule n'était pas suffisamment efficace (Roehr et Kong, 2010). Elle propose donc de combiner les résultats de SWMM avec l'équation suivante qui modélise l'évapotranspiration :

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (4.1)$$

avec ET_c = évapotranspiration (mm), ET_0 = évapotranspiration de référence pour une espèce végétale donnée (mm) et K_c = coefficient Crop.

Le ruissellement du toit correspond alors à la différence entre le ruissellement SWMM et l'évapotranspiration calculée. Cette méthode présente des résultats fiables pour la simulation annuelle de la réponse des toitures vertes. Elle présente toutefois des limites en ce qui concerne la simulation d'événements pluviaux sur une période plus courte. En revanche, elle met en lumière les manques en matière de traitement de l'évaporation par la végétation de SWMM. Également, le coefficient d'évaporation sous SWMM est calculé sur une base quotidienne, ce qui ne diffère pas du cas de la simulation d'un événement unique. On peut ainsi douter du fait que la simulation continue fournisse des résultats plus précis à l'échelle de l'événement qu'une simulation réduite au seul événement en matière d'évaporation.

Le module LID de SWMM permet la modélisation de la végétation en ayant recours à la couche surface. Trois paramètres permettent de définir le type de végétation : son épaisseur, son coefficient de rugosité et son taux de couverture. Ces paramètres sont limités et abstraits lorsque l'on veut paramétrer la présence d'arbustes, de buissons et de graminées. La fonction première de SWMM n'est pas de modéliser la végétation. Devant la transformation actuelle des villes d'un point de vue environnemental, le développement d'outils pour simuler les infrastructures LID devient de plus en plus une nécessité.

4.5 La question d'échelle

La définition de l'échelle appropriée d'étude est également à considérer. La délimitation du quartier étudié s'est faite de façon arbitraire en respectant la structure du réseau de drainage. Il est intéressant de s'interroger à savoir si la surface choisie était adéquate. Tel que montré lors de l'analyse des résultats, du fait de sa grande surface, les effets de retard des infrastructures LID sont plutôt masqués. Le label LEED se refuse à définir une surface propre à la notion de quartier (Council, 2009). La définition d'une échelle d'étude se fera

alors au cas par cas. Une limite pourrait être la typologie du quartier. L'Élément Hydrologique Urbain (EHU) développé par Berthier (2001) apportait une approche différente puisqu'il proposait de définir la ville comme une somme d'Éléments Hydrologiques Urbains.

4.6 La question de l'évaluation de la performance

Avec la simulation de cinq scénarios, la question de l'évaluation s'est posée. Évaluer le potentiel de réduction du volume d'eau ruisselée d'une infrastructure LID s'est imposé pour juger de ses performances. La question du volume d'eau ruisselée a une grande importance pour éviter la surcharge du réseau de drainage. La réduction du débit maximal est aussi un paramètre essentiel pour éviter les phénomènes de refoulement et de surverses. L'évaluation des scénarios ne peut pas se baser sur un pourcentage de réduction global, car chaque pluie testée est absorbée par le système d'une manière différente. Il est alors intéressant de se pencher sur l'existence de critères permettant juger de la bonne forme hydrologique d'un quartier. Ces critères tiendraient compte des aspects environnementaux, sociaux et bien sûr économiques. L'aspect économique, non traité dans cette étude est déterminant pour évaluer la performance des scénarios. Actuellement, il est dans la norme de définir des objectifs de réduction de volume pour un quartier à partir de son taux de ruissellement pré-développement urbain (Gironás, Roesner et Davis, 2009). Dans le cas de la présente étude, il est difficile d'utiliser ce type de critère.

Le label LEED a créé une certification à l'échelle des quartiers, le *LEED for Neighborhood Development*. Elle est conçue à l'attention des nouveaux lotissements en construction. Le crédit 8 de ce label a pour sujet les eaux de ruissellement. Il peut fournir un maximum de 5 points. Ainsi, le crédit 8 récompense la captation totale des 80 percentiles aux 95 percentiles du volume total d'eau déversée par les pluies sur une période de 20 à 40 ans (Council, 2009). Par exemple, pour le cas du quartier d'étude (situé à Montréal), les 95 percentiles des pluies sur 40 ans devraient atteindre la barre des 40 mm. Il faudrait ainsi que l'un des scénarios parvienne à capter la totalité de l'eau ruisselée pour une pluie de 40 mm pour répondre positivement au crédit 8. Dans le cadre de la transformation d'un quartier

existant, l'effort pour parvenir à ces objectifs ne paraît pas raisonnable. Un label LEED pour l'Aménagement des Quartiers (AQ) est en cours de développement au Canada. Un projet de labellisation des écoquartiers en Belgique, tenant compte des transformations de quartier, prévoit l'attribution de points pour la présence de dispositifs LID (Vanderstraeten *et al.*, 2011). Des points supplémentaires sont octroyés si le quartier existant possédant plus de 30 % de surfaces minérales installe un système de rétention. Le projet de fait toutefois pas mention d'objectifs de réduction chiffrés. Il serait aussi intéressant de définir des critères d'efficacité minimale. Les décideurs auraient plus de facilité à comprendre la vraie portée de l'implantation d'infrastructures LID. L'un de ces critères pourrait être un pourcentage minimal de réduction à atteindre pour valider le projet d'aménagement. L'évaluation des scénarios d'implantation d'infrastructures LID n'est certainement pas aisée.

Cette étude n'a pas abordé l'aspect économique. Le coût des infrastructures LID est pourtant un critère primordial pour leur développement futur en milieu urbain. Il peut être un moteur ou un frein à l'implantation d'infrastructures LID. Au cours de cette étude, un rendement des infrastructures LID a été calculé. Il est égal au rapport entre le pourcentage de réduction de débit ou de volume d'eau ruisselée par la surface occupée par les infrastructures LID. La prise en compte de l'aspect économique pourrait se faire en déterminant le coût d'un m² d'infrastructures LID. De cette façon, le rendement serait pondéré par des impératifs financiers. Le coût de l'infrastructure ferait intervenir les coûts de construction, de fonctionnement et d'entretien. De cette façon, il serait aisé de comparer la performance des infrastructures LID à des infrastructures plus traditionnelles, un bassin de rétention par exemple.

4.7 Impact sur les débordements

Les débordements sont des événements étudiés et comptabilisés. Au Québec, le MAMROT tient un compte de l'ensemble de ces événements. Un critère de performance serait de dénombrer le nombre de débordement évité grâce à l'implantation des mesures LID. Il serait nécessaire de connaître le profil des pluies qui conduisent à des débordements, et de les

simuler sur le quartier étudié. Sur la base des résultats obtenus par cette étude, il apparaît que les aménagements LID sont performants à réduire le ruissellement, et notamment le pic de débit d'eau ruisselée. Néanmoins, il est difficile de savoir à quel taux les débordements seraient évités.

CONCLUSION

La question de la gestion de l'eau en milieu urbain est au centre des préoccupations de notre société. En effet, l'urbanisation a des impacts significatifs sur la gestion des eaux pluviales. Toutes les eaux ruisselantes sont dirigées vers le réseau de drainage menant parfois à des dépassements de la capacité du réseau et, conséquemment, à des problèmes d'inondations et de refoulements d'égout. Les changements climatiques ont pour conséquence de bouleverser les conditions pluviométriques actuelles. Une fréquence accrue des averses est prévue. De nombreuses villes auront à faire face à ces changements qui accroissent la nécessité d'avoir recours à une gestion des eaux de ruissellement. Les infrastructures LID sont perçues comme un moyen d'adaptation à ces nouvelles conditions. Cette démarche offre une alternative intéressante à l'utilisation de réseau de traitement des eaux pluviales.

L'étude avait pour objectif de quantifier les effets des aménagements *Low Impact Development* (LID) sur les eaux de ruissellement en milieu urbain. Afin de quantifier les impacts des infrastructures LID, plusieurs scénarios ont été étudiés utilisant des aménagements LID dans un environnement urbain très dense. Il était nécessaire de modéliser un quartier de référence avec une réponse hydraulique connue, afin de comparer sa réponse après l'implantation de plusieurs aménagements LID. Plusieurs scénarios d'implantation ont été testés en utilisant le logiciel de simulation SWMM. La contrainte majeure était la forte densité du quartier choisi, une portion de la rue Beaudoin dans l'arrondissement Sud-ouest de Montréal. Quatre infrastructures ont été sélectionnées (toits verts, fossés, pavé poreux et arbres plantés) pour composer les scénarios. Au cours de l'étude, il est apparu que les moyens de simuler les infrastructures LID n'avaient pas été évalués. Ainsi, différentes méthodes de modélisation des toits verts et des arbres ont été étudiées au préalable. Plusieurs simulations selon cinq scénarios de base ont ensuite été réalisées pour tester des modifications de paramètres des infrastructures LID. Les scénarios implantent progressivement des infrastructures LID supplémentaires. Le premier utilise uniquement des toits verts, le dernier a recours au pavage poreux, fossés de drainage, arbres plantés et toits verts. Par ailleurs, quatre pluies de projet ont été créées pour simuler ces scénarios sous

différentes conditions pluviométriques. Une pluie de 12 mm a permis d'étudier le système pour des pluies fréquentes qui doivent être capturées sur site. Une pluie de 24 mm a été étudiée afin d'évaluer le système dans un cas critique. La « Verdun 1 » est une pluie de 32 mm d'une intensité maximale de 6 mm/h avec une trainée assez importante. La « Verdun 2 » est une précipitation de 32 mm composée de deux événements pluviaux qui a permis d'étudier la réponse du quartier avec un système saturé.

Les scénarios composés d'une grande surface de toits verts, alliés à des pavés poreux se sont avérés les plus performants en termes de résultats bruts. Néanmoins, la prise en compte de la surface aménagée par des infrastructures LID a permis de mettre en évidence l'efficacité du scénario utilisant les infrastructures LID hors toits verts, soit les fossés, les pavés poreux et les arbres plantés. Un scénario composé uniquement de toit vert extensif (10 à 15 cm d'épaisseurs) montre moins d'efficacité pour traiter le volume, mais est davantage performant dans le traitement du débit maximal. L'implantation de 32 % de toits verts sur le bassin versant conduit à une réduction de l'ordre de 30 % du débit maximal d'eau ruisselée et de 30 à 20 % du volume d'eau ruisselée à l'exutoire. L'ajout de fossés, arbres et béton poreux permet une réduction de débit de l'ordre des 50 % et de 40 à 50 % du volume d'eau ruisselée. Les pourcentages de réduction du volume d'eau ruisselée sont réduits de l'ordre de 10 % avec l'application des pluies moyennes. Les arbres qui représentaient seulement 1 % du bassin versant réduisent de 0,9 % le débit maximal d'eau ruisselée pour les pluies faibles et réduisent les volumes ruisselés de 1,2 % quel que soit la pluie appliquée. Ils présentent une solution très efficace compte tenu de leur faible couverture spatiale.

Les infrastructures LID, exception faite des fossés, ont prouvé leur efficacité à réduire le débit maximal et le volume d'eau ruisselée avec des pluies faibles. Pour des pluies moyennes, les toits verts et les arbres sont moins performants. Le pavé poreux est le plus régulier. Les infrastructures LID présentent des limites sur sol mouillé avec des écarts variant de 3 % à 15 % suivant les scénarios. Parmi les LID, les toits verts sont les plus touchés par la saturation. En effet, leur capacité à réduire le débit maximal d'eau ruisselée est diminuée de l'ordre de 50 % avec un sol mouillé. Les infrastructures végétales (toits verts, arbres, fossés)

semblent présenter une réponse moins adaptée à la saturation que les infrastructures minérales (pavé poreux). Le scénario d'aménagement le plus adapté est celui offrant une mixité entre les différentes infrastructures LID.

Cette étude a permis de mieux comprendre le comportement de quelques infrastructures LID, ainsi que d'évaluer la réponse possible d'un quartier de Montréal lors d'une étude de cas. L'étape suivante à cette recherche consisterait à procéder à la calibration du modèle avec des données issues d'un quartier dans le but de s'assurer de la validité du modèle. L'étude d'autres quartiers, dont ceux du centre-ville de Montréal, avec notamment des typologies différentes, serait également une avenue intéressante à explorer. Dans le cas du centre-ville, les taux d'imperméabilité sont sensiblement les mêmes, mais l'environnement y est davantage hostile avec une pente accentuée et des rafales de vent courantes. La poursuite de cette étude passerait également pour la prise en compte de l'aspect économique. Il est primordial pour les gestionnaires des villes et détermine en grande partie le futur des aménagements LID. Ainsi il serait intéressant de développer un rendement économique. Cette étape pourrait être complétée par une comparaison de coûts avec les infrastructures d'un réseau de drainage traditionnel.

En ce qui concerne SWMM, le « module LID » control constitue le premier pas des développeurs dans la modélisation intégrée des infrastructures LID. Son amélioration passerait par une meilleure modélisation de la végétation. Dans le même ordre d'idées, une prise en compte plus fine de l'évaporation pourrait s'avérer utile, car elle jouera un rôle grandissant avec l'augmentation des surfaces végétales en ville. Un autre point valable, tant pour l'amélioration de SWMM que pour l'amélioration des principes d'aménagement en milieu urbain, serait de reconnaître l'arbre comme une infrastructure LID ayant un véritable rôle à jouer dans la gestion intégrée des eaux pluviales. Actuellement, l'arbre n'est pas reconnu pour ses performances hydrauliques. Des études complémentaires sur la plantation d'arbres dans les rues permettraient de mettre en valeur ses forces. Enfin, la création de critères d'évaluation des infrastructures LID apparaît essentielle pour aider les professionnels

à développer des stratégies de gestion des eaux pluviales durables et efficaces et en termes environnemental, économique et social.

ANNEXE I

MESURES LID

Mesures applicables à la source

Tout d'abord, il existe les mesures qui s'appliquent à la source, soit à la tombée de l'eau de pluie. On les appelle aussi mesures de prétraitement lorsqu'elles sont suivies par d'autres mesures. Elles contiennent les jardins de pluie, les bandes filtrantes, les pavés poreux, les puits absorbants, les toits verts et les citernes en ce qui concerne les dispositions constructibles.

Les jardins de pluie

Un type classique d'aménagement est le jardin de pluie, aussi appelé une aire de biorétention. Un jardin de pluie est un aménagement végétalisé de petite taille conçu à une hauteur plus faible que les environs, dessiné pour absorber le ruissellement. Il est généralement adjacent à un stationnement, un trottoir ou un terre-plein central. Il recueille entre 5 et 10 % du ruissellement des surfaces adjacentes (Boucher, 2010). Cette structure est facilement implantable dans les quartiers existants. Elle est aussi utile en hiver, puisqu'elle peut stocker la neige (Low Impact Development Center, 2007).

Les pavés poreux

Les pavés poreux permettent une rétention de l'eau de pluie similaire à un système naturel en laissant s'infiltrer le ruissellement directement ou en passant à travers des alvéoles. Contrairement aux surfaces dures traditionnelles comme l'asphalte ou le béton, le pavage poreux, construit à partir de matériaux poreux, filtre et réduit le ruissellement. Il est souvent utilisé dans les allées, emplacements de stationnements et autres places où le trafic est faible. Les pavés poreux sont performants, et ce tout au long de l'année. De plus, il ne nécessite que peu d'entretiens.

Bande filtrante

La bande filtrante est une surface gazonnée conçue pour réguler le débit des surfaces perméables adjacentes en ralentissant la vitesse d'écoulement et filtrant quelques polluants. La bande filtrante n'est pas très efficace pour infiltrer le ruissellement. Elle est souvent située en amont d'un jardin de pluie.

Puits

Le puits, semblable à une fosse, capte le ruissellement dans les vides d'un volume de pierre. Il est souvent construit à proximité des bâtiments et permet de recueillir les eaux de toitures et des surfaces pavées pour les acheminer lentement vers les couches profondes du sol.

Toitures vertes

Comparées aux autres éléments de gestion des eaux de ruissellement, les toitures vertes ont l'avantage de ne pas nécessiter de surfaces supplémentaires. Dans les toits verts, les pluies stockées s'évaporent soit directement depuis la surface du toit (interception, évaporation), soit transpirées par les plantes (transpiration).

Les toits verts sont composés de plusieurs couches de matériaux dont les épaisseurs varient suivant les effets recherchés. On compte ainsi la couche de végétation, la (ou les) couche(s) de substrat, une couche filtre et une couche de drainage. Toutes les toitures vertes n'ont pas les mêmes performances hydrauliques : en général, plus le substrat est épais, plus la rétention sera importante. Par exemple, sur une base annuelle, des toitures intensives (1 à 2 m d'épaisseurs) testées en Belgique retenaient jusqu'à 50 % de l'eau et seulement 30 % pour les toitures extensives (10 à 30 cm d'épaisseurs) (De Cuyper, 2007). Bengtsson (2002) a étudié l'équilibre de l'eau pour un toit de sedum basé dans un quartier résidentiel à Malmö (Suède). Les résultats ont montré que le ruissellement annuel pouvait être réduit à plus de 50 % grâce à l'évapotranspiration. Les études dans d'autres pays ont démontré des résultats similaires. L'évaporation depuis les toits verts à Berlin compte pour 60 à 79 % de la pluie annuelle. De même, basés sur des exemples tirés des villes de Chicago, Philadelphie et Portland, 75 % des eaux pluviales seraient retenus par les toits verts extensifs aux États-Unis (Scholz-Barth,

2001). À titre de comparaison, le ruissellement pluvial est de 90 % pour un toit traditionnel bitumineux (Scholz-Barth, 2001).

Forêt urbaine

Les arbres dans les aires urbaines peuvent réduire les eaux de ruissellement grâce à l'interception de l'eau pluviale par la canopée avant qu'elle n'atteigne le sol, ce qui réduit également la charge en polluants de l'eau. L'interception des précipitations annuelles par la forêt urbaine de Santa Monica (Californie) a été évaluée à 1,6 %, ce qui équivalait à une économie de 110 000 dollars allouée au traitement des eaux (Xiao et McPherson, 2002). Les bienfaits hydrologiques des arbres en milieu urbain seraient donc réels. Néanmoins, ils ne sont pas toujours considérés comme une mesure du LID. Pourtant, les forêts urbaines, tout comme les arbres plantés, ont un grand rôle à jouer dans la gestion intégrée des eaux pluviales.

Déconnexion des gouttières et citerne d'eau de pluie

La déconnexion des gouttières, mesure non constructive, consiste à ne plus les raccorder au réseau d'égouts, qu'il soit unitaire ou séparatif. Le ruissellement en provenance du toit est alors redirigé vers une surface perméable. Cette technique, en plus, de réduire le volume d'eau ruisselée en temps de pluie, a pour avantage de réduire le risque de déversement dans les aires résidentielles avec réseau unitaire. L'eau en provenance du toit peut également être stockée dans une citerne et réutilisée par la suite pour l'arrosage ou encore alimenter les toilettes ou d'autres appareils électroménagers (Mailhot *et al.*, 2007).

Mesures applicables en réseau

Certaines mesures sont utilisées en réseau; elles s'intègrent par exemple à la trame d'une rue. Le rôle des noues et des fossés engazonnés consiste non seulement à retenir et à acheminer les eaux de ruissellement dans un exutoire, mais également à permettre leur traitement.

Noue

La noue comporte un fond drainant constitué de sols perméables. Elle est conçue pour se drainer rapidement. Elle peut abriter un drain en son fond pour améliorer l'écoulement.

Fossé

Les fossés se prêtent bien à la rétention des eaux de ruissellement des rues et des routes. Les fossés engazonnés se distinguent des fossés de drainage par leur largeur plus importante et leurs rebords en pente plus douce. Ils sont composés d'un tunnel contenant une végétation plus ou moins dense, conçu pour capturer les polluants, favoriser l'infiltration et réduire la vitesse du débit des eaux de ruissellement. Certains fossés abritent en plus un marais au centre, pour retenir temporairement les eaux, allant jusqu'à l'ajout d'une aire de biorétention. Ainsi, noue et fossé sont flexibles dans leur utilisation; ils peuvent stocker ou non l'eau ruisselée, abriter ou non une végétation dense dans le but de la filtrer.

Mesures applicables en aval

Enfin, on considère les mesures qui s'appliquent en aval du quartier; elles reçoivent les eaux de ruissellement que les mesures de contrôle à la source et le contrôle en réseau ne sont pas parvenues à traiter et infiltrer.

Les bassins de rétention

Le bassin sec est conçu pour recevoir en temps de pluie les eaux de ruissellement pour certaines gammes de débit; en règle générale, il se vide sur une période relativement courte et demeure sec lorsqu'il n'y a pas de précipitations. Il n'a pas de vocation à infiltrer ou à filtrer les eaux ruisselées. Il peut également s'agir d'un bassin qui maintient une retenue permanente d'eau de façon à créer un lac. Dans ce cas, des mécanismes (décantation) permettent d'éliminer des polluants.

Les marais artificiels

Le marais est une étendue d'eau moins profonde que le bassin, en partie envahie par de la végétation. La filtration des polluants s'effectue notamment par des mécanismes de biofiltration (présence des plantes aquatiques).

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Akan, A. O. 2003. *Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality : engineering applications and computer modeling*. Hoboken, N.J.: Hoboken, N.J. : J. Wiley & Sons.
- Auld, H., et D. MacIver. 2007. *Les changements dans les régimes météorologiques, l'incertitude et les risques pour les infrastructures : les nouvelles exigences d'adaptation*. Toronto: Environnement Canada.
- Bedient, P. B., W. C. Hubert et B. E. Vieux. 2002. *Hydrology and floodplain analysis*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 795 p.
- Berthier, E. 1999. « Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain : élaboration du modèle et première évaluation ». Grenoble, Institut national polytechnique de Grenoble, 159 p.
- Berthier E., Andrieu H., Fasquel M. et Creutin J.-D. 2001. « Formation des débits dans les réseaux urbains d'évacuation des eaux pluviales : Le rôle du sol ». *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*. n° 231, p. 14.
- Beyerlein, D. C. 2010. « Why Single-Event Modeling Doesn't Work for LIDs ». In, sous la dir. de Struck, Scott, et Keith H. Lichten, 41099. Vol. 367, p. 44-44. San Francisco, California: ASCE. <<http://link.aip.org/link/?ASC/367/44/1>>.
- Bolduc, S. 2008. « Des réseaux d'égouts vulnérables aux changements climatiques ». *Capsules INRS Sciences*. n° 5.
- Boucher, I. 2007. *Une pratique d'urbanisme durable : la gestion écologique des eaux de pluie*. Coll. « Document de veille ». Ministère des Affaires Municipales et Régions.
- Boucher, I. 2010. *La gestion durable des eaux de pluie, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable*. Coll. « Planification territoriale et développement durable ». 118 p.
- Boulay, J., P.-J. Cejka et R. Levesque. 1999. *La réforme de la gestion de l'eau à la Communauté urbaine de Montréal "Une oeuvre en cours"*. 80 p.
- Brière, F. G. 2006. *Distribution et collecte des eaux*. Montréal: Presses internationales Polytechnique.
- Butler, D., et J. W. Davies. 2000. *Urban drainage*, Routledge. New York: E & FN Spon, 489 p.

- Carter, T. L., et T. C. Rasmussen. 2006. « Hydrologic behavior vegetated roofs ». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 42, n° 5, p. 1261-1274.
- Center, Low Impact Development. 2007. *Urban Design Tool : Low Impact Development*. En ligne. <<http://www.lid-stormwater.net/>>. Consulté le 19 novembre 2010.
- Council, U.S. Green Building. 2009. *LEED for Neighborhood Development Rating System*. Washington: U.S. Green Building Council.
- Damodaram, C., M. H. Giacomoni, C. Prakash K., H. Holmes, A. Ryan, W. Saour et E. M. Zechman. 2010. « Simulation of Combined Best Management Practices and Low Impact Development for Sustainable Stormwater Management1 ». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 46, n° 5, p. 907-918.
- De Cuyper, K. 2007. « Eau de pluie de toitures végétalisées : qualité, rétention et effet retard ». In *Colloque toitures végétalisées* (Paris, 5 décembre 2007), sous la dir. de Construction, Centre Scientifique et Technique de la, CSTC Belgique.
- De Cuyper, K., K. Dinne et L. Van De Vel. 2006. « Toitures vertes : évacuation des eaux pluviales ». *Les dossiers du CSTC*. Vol. Cahier n°2.
- Deschamps, G. 2010. *Communication personnelle*. Montréal.
- Deschamps, G., G. Breton et R. Mallet. 2009. *Qualité de l'eau à Montréal : Rapport annuel 2009*. 8 p.
- Elliott, A. H., et S. A. Trowsdale. 2007. « A review of models for low impact urban stormwater drainage ». *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, n° 3, p. 394-405.
- Fuamba, M., T. Walliser, M. Daynou, J. Rousselle et G. Rivard. 2010. « Vers une gestion durable et intégrée des eaux pluviales : Une étude de cas pour le Québec ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 37, n° 2, p. 224-235.
- Garant, D. 2009. « La problématique des surverses dans l'agglomération montréalaise : les aménagements alternatifs et complémentaires aux bassins de rétention ». Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 81 p.
- Geiger, J.R. 2003. « Is all your rain going down the drain? ». *Davis, CA: Center for Urban Forest Research, Pacific Southwest Research Station, USDA Forest Service*, vol. Research Summary, p. 4p.

- Getter, K. L., D. B. Rowe et J. A. Andresen. 2007. « Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention ». *Ecological Engineering*, vol. 31, n° 4, p. 225-231.
- Gironás, J., L. A. Roesner et J. Davis. 2009. *Storm Water Management Model : Applications manuel*. Cincinnati: US EPA.
- Glorieux, M. 2010. « Gestion de l'eau de pluie en milieu urbain : Intégration des arbres dans les systèmes de biorétention ». Mémoire de maîtrise en génie, Montréal, École de technologie supérieure, 114 p.
- Hilten, R. N., T. M. Lawrence et E. W. Tollner. 2008. « Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D ». *Journal of Hydrology*, vol. 358, n° 3-4, p. 288-293.
- Huber, W. C., L. Cannon et M. Stouder. 2006. *BMP modeling concepts and simulation*. Cincinnati: U.S. EPA.
- Kuch, A. 2010. *Continuous Simulation*. En ligne. Coll. « XP Recorded Webinar ». XP Software. Webinar, 54 min.
- Laurin, Michel, et Joao Moreira. 2009. *Évaluation de performance des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux pour l'année 2008*. Coll. « Ouvrages de surverse et stations d'épuration ». Québec: MAMROT.
- Lehner, P. H., G. P. Aponte Clarke, D. M. Cameron et A. G. Frank. 1999. *Stormwater Strategies : Community responses to runoff pollution*. Natural Resources Defense Council.
- Mailhot, A., G. Rivard, S. Duchesne et J. Villeneuve. 2007. *Impacts et adaptations aux changements climatiques en matière de drainage urbain au Québec*. Rapport N° R-874. Québec: INRS-Eau, Terre et Environnement, 144 p.
- Manwaring, C. 2010. *Low Impact Development Modeling*. En ligne. Coll. « XP Recorded Webinar ». XP Software. Webinar, 59 min.
- Morena, F. 2004. « Modélisation hydrologique distribuée en milieu urbanisée ». Thèse de doctorat Grenoble, Institut national polytechnique de Grenoble.
- Nix, Stephan J. 1994. *Urban stormwater modeling and simulation*. Boca Raton, Flor.: Boca Raton, Flor. : Lewis.
- Podolsky, L., et H. MacDonald. 2008. *Green cities, great lakes : Using green infrastructure to reduce combined sewer overflows*

- Rivard, G. 1998. *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain : concepts et applications*. Sainte-Dorothée, Laval: Sainte-Dorothée, Laval : Alias Communication Design.
- Roehr, D., et Y. Kong. 2010. « Stormwater Runoff Reduction Achieved by Green Roofs: Comparing SWMM Method to TR-55 Method ». In, sous la dir. de Struck, Scott, et Keith H. Lichten, 41099. Vol. 367, p. 88-88. San Francisco, California: ASCE.
- Rossman, L. A. 2009. *Stormwater Management Model User's Manual Version 5.0*. Cincinnati: US EPA.
- Scatena, F. N. 1990. « Watershed scale rainfall interception on two forested watersheds in the Luquillo Mountains of Puerto Rico ». *Journal of Hydrology*, vol. 113, n° 1-4, p. 89-102.
- Schellekens, J., F. N. Scatena, L. A. Bruijnzeel et A. J. Wickel. 1999. « Modelling rainfall interception by a lowland tropical rain forest in northeastern Puerto Rico ». *Journal of Hydrology*, vol. 225, n° 3-4, p. 168-184.
- Scholz-Barth, K. 2001. « Green on top ». *Urban Land*, (Juin), p. 82-97.
- Service, USDA Forest. 2010. *I-Tree - Tools for Assessing and Managing Community Forests*. <<http://www.itreetools.org/>>. Consulté le 22 novembre 2010.
- Services, Bureau of Environmental. 2008. *Typical stormwater details G3*. Coll. « Portland Stormwater Management Manual ». Portland.
- Shaver, E., R. Horner, J. Skupien, C. May et G. Ridley. 2007. *Fundamentals of urban runoff management : Technical and institutional issues*.
- Shepherd, J. M. 2006. « Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regimes ». *Journal of Arid Environments*, vol. 67, n° 4, p. 607-628.
- Stephens, K. A., P. Graham et D. Reid. 2002. *Stormwater planning : a guidebook for british columbia*. Vancouver: Ministry of Water, Land and Air Protection.
- Telliez, M. 2010. *EPA SWMM 5 : Manuel d'initiation*.
- Underground, Weather. 2011. *Weather Underground*. En ligne. <<http://www.wunderground.com/>>.
- USDA. 1986. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. Coll. « Technical Release 55 ». USDA.

- Van Dijk, A. I. J. M., et L. A. Bruijnzeel. 2001. « Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 1. Model description ». *Journal of Hydrology*, vol. 247, n° 3-4, p. 230-238.
- Vanderstraeten, P., L. Bellefontaine, V. Bottieau, F. Léonard et C. Meuris. 2011. *Ecoquartiers*. Coll. « Notes de Recherche ». Conférence Permanente du Développement Territorial Région Wallonne.
- Vaze, J., et F. H. S. Chiew. 2003. « Comparative evaluation of urban storm water quality models ». *Water resources research*. Vol. 39, n° 10.
- Walesh, Stuart G. 1989. *Urban surface water management*. New York, N.Y.: New York, N.Y. : J. Wiley and Sons.
- Wang, J., T. A. Endreny et D. J. Nowak. 2008. « Mechanistic Simulation of Tree Effects in an Urban Water Balance Model ». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, vol. 44, n° 1, p. 75-85.
- Wanielista, M. P. 1993. *Stormwater management*. New York, N.Y.: J. Wiley and Sons.
- Wood-Ballard, B., R. Kellagher, P. Martin, C. Jefferies, R. Bray et P. Shaffer. 2007. *The SUDS manual*. London: CIRIA.
- Xiao, Q., et E. G. McPherson. 2002. « Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest ». *Urban Ecosystems*, vol. 6, n° 4, p. 291-302.
- Xiao, Q., E. G. McPherson, S. L. Ustin, M. E. Grismer et J. R. Simpson. 2000. « Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California ». *Hydrological Processes*, vol. 14, n° 4, p. 763-784.