

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	6
1.1 L'équilibre hydrologique	6
1.2 L'urbanisation et la gestion de l'eau de pluie	8
1.3 La biorétention.....	13
1.3.1 Le cycle hydrologique.....	17
1.3.2 La filtration des polluants	19
1.3.3 Les végétaux	20
1.4 Les arbres en milieu urbain.....	22
1.4.1 L'évapotranspiration.....	23
1.4.2 L'interception.....	25
1.4.3 La teneur en eau du sol	28
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	32
2.1 Description des projets.....	32
2.2 Les cellules de biorétention	33
2.2.1 Calculs de la superficie des cellules.....	34
2.2.2 Composition des cellules	35
2.2.3 Choix des végétaux	38
2.3 Modélisation avec RECARGA.....	39
2.3.1 Base de données.....	41
2.3.2 Entrée de données – les simulations	44
2.4 Évaluation d'interception.....	45
CHAPITRE 3 RÉSULTATS.....	48
3.1 Équilibre hydrologique et saturation du milieu de croissance	48
3.1.1 Stationnement	48
3.1.2 Commerces	51
3.2 Variation de l'eau dans les cellules.....	53
3.2.1 Ratio des superficies des cellules.....	56
3.2.2 Sensibilité du modèle – du système.....	59
3.2.3 Résultats observés au site du stationnement	65
3.3 Interception des arbres	67
3.3.1 Superficie de feuillage	67
3.3.2 Accumulation sur le feuillage	69
3.3.3 Taux d'interception.....	69
3.4 Volume d'eau intercepté.....	70
CHAPITRE 4 DISCUSSION.....	72
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	78

ANNEXE I	FIGURES COMPLÉMENTAIRES.....	83
ANNEXE II	LE STATIONNEMENT DE MONT-SAINT-HILAIRE	87
ANNEXE III	LE QUARTIER DIX30	94
ANNEXE IV	LISTE DES MATÉRIAUX DES CELLULES.....	97
ANNEXE V	RÉSULTATS RECARGA.....	99
	LISTE DE RÉFÉRENCES	107

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 3.1 Stationnement - Bilan hydrique des cellules avril à octobre 2006 (Volumes en m ³).....	49
Tableau 3.2 Stationnement - Bilan hydrique des cellules avril à octobre 2008 (Volumes en m ³).....	50
Tableau 3.3 Stationnement – Quantité d'évènements de saturation, flétrissement, d'accumulation d'eau et de débordements, avril à octobre 2006 et 2008	50
Tableau 3.4 Commerces - Bilan hydrique des cellules, avril à octobre 2006 (Volumes en m ³).....	51
Tableau 3.5 Commerces - Bilan hydrique des cellules pour les deux taux d'infiltration, avril à octobre 2008 (Volumes en m ³)	52
Tableau 3.6 Commerces - Quantité d'évènements de saturation, flétrissement, d'accumulation d'eau et de débordements dans les cellules, avril à octobre 2006.....	53
Tableau 3.7 Commerces - Quantité d'évènements de saturation, flétrissement, d'accumulation d'eau et de débordements dans les cellules, avril à octobre 2008	53
Tableau 3.8 Stationnement – Nombre d'heures en temps total (TTotal) et en temps maximal (TMax) dans la zone racinaire (ZR), d'accumulation et de débordement, avril à octobre 2006 et 2008	56

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Le cycle de l'eau.7
Figure 1.2	La modification du cycle hydrologique résultant de l'urbanisation.....9
Figure 1.3	Exemples des impacts de l'urbanisation sur les milieux naturels.10
Figure 1.4	Coupe type d'une cellule de biorétention.14
Figure 1.5	Relation entre la variation de l'épaisseur des différentes zones et la hauteur d'eau qui est conservée sur le site.16
Figure 1.6	Diagramme schématique de Höfler. La relation du potentiel hydrique total (ψ), le potentiel de turgescence (ψ_p) et le potentiel osmotique (ψ_π) avec la quantité relative d'eau d'une plante.24
Figure 1.7	Le cycle de l'eau en relation avec l'arbre.25
Figure 1.8	Relation entre la texture du sol et les caractéristiques d'humidité disponible.29
Figure 2.1	Concepts de construction des cellules de biorétention pour le stationnement (gauche) et les commerces (droite).36
Figure 2.2	Représentation du bilan hydrique de RECARGA.....43
Figure 3.1	Variation en fonction du ratio de superficie de la cellule et de la surface de traitement pour la conductivité hydraulique 5,7 mm/hr (a, b et c) et pour la conductivité hydraulique 0,5 mm/hr (d, et et f) Avril à octobre 2006.57
Figure 3.2	Variation en fonction du ratio de superficie de la cellule et de la surface de traitement pour la conductivité hydraulique 5,7 mm/hr (a, b et c) et pour la conductivité hydraulique 0,5 mm/hr (d, et et f) Avril à octobre 2008.58
Figure 3.3	1Cellule A (Stationnement) – Variation de la quantité d'évènements de saturation et flétrissement dans la zone racinaire, d'accumulation d'eau en surface selon la modification des paramètres de conception, pour les années 2006 (a) et 2008 (b).60
Figure 3.4	Cellule A (Stationnement) – Variation du temps maximal en heures de saturation et flétrissement dans la zone racinaire, d'accumulation d'eau en surface selon la modification des paramètres de conception, pour les années 2006 (a) et 2008 (b).61

Figure 3.5	Cellule A (Stationnement) – Variation de la teneur en eau de la zone racinaire (RZ) pour les deux taux de conductivité hydraulique pour l'année 2008.	63
Figure 3.6	Photos d'un <i>Celtis occidentalis</i> situé à l'extérieur des cellules de biorétention au site du stationnement, mai (a) et août (b) 2010.	66
Figure 3.7	Photos d'un <i>Celtis occidentalis</i> situé à l'intérieur des cellules de biorétention au site du stationnement, mai (a) et août (b) 2010.	66
Figure 3.8	Évolution de la superficie des arbres en fonction du pourcentage de la dimension des espèces selon les valeurs théoriques.	68
Figure 3.9	Taux d'interception pour le <i>Quercus</i> et l' <i>Acer</i> pour la période	69
Figure 3.10	Estimation du volume d'eau intercepté (m ³) par unité de <i>Quercus</i> et d' <i>Acer</i> pour les saisons 2006 et 2008, à 50% de leur de croissance potentielle.	71

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BDI	Biomass density Index
BMP	Best Management Practices
BRF	Bois raméal fragmenté
DFI	Développement à faible impact
FC	Capacité du sol
GDEP	Gestion durable de l'eau de pluie
IDF	Intensité Durée Fréquence
LAI	Leaf Area Index
LEED	Leadership in energy efficiency and design
LID	Low impact development
MAMROT	Ministère des Affaires Municipales, Régions et Occupations du territoire
MDDEP	Ministère du Développement durable et des Parcs
PGO	Pratique de gestion optimale
SCS	Soil Classification System
SSI	Sustainable sites initiative

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE BASE

m	mètre (unité de longueur)
cm	centimètre (unité de longueur)
mm	millimètre (unité de longueur)
kg	kilogramme (unité de masse)
s	seconde (unité de temps)
hr	heure (unité de temps)
°F	kelvin (unité de température)
°C	fahrenheit (unité de température)

Aire

m² mètre carré

Volume

m³ mètre cube

L litre (= 1 dm³)

DONNÉES CLIMATOLOGIQUES ET HYDROLOGIQUES

e _a	pression de vapeur (pouces de mercure à T _a)
E _{max}	donnée d'évapotranspiration (relevée sur station météorologique)
E _p	évaporation en bac (pouces)
e _s	pression de vapeur (pouces de mercure à T _d)
Et	évapotranspiration
E	évaporation
I	infiltration (mm)
lg	langley
P	précipitation (mm)
R	radiation solaire (langleys/jour)
T _a	température de l'air (°F)
T _d	température au point de rosée (°F)
U _p	mouvement du vent (miles/jour)
θ	Capacité d'eau en condition actuelle
θ _{fc}	Capacité d'eau maximale du sol
θ _{pwp}	Capacité d'eau au point de flétrissement

INTRODUCTION

Depuis le milieu du siècle dernier, la gestion des eaux de pluie en milieu urbain consiste en une évacuation rapide de l'eau en surface avec comme objectifs d'éviter des inondations et de ne pas incommoder le piéton ou l'automobiliste. Les eaux de ruissellement sont dirigées vers les égouts combinés ou pluviaux, pour aboutir dans les cours d'eau. L'accroissement de l'urbanisation entraîne une augmentation des surfaces imperméables et une réduction de l'infiltration de surface et en profondeur pour recharger de la nappe phréatique. L'imperméabilisation des centres urbains résulte en une augmentation des volumes et débits d'eau qui se déverse dans les cours d'eau, une détérioration des milieux récepteurs par les polluants qui y sont acheminés, une augmentation de l'eau à traiter dans les stations d'épuration lorsque les eaux sont en système combinés (Boucher, 2010; Minnesota Stormwater Steering Committee 2006; Québec, 2002). Des méthodes alternatives pour la gestion des eaux de pluie ont fait leur apparition afin de réduire et contrôler à la fois les volumes et les débits d'eau de ruissellement, ainsi que les polluants ainsi transportés. Le concept général est de diriger les eaux de pluie vers les surfaces végétalisées en premier pour ensuite les rediriger vers les systèmes plus traditionnels. Ces pratiques de gestion optimales permettent des interventions à plusieurs échelles pour augmenter l'infiltration sur place et limiter l'eau qui se retrouve dans le système pluvial. Elles peuvent se retrouver sur les terrains privés comme méthode de contrôle à la source, ou dans le domaine public comme méthode de contrôle à la source sur les terrains publics, de contrôle en réseau aux abords du système routier et de contrôle en aval avec les marais et les bassins de rétention (Boucher, 2010).

Différentes pratiques peuvent être utilisées comme méthode de contrôle à la source. L'objectif de ces pratiques est de retenir les volumes d'eau et maximiser l'infiltration pour décharger le système pluvial en place. La cellule de biorétention est un espace en baissière de surfaces imperméables pour retenir, infiltrer et filtrer les eaux de ruissellement. Utilisée entre autres dans l'ouest du Canada, aux États-Unis, en Australie et dans plusieurs pays européens pour gérer l'eau de pluie, la biorétention englobe différents types d'aménagements pouvant accommoder le contrôle de quantité (en volume et débit), mais aussi la qualité de l'eau qui

sera retournée dans le milieu naturel à court ou à long terme. Ces espaces peuvent être confondus pour des aménagements urbains typiques dans les stationnements, dans les îlots de virages et entre les rues et les trottoirs. Des images illustrant les différents types d'aménagements où le jardin de pluie a été intégré dans la trame urbaine se retrouve à l'annexe I. On y retrouve des arbres, arbustes et plantes vivaces qui, en plus d'agrémenter les ouvrages, créent des zones d'infiltration de l'eau à l'année longue par leur système racinaire. Les racines sont aussi le support pour les bactéries nécessaires à la filtration des polluants qui sont transférés dans les cellules dans les eaux de ruissellement (Davis, 2008), et ce été comme hiver. En effet, les racines peuvent être encore actives même l'hiver pour l'adsorption des polluants (Muthanna *et al.*, 2007a).

L'arbre est une des plantes utilisées en aménagement urbain (Macon *et al.*, 2004) qui, avec son volume important à maturité joue aussi un rôle dans la gestion des eaux de pluie. La partie aérienne de l'arbre est composé du tronc, des branches et du feuillage et intercepte une partie de l'eau de pluie. Depuis les recherches de Horton (1919) sur l'interception de la pluie par les arbres feuillus, différents modèles ont été étudiés pour tenter d'évaluer les phénomènes d'interception (Muzylo *et al.*, 2009) et d'évapotranspiration en milieu forestier (Pion, 2005) et en milieu urbain (Grimmond et Oke, 1999; Hagishima, Narita et Tanimoto, 2007). La partie de l'arbre qui est dans le sol, le système racinaire, joue aussi un rôle en limitant le ruissellement de l'eau de pluie avec les racines plus en surface et augmentant l'infiltration dans le sol par les canaux ainsi créés.

Trois des besoins essentiels d'une plante pour survivre sont l'eau, la lumière et le sol : la lumière et l'eau pour la photosynthèse, et le sol pour trouver les éléments nutritifs pour se développer. Différentes plantes ont différents besoins par rapport à la texture du sol et de l'humidité. La quantité d'eau qui est accessible à une plante lui permet d'effectuer la photosynthèse pour produire le glucose nécessaire pour se développer. Le taux de photosynthèse est influencé entre autres par la température, l'intensité de la radiation solaire et l'habileté des plantes à tolérer la fluctuation de l'approvisionnement en eau. Lorsque les précipitations se font plus rares, l'humidité du sol diminue et peut atteindre un niveau de

sécheresse important. À ce moment les stomates des feuilles se ferment, il y a arrêt de l'absorption de CO₂ et le processus de photosynthèse est suspendu. Le développement de la plante est donc compromis (Jensen, Jensen et Rosbjerg, 1991; Ricklefs, 1999).

Les méthodes de calculs existantes pour la conception des cellules de biorétention se basent sur des superficies de surface, la texture de sol en place et utilisé dans la cellule, les épaisseurs de terre et les hauteurs d'accumulation en surface pour évaluer la superficie de ces dernières. Il n'y a pas plus de détail pour évaluer la survie des plantes dans la conception des cellules outre la question d'inondation ponctuelle des plantes avec recommandation d'un maximum de 48 à 72 heures consécutives d'inondation (Muthanna, Viklander et Thorolfsson, 2007). Les listes de plantation recommandées pour ce genre d'aménagement qui existent se basent sur des temps d'inondation, la texture du substrat de plantation et la zone de rusticité pour faire un choix de plantation. Il y a peu de recherche de l'intégration des végétaux dans ces types d'aménagement dans la littérature, surtout dans un contexte québécois.

Le substrat de plantation utilisé dans les cellules de biorétention doit drainer assez rapidement pour éviter l'inondation sur une trop longue période. Il faut donc équilibrer les besoins de l'infrastructure pluviale et des plantes qui s'y retrouve. La cellule doit pouvoir remplir le rôle de contrôle de volume d'eau et la quantité d'eau disponible pour le développement des plantes. Un substrat avec une conductivité hydraulique élevée permet une infiltration plus rapide, mais conserve moins d'eau et peut générer des moments plus secs pour les plantes. Cette diminution d'accès en eau pour la plante entraîne une diminution de l'activité de photosynthèse. Cela peut augmenter les coûts d'entretien s'il faut arroser les plantes régulièrement et sans les cas extrêmes les coûts de remplacement des plantations. Un substrat de conductivité hydraulique peu élevé augmente les volumes d'eau retenus dans le sol, mais peut placer les racines des plantes dans des situations anaérobiques qui provoquent des problèmes de survie pour la matière végétale et bactérienne, cette dernière étant importante pour la filtration des polluants organiques. De plus, la présence des arbres diminue à long terme la quantité d'eau qui peut tomber sur le site et dans les cellules par l'interception, augmentant les possibilités de temps sec et donc ayant un impact possible sur

les possibilités de leur survie ou celle des plantes avoisinantes. La recommandation de taux d'infiltration pour le substrat de plantation varie entre 2,5 cm/hr et 15 cm/hr (Muthanna, Viklander et Thorolfsson, 2007). Toutefois la survie des arbres, arbustes et vivaces qui sont intégrés dans ces aménagements dépend de la teneur en eau dans le sol durant les périodes de croissance pour assurer leur développement (Harris, 2002) afin de jouer leur rôle de canaux d'infiltration pour l'eau de ruissellement et de sources de bactéries pour décomposer les polluants.

Plusieurs critères de conception sont discutés dans la littérature, mais à part la conductivité hydraulique, il n'y en a pas d'autres clairement identifiés comme ayant un impact sur le milieu de développement de la plante. En prenant un espace de stationnement comme aménagement typique urbain où on retrouve des arbres et où les volumes d'eau de ruissellement sont importants par la nature imperméable de la surface, la présente recherche vise à étudier le comportement hydrologique théorique des cellules de biorétention et des arbres qui y sont planifiés. Dans un premier temps, il s'agira d'étudier la teneur en eau dans le sol de deux projets types et ainsi évaluer la survie des plantes. Dans un deuxième temps, c'est de calculer l'interception des arbres utilisés dans les cellules des deux projets et d'évaluer l'impact de la réduction du volume d'eau qui sera accessible aux plantes. Une estimation du volume d'eau pouvant être intercepté par les arbres sera intégrée aux résultats afin d'évaluer l'impact que cela peut avoir sur le système.

Une analyse de la teneur en eau dans les différentes zones de la cellule pourra donner des pistes pour les chances de survie des plantes est estimé à l'aide du logiciel RECARGA. C'est un des seuls logiciels qui peut évaluer l'impact au niveau hydrologique des cellules de biorétention à court et à long terme (Davis, 2008; Muthanna, Viklander et Thorolfsson, 2007). Les valeurs d'évapotranspiration, d'infiltration et de débordements sont calculées par rapport à la teneur en eau dans le sol sans inclure l'interception des végétaux. De nouveaux modèles sont en devenir pour évaluer l'interception des arbres dans ce genre d'aménagement (Wang, Endreny et Nowak, 2008), mais il n'y a pas encore d'outil pouvant évaluer tous les aspects de cette pratique.

La venue anticipée d'un guide de gestion de l'eau de pluie du Ministère du Développement durable et des parcs va obliger toutes les municipalités à intégrer les différentes pratiques dans leur planification de drainage urbain. Toutefois, les données locales manquent pour guider les décideurs et donneurs d'ouvrages des projets de gestion de l'eau pluie. La biorétention est une pratique encore peu connue, mais qui touche plusieurs groupes d'intérêts à la fois scientifiques et professionnels. Une meilleure compréhension de tous les éléments du système permet une meilleure planification et un contrôle plus précis de la réalisation. Peu de projets pilotes existent à date, et un suivi de ceux-ci ainsi que des prochains à venir pourra guider les professionnels et les décideurs selon leurs objectifs d'aménagement. Le choix de substrat de plantation drainant et des plantes seront encore plus dépendants l'un de l'autre que dans les plates-bandes traditionnelles, ainsi que les pratiques d'entretien nécessaires pour éviter un taux de remplacement trop élevé. Au niveau végétal, les bases de données locales dans la province et au pays sont quasi inexistantes pour ce genre d'application, ainsi que pour les données de dimensions des végétaux (biomasse, hauteur et largeur de couronne) en milieu urbain et selon les stades de développement des plantes. Ces données sont nécessaires pour évaluer l'interception de l'eau de pluie. Il faut extrapoler à partir des bases de données américaines ou de milieu forestier. Les résultats obtenus pourront orienter les futures recherches pour approfondir la question et développer les connaissances scientifiques locales.

Après une revue des notions d'équilibre hydrologique, de l'urbanisation et la gestion des l'eau de pluie, des cellules de biorétention ainsi que de l'arbre en milieu urbain, deux projets sont présentés pour évaluer la variabilité des résultats selon le type de substrat de plantation et les végétaux utilisés. Finalement, une discussion des résultats obtenus, ainsi que des limites observées pourra orienter les recherches futures dans le milieu. Cette approche émergente au Canada a encore à faire ses preuves pour démontrer son importance et sa valeur pour minimiser les impacts sur l'environnement par la réduction du volume de traitement de l'eau dans les stations d'épuration et les milieux récepteurs. Pouvant s'intégrer dans la trame urbaine actuelle, elle peut être une solution intéressante tant pour les nouveaux projets que pour les réseaux existants.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Dans une approche intégrée de la gestion des eaux pluviales, il est important de comprendre chaque composante du système qu'est la biorétention. Après un retour sur le cycle de l'eau et l'équilibre hydrologique, les effets de l'urbanisation sur ce cycle seront présentés brièvement ainsi que les pratiques de gestion optimale pouvant être utilisées pour viser un nouvel équilibre. Une présentation du principe de biorétention, aussi connu comme jardin de pluie décortiquera ses composantes, son fonctionnement et son rôle comme infrastructures de contrôle à la source. L'élément végétal de la biorétention est isolé par l'étude de l'arbre, avec ses besoins en eau et en sol pour lui permettre de remplir sa fonction dans le milieu créé.

1.1 L'équilibre hydrologique

Le cycle hydrologique peut se décrire par la pluie qui tombe au sol et qui est soit interceptée par différents éléments de la végétation présente, soit continue vers le sol pour être infiltrée (en surface ou en profondeur) ou ruisselle vers les cours d'eau. À partir des surfaces végétales ou les plans d'eau, l'eau s'évapore pour retourner dans l'atmosphère et recommencer le cycle à nouveau. Le cycle naturel de l'eau sous-entend un équilibre entre les différents processus pour recharger la nappe phréatique et subvenir aux besoins des plantes et des animaux. Le cycle se décompose selon les grandes étapes suivantes (voir figure 1.1) : la précipitation (P), le ruissellement (R), l'infiltration en surface et en profondeur (F), l'évaporation de surface (E), l'interception par les végétaux ou les éléments construits (I) et l'évapotranspiration par les végétaux (E_T) (Anctil, Rouselle et Lauzon, 2005).

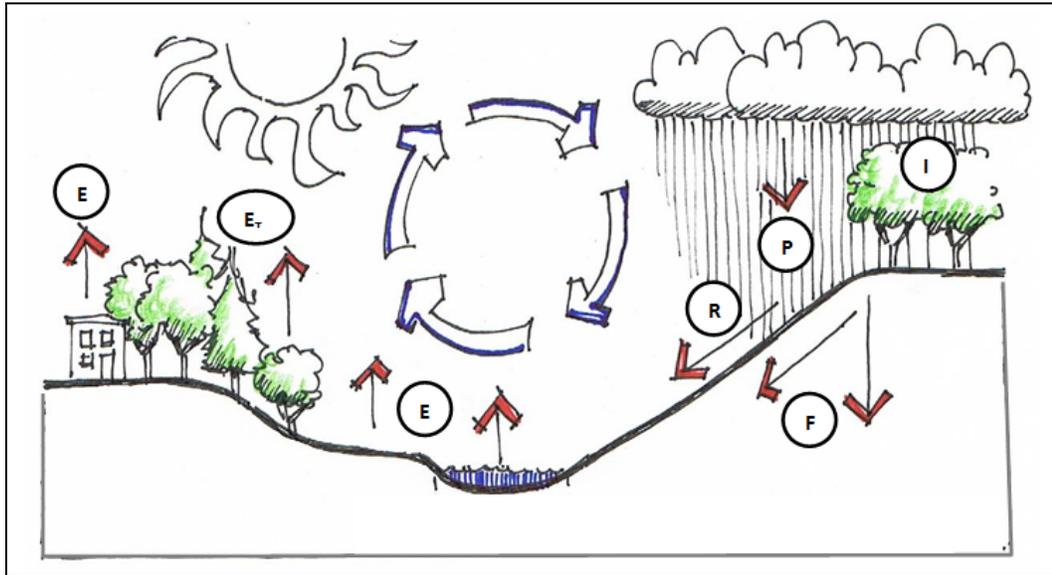


Figure 1.1 Le cycle de l'eau.

À la base, le bilan hydrique du cycle peut s'exprimer selon l'équation 1.1 (Ancitil, Rouselle et Lauzon, 2005). Pour une période de temps donnée, V_E est le volume qui entre dans le système, V_S est le volume sortant et ΔV est la variation dans le système, ou l'emmagasinement, qui peut être positif ou négatif.

$$\Delta V = V_E - V_S \quad (1.1)$$

Les éléments entrant et sortant peuvent être identifiés selon la nature du système observé. Dans le contexte du cycle de l'eau, V_E peut être la pluie, les eaux de ruissellement ou même une entrée d'eau régularisée par l'homme avec un système d'irrigation. V_S peut aussi être du ruissellement de surface, l'interception, l'évaporation et la transpiration ainsi que l'infiltration. De la même façon, l'emmagasinement peut représenter différents éléments comme un volume d'eau pour une rivière, un système de drainage, l'accumulation en surface et l'infiltration dans le sol. (Akan et Houghtalen, 2003; Ancitil, Rouselle et Lauzon, 2005). Pour maintenir l'équilibre hydrologique et minimiser l'impact sur le milieu naturel, ΔV doit essentiellement être nul. Ceci veut dire :

$$V_E = V_S \quad (1.2)$$

Dans un contexte de gestion des eaux de pluie, et en se référant à la figure 1.1, V_S représente l'entrée d'eau dans le système avec les précipitations (P) et le ruissellement (R). V_E représente l'infiltration (I), l'évaporation des différentes surfaces des plans d'eau et les surfaces construites (E), l'interception par des éléments construits et par les végétaux (I) et l'évapotranspiration (E_T). L'équation précédente peut se revoir comme suit :

$$P + R = F + E + I + E_T \quad (1.3)$$

Tous les éléments de droite de l'équation sont les différentes composantes du processus d'évapotranspiration totale (Jensen, Jensen et Rosbjerg, 1991) et peuvent être étudiés individuellement.

1.2 L'urbanisation et la gestion de l'eau de pluie

En 1977, les États-Unis ont instauré le **CLEAN WATER ACT** (États-Unis, 1977) visant entre autres à restaurer et maintenir l'intégrité chimique, physique et biologique de leur système d'eau naturelle. Ils protègent la qualité de leurs cours d'eau par un contrôle des quantités d'eau entrant dans le milieu naturel, afin d'assurer la qualité de celle-ci lors des constructions de tout genre.

Durant les années suivantes, l'urbanisation des villes et des banlieues a été identifiée comme étant responsable des modifications du cycle hydrologique et d'impacts majeurs sur les cours d'eau (Boucher, 2010; Mailhot *et al.*, 2007; Rivard, 2005; Schueler, 1987). Avec l'imperméabilisation des surfaces dans les grandes villes et les régions adjacentes, le développement urbain modifie l'équilibre hydrologique en augmentant le ruissellement de surface et réduisant l'infiltration et l'évapotranspiration (voir figure 1.2).

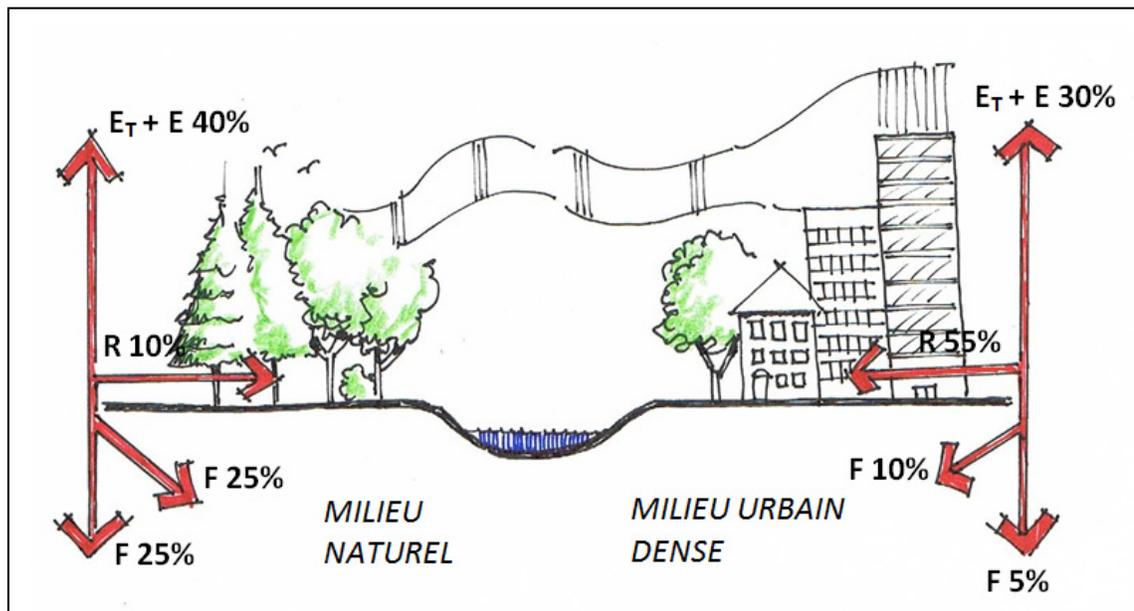


Figure 1.2 La modification du cycle hydrologique résultant de l'urbanisation.

Adaptée de Dunnett, 2007 (p.34)

Le rôle de la gestion de l'eau de pluie dans le contexte de l'urbanisation du dernier siècle était de contrôler les volumes d'eau pour éviter des problèmes d'inondation sur les surfaces publiques et dans les bâtiments. À la base il s'agissait d'évaluer les zones inondables des cours d'eau et le système de drainage urbain pour minimiser les impacts sur le cadre construit (Rivard, 2005). En utilisant le concept de drainage majeur (la surface des voies de circulation) et mineur (les infrastructures souterraines) cette approche représente un contrôle de débit des eaux de ruissellement et ne favorise pas l'infiltration, ou même le contrôle de la qualité de l'eau.

Les municipalités, au Québec et ailleurs, ont été conçues selon deux modèles de réseau d'infrastructure. Il y a le réseau combiné, où les eaux de pluie et les rejets domestiques sont acheminés dans les mêmes tuyaux sous la chaussée pour se rendre dans les stations de traitement avant d'être rejeté dans les cours d'eau. Lors des événements de pluie importants, le volume d'eau du système pluvial peut surcharger les usines de traitement et générer des déversements dans le milieu récepteur. De façon plus récente, l'utilisation de réseaux distincts sépare les eaux de pluie et les eaux usées. Les réseaux de pluie sont dirigés

directement dans le milieu récepteur le plus proche. Cette dégradation a surtout un impact important sur la qualité de vie de la faune et de la flore de ces milieux (Schueler, 1987). La figure 1.3 ci-dessous illustre le résultat de la surcharge sur le milieu naturel à partir des réseaux urbains. Les volumes et débits d'eau pouvant être déversés dans le milieu récepteur naturel par les conduites des systèmes urbains peuvent modifier la forme des cours d'eau, augmentant les plaines de débordement et entraînant une dégradation de l'eau par les sédiments transportés, ainsi que les nombreux polluants balayés sur les surfaces imperméables.



Figure 1.3 Exemples des impacts de l'urbanisation sur les milieux naturels.

L'imperméabilisation du sol dû à l'urbanisation crée une diminution de l'alimentation en eau des sols, une baisse du niveau des cours d'eau, un accroissement des concentrations des polluants dans les cours d'eau culminant dans une perte d'usage de l'eau tant par la faune que pour la santé humaine.

À partir de ces constatations est née l'approche de développement à faible impact avec une série de pratiques de gestion optimale pour gérer les eaux de pluie et minimiser les impacts de l'urbanisation sur le milieu naturel. Ce sont d'abord et avant tout des approches basées sur une vision d'ensemble de territoire, tout en contrôlant et minimisant l'impact des constructions sur le milieu récepteur, soit les cours d'eau. L'emphase est surtout sur une

intégration des projets pour reproduire ou conserver un équilibre naturel sur l'environnement, notamment par la gestion des eaux de pluie et de ruissellement (Mailhot *et al.*, 2008). Ces ouvrages sont à la fois des constructions traditionnelles de tuyauterie souterraine et des aménagements planifiés pour reproduire le cycle naturel de l'eau en optimisant l'infiltration, l'interception et l'évapotranspiration dans les processus visés.

En 2002, le MDDEP instaure la **POLITIQUE NATIONALE DE L'EAU** (Québec, 2002) qui vise à assurer la protection de cette ressource, de la gérer dans une perspective de développement durable et de mieux protéger la santé du public et des écosystèmes. Elle ne vise donc pas uniquement l'eau de pluie, mais bien la ressource dans sa globalité. Les pratiques de gestion optimale respectent au moins deux des différents engagements énoncés dans la Politique. Il y a l'énoncé numéro 41 traitant de la mise en place de stratégie d'encadrement des rejets urbains au Québec, et l'énoncé numéro 45 qui est celui d'utiliser des techniques de réhabilitation des réseaux par rapport au remplacement. Le coût important de ces infrastructures essentiellement souterraines peut ralentir le rythme des ajustements nécessaires. Plusieurs des différentes pratiques peuvent par contre s'intégrer aux réseaux existants utilisant le principe de chaîne de traitement qui sera plus efficace en cumulant la gestion des volumes et des débits d'eau et maximisant la retenue sur place à l'échelle du bassin versant et du lot individuel (Conseil National de Recherches du Canada et Fédération canadienne des municipalités, 2004; Marsalek et Schrieir, 2009). À partir du contrôle à la source sur les lots (privés et publics), il est possible d'ajouter des éléments de contrôle de volume et de débit d'eau de pluie pour réduire la surcharge des infrastructures souterraines existantes.

Pour la gestion à la source, la gestion de l'eau dans un espace végétalisé peut se faire avec les jardins de pluie (ou biorétention), les tranchées drainantes, les toits verts et les bandes filtrantes. Pour la gestion en réseau, on retrouve les noues et les fossés végétalisés, et pour la gestion en aval on retrouve les bassins de rétention (secs ou humides) et les marais filtrants (Boucher, 2010). Toutes ces stratégies ont pour objectifs de diminuer les surfaces imperméables, d'augmenter l'infiltration et de filtrer les polluants transportés par la pluie. À

cette série d'ouvrages végétalisés se greffent des solutions plus minérales et mécaniques. Les surfaces poreuses en pavés de béton, asphalte ou gravier peuvent réduire considérablement le volume de ruissellement. Les différents puisards avec filtres et contrôle de débit, ainsi que les ouvrages de rétention et d'infiltration sous terre s'ajoutent aux options d'ouvrages en surfaces gazonnées et avec de la plantation variée. De toutes les pratiques énoncées, la plus répandue est le bassin de rétention. Conçue pour recevoir temporairement les volumes d'eau qui transitent dans le réseau souterrain, c'est une réserve à ciel ouvert, avec ou sans réserve en permanence. Ils sont essentiellement de trop-plein au système mineur souterrain et sont conçus essentiellement pour déplacer le débit de pointe dans le cas d'évènements de pluie importants (Rivard, 2005).

Les méthodes de calculs des systèmes de drainage sont basées, entre autres, sur les courbes d'intensité, durée et fréquence (IDF) afin d'établir les dimensions des conduites et des volumes nécessaires pour accommoder des évènements de pluie particuliers. Ces courbes sont les références officielles produites par Environnement Canada pour les concepteurs des réseaux, et sont basées sur des moyennes de pluies observées sur des périodes particulières par région du Québec. En exemple, pour la région de Montréal Aéroport Trudeau, les courbes sont établies à partir des pluies réelles observées de 1943 à 1990. Toutefois, vingt ans plus tard, ces courbes ne reflètent plus la réalité actuelle des évènements de pluie. Le phénomène de changements climatiques observé a comme impact d'avoir plus d'évènements de grande intensité, moins d'évènements de petite intensité et un plus grand écart entre les évènements, quels qu'ils soient (Mailhot *et al.*, 2007). Ce changement de comportement veut dire que les systèmes plus anciens sont limités non seulement par leur état souvent dégradé, mais aussi parce qu'ils ne répondront plus à court ou moyen terme aux conditions pluviales. Outre la mise à jour des courbes IDF pour les planifications futures, et l'actualisation des réseaux existants, l'utilisation de pratiques de gestion optimale est préconisée dans une nouvelle approche intégratrice de conception des infrastructures de drainage pour le Québec (Boucher, 2010; Mailhot *et al.*, 2008).

En mars 2010, le Ministère des Affaires municipales, régions et occupations du territoire (MAMROT) élabore dans sa série de guides de bonnes pratiques **LA GESTION DURABLE DES EAUX DE PLUIE** (Boucher, 2010). Il préconise l'utilisation des mesures de gestion des eaux de pluie comme la biorétention avec des stratégies d'aménagement à l'échelle du bassin versant pour diminuer l'imperméabilisation et simuler une hydrographie pré-développement.

1.3 La biorétention

Des différentes pratiques connues à ce jour, la biorétention, aussi connue sous le nom de jardin de pluie, est encore peu utilisée au Canada. Réunissant les processus d'infiltration de l'eau et de la filtration de polluant, les études démontrent que cette pratique peut réduire de manière considérable les volumes dans le système traditionnel et les débits. Jumelant cette performance à une possibilité d'intégration dans la trame urbaine dans les espaces verts, c'est une pratique devenue populaire aux États-Unis et à travers le monde dans le contexte du Développement à faible impact (Davis, 2008; Davis *et al.*, 2009).

Le manuel le plus reconnu en la matière, le **PRINCE GEORGE'S COUNTY BIORETENTION MANUAL** (Département of Environmental Ressources, 2007), décrit la cellule de biorétention comme un système contrôlant la qualité et la quantité de l'eau qui y circule, tout en étant un milieu essentiellement sec. Le terme cellule est utilisé en référence à sa nature d'unité de traitement, de système construit dans laquelle les différents processus prennent place. En plus de réduire les volumes et les débits d'eau, la cellule utilise les propriétés chimiques, physiques et biologiques des plantes, des microorganismes et des substrats qui la constituent pour filtrer les polluants des eaux de ruissellement. Des différents processus que l'on y retrouve, on peut noter entre autres la sédimentation, la filtration, l'adsorption, la volatilisation, la décomposition, la phytoremédiation, la bioremédiation et finalement la rétention. La cellule de biorétention peut être conçue pour reproduire l'hydrologie pré-développement (Département of Environmental Ressources, 2007), point de référence pour les planifications du réseau pluvial.

La cellule de biorétention est un espace avec de la plantation arborescente, arbustive ou vivace, formé d'une couche de paillis et de terre arable sur une fondation drainante. Un drain perforé est placé au fond lorsque le sol en place est jugé instable et que l'infiltration du sol en place n'est pas possible (Département of Environmental Ressources, 2007). Le drain est aussi considéré comme nécessaire en climat froid pour assurer que le substrat soit déchargé d'eau pour l'hiver pour continuer l'infiltration. Le sol utilisé dans ces aménagements doit avoir une infiltration rapide tout en ayant une bonne teneur en matière organique pour permettre le développement des bactéries nécessaires à la transformation des polluants et des éléments nutritifs pouvant être ensuite assimilés par les plantes. Les micro-organismes retrouvés dans le sol participent à la dégradation des composantes chimiques présentes dans l'eau de ruissellement, ainsi qu'à la décomposition de la matière organique. La profondeur de la zone de rétention et de filtration varie selon le lieu et la quantité d'eau à traiter et selon la surface d'occupation de la cellule. La figure 1.4 illustre les différentes strates qui composent la cellule.

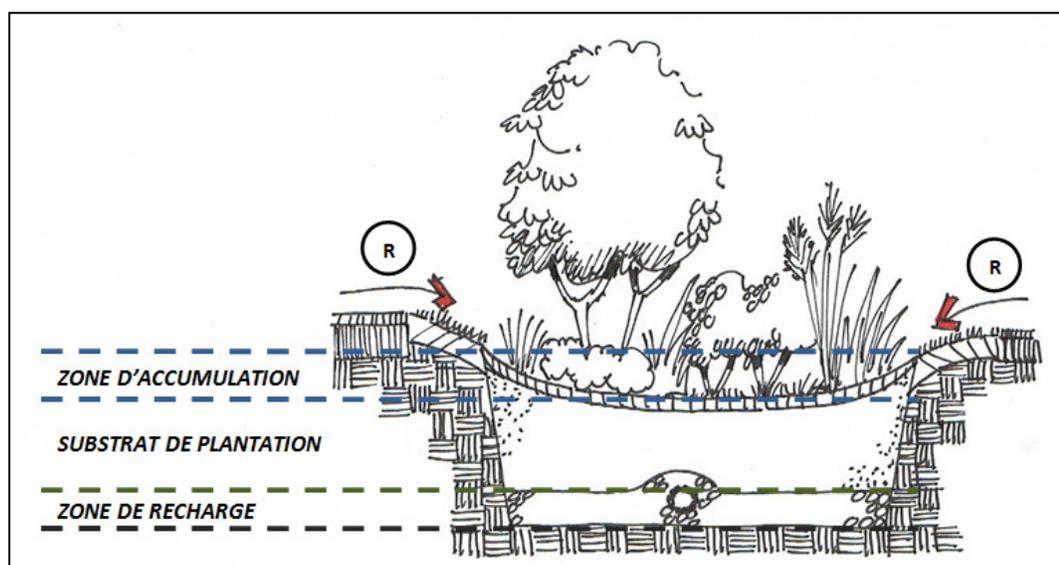


Figure 1.4 Coupe type d'une cellule de biorétention.
Adaptée du manuel DER, 2002 (p.22)

C'est essentiellement un aménagement qui intègre des plantes et qui se situe en contrebas de la source des eaux de ruissellement. Il se divise en trois sections : la zone d'accumulation, le substrat de plantation et la zone de recharge. La zone d'accumulation reçoit l'eau des surfaces environnantes et détermine la superficie finale de la cellule. Plus la hauteur d'accumulation de cette zone est faible, plus la superficie doit augmenter pour accueillir le volume d'eau souhaité. La hauteur typique d'accumulation est de 15 cm (Department of Environmental Ressources, 2007; Vermont Agency of Natural Resources, 2002), mais peut aller jusqu'à 45 cm (Atchison, 2006) . Ce critère de conception aura un impact sur le type de végétation devant s'adapter au niveau d'inondation maximale qui sera retenue.

Le substrat de plantation a aussi une hauteur variable selon les différents manuels disponibles et les recherches récentes. Le manuel du Maryland (2002 et 2007) donne une épaisseur de 45cm, Dietz et Clausen (2005 et 2006) recommandent 60 cm, Davis (2008) recommande entre 90 et 120 cm pour et finalement Li et Davis (2008) suggèrent 110 cm d'épaisseur. Une couche de paillis de bois se retrouve au-dessus du substrat de plantation, sur une hauteur recommandée variant de 5 à 10 cm.

La dernière zone, celle de recharge, est importante lorsque l'on veut prévoir une zone d'accumulation d'eau en sous-sol. Habituellement en gravier net, on y retrouve aussi le drain perforé préconisé pour une installation dans un sol en place avec une conductivité hydraulique faible comme dans les sols argileux. Le drain permet aussi d'éviter une accumulation d'eau dans le fond de la cellule, surtout au moment du gel, et continuer l'infiltration toute l'année. La recommandation générale est de porter une attention particulière à la distance avec la nappe phréatique et le fond de la cellule, soit un minimum de 1,0 m pour éviter des situations anaérobiques pour les plantes et les bactéries dans le sol, et maximiser la filtration des polluants à long terme.

L'eau circule donc à partir des surfaces environnantes vers la cellule de biorétention, s'accumule dans la zone supérieure lors d'évènements de pluie de forte intensité, s'infiltré à travers la cellule et se dirige vers la zone de recharge et le drain. La conductivité hydraulique

du substrat, de la zone de recharge et du sol en place va déterminer la quantité d'eau qui sera infiltrée et donc conservée en place. L'eau pourra aussi être absorbée par les plantes par évapotranspiration, ou évaporée à partir de la surface. Lors d'évènements très importants où la quantité et intensité d'eau qui s'achemine vers le système est au-delà de ses capacités, il y a débordement. Ce débordement peut se fait vers une surface gazonnée ou un autre type de bande filtrante avant d'aller rejoindre le cours d'eau le plus proche, pour un site qui le permet. Si non, l'intégration d'un trop-plein peut contrôler le débordement et l'acheminer vers le réseau pluvial souterrain. Cet élément consiste en une cheminée avec couvercle grillagée et un niveau de captation fixé pour conserver une hauteur maximale d'eau dans la cellule.

Outre la conductivité hydraulique, l'épaisseur des trois zones a un impact sur la quantité et hauteur d'eau retenue sur le site. La figure 1.5 illustre comment en augmentant une ou les trois zones il est possible d'augment le rendement hydrologique de la cellule.

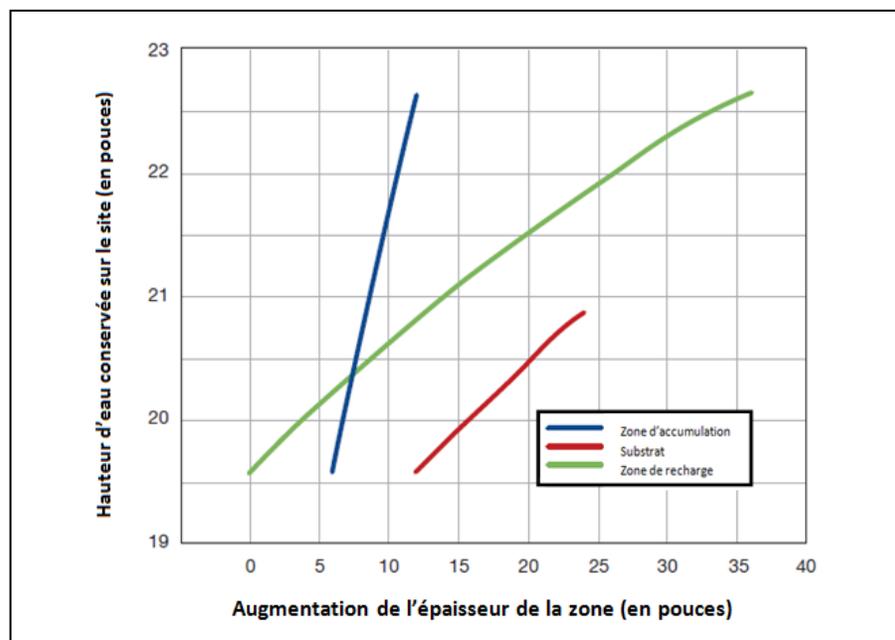


Figure 1.5 Relation entre la variation de l'épaisseur des différentes zones et la hauteur d'eau qui est conservée sur le site.
Adaptée de Atchison 2006 (p.10)

À noter que cette figure ne prend pas en considération la présence d'un drain de fond dans la conception de la cellule et que la possibilité d'ajouter les hauteurs d'eau n'est pas discutée. Les différentes composantes de la cellule seront vues en détail au chapitre suivant.

1.3.1 Le cycle hydrologique

Le cycle hydrologique de la cellule de biorétention reprend tous les processus présentés à l'équation 1.3. Si le volume de pluie et de ruissellement est plus important que ce qui peut être infiltré, évaporé de la surface ainsi qu'intercepté et évapotranspiré par la végétation, il y a débordement. Si inversement le volume d'eau entrant est inférieur, la survie de plantes est mise en péril. L'objectif d'intégrer une cellule dans un aménagement est de créer un équilibre pour éviter le débordement et prévoir un milieu de croissance pour les végétaux nécessaires pour, entre autre, la filtration des polluants. Une cellule de biorétention construite et observée dans le stationnement du collège Seneca en Ontario (Toronto and Region Conservation Authority, 2006) a démontré que pour une série de neuf événements de pluie variant de 9,8 à 34,4 mm, la cellule produisait peu de volume de débordement en comparaison avec les surfaces voisines. Ainsi, la cellule a retenu 57,4 % du volume de ruissellement, contre 26,2 % pour l'asphalte poreuse et 16,7 % pour l'asphalte traditionnelle non poreuse. Lors des petits événements, l'eau entrant dans le système est absorbée par le substrat et par la suite évaporée, ainsi qu'évapotranspirée par les plantes qui s'y retrouvent. Il n'y a pas de détails de conception pour la nature exacte du substrat de plantation ni l'épaisseur mis en place. À noter que la construction de la cellule incluait une membrane étanche ne permettant aucune infiltration en profondeur, mais il y avait un drain de fond pour récolter des eaux et analyser l'aspect de filtration de polluants. Les auteurs notent aussi un déplacement dans le temps du débit de pointe, et une réduction nette du débit à 4 % par rapport à la surface asphaltée traditionnelle.

Lors d'un suivi de deux cellules au Maryland (Davis, 2008), 9 des 49 événements de pluie observés sont entièrement retenus sur le site. De plus, Davis note un délai d'approximativement deux heures par rapport au débit de pointe d'un événement pluvial

(pour une journée avec 2 événements importants) à 7 heures d'intervalles, en plus d'une réduction considérable du débit en relation avec l'épaisseur du substrat (0,5 au lieu de 4,7 L/s, et 0,6 au lieu de 4,1 L/s). Il est possible de minimiser les impacts des surfaces imperméables, et d'obtenir une réduction importante pour plus du tiers des événements de pluie.

Les activités biologiques et d'évapotranspiration sont moins importantes durant les périodes plus froides, soit en automne et l'hiver, augmentant la quantité d'eau de débordement (Sharkey et Hunt III, 2005). Dans un climat hivernal incluant généralement un cycle variable de neige, gel au sol et pluie, une incertitude existe pour les systèmes de drainage basés sur l'infiltration. Dans une étude comparative réalisée au New Hampshire, six aménagements considérés comme étant des pratiques optimales non structurales (2 types de biorétention, un filtre à sable, un filtre d'arbre, un marais et une surface en asphalte poreuse) ont été suivis pendant deux ans et comparés à des pratiques structurales plus utilisées comme des fossés et bassins de rétentions. Les observations démontrent que le substrat filtrant utilisé dans les cellules de biorétention permet une infiltration des eaux de ruissellement durant la période hivernale, étant la seule pratique incluant de la végétation ne présentant pas de gel dans toute la hauteur de la cellule (Roseen *et al.*, 2006). La nature organique et la structure grossière et poreuse du substrat recommandé en biorétention expliquent le dégel rapide observé en surface avec les pluies hivernales continuant le processus d'infiltration toute l'année (Dietz, 2007). Pour la biorétention, malgré une profondeur de gel notée pour le substrat dans des essais au Connecticut, les résultats ont indiqué que la quasi-totalité des eaux de ruissellement (99%) était soit infiltrée ou évapotranspirée (Dietz et Clausen, 2006). En Norvège, les résultats de Muthanna (Muthanna *et al.*, 2007a) ont démontré que le processus d'infiltration pouvait en effet continuer durant la saison hivernale, et que le sol dégèle plus rapidement lorsque les eaux de ruissellement sont dirigées vers les cellules.

1.3.2 La filtration des polluants

Les eaux de ruissellement et les pluies transportent des polluants dans le réseau pluvial et dans le milieu naturel, comme présenté à la section 1.2. Des différents polluants retrouvés, les métaux prennent une part importante étant issus des différents véhicules (par les pneus et les freins) que par les surfaces sur lesquelles l'eau ruisselle (toiture, parement, etc.). La concentration de zinc, cuivre, cadmium et plomb va varier selon le milieu immédiat (Davis, Shokouhian et Ni, 2001). Les figures en annexe I illustrent les différentes proportions de chacun de ces polluants pour un bâtiment en brique et un bâtiment commercial.

Le traitement des polluants se passe dans les différentes strates de la cellule. Il y a de l'accumulation dans la couche de paillis et la phytoremédiation, utilisant les plantes et les micro-organismes associés (Clar, Barfield et O'Connor, 2004). Pour le cuivre, le plomb et le zinc, une réduction de plus de 90% a été constatée (Dietz, 2007). Pour les éléments nutritifs, les résultats varient selon les sites de recherche. Au Connecticut (Dietz et Clausen, 2006) les résultats ont démontré une diminution partielle à l'exception la quantité de phosphore qui était plus importante à la sortie de la cellule qu'à l'entrée. En Caroline du Nord (Hunt *et al.*, 2006), des augmentations de solides en suspension, de nitrate, de phosphore et d'azote ammoniacal ont aussi été relevées. La présence de phosphore dans le substrat choisi ou dans le paillis peut expliquer ce résultat.

Étant donné la nature des rejets relevés, une attention doit donc être portée dans l'utilisation d'une cellule de biorétention avec un drain perforé relié directement au système d'égout municipal (Dietz, 2007). La couche de paillis est importante, absorbant les métaux, l'azote et le phosphore (Dietz et Clausen, 2005; 2006; Muthanna *et al.*, 2007b). Le groupe de Muthanna a observé une réduction de 74% pour le zinc, 13% pour le plomb et 66% du cuivre en masse pour un paillis de 5 cm d'épaisseur. Il est donc important de prévoir un entretien adéquat de la surface, surtout pour les sites avec une forte teneur en métaux comme les stationnements de sites industriels, site qui pourrait créer une source de contamination à long terme. Toutefois, le substrat de plantation peut aussi être considéré comme lieu

d'accumulation pour le plomb et le zinc avec une retenue variant de 77 et 83% respectivement. La majorité des métaux sont retenus par les processus de filtration de la matière en suspension et d'adsorption des couches supérieures de matériaux de la cellule soit le paillis et le substrat. Toutefois, il y a risque de lessivage du cuivre dans les couches inférieures de la cellule à cause de sa difficulté de s'associer aux composantes du substrat et sa tendance de s'associer avec la matière organique dissoute (Li et Davis, 2008). La majorité des métaux s'accumulent dans les premiers 20 cm de la cellule. Les objectifs de conception doivent donc être bien identifiés dès le départ pour répondre aux besoins. En situation d'accumulation de neige entraînant l'utilisation de sels de déglacage pour l'entretien des surfaces imperméables, le chlore du sel est essentiellement transporté directement à travers la cellule sans réduction de masse (Muthanna *et al.*, 2007b). Il n'est donc pas recommandé de pousser la neige sur les cellules, mais plutôt de l'entreposer et la ramasser pour éviter une saturation de sol à long terme.

En ce qui concerne la filtration en période hivernale, la biorétention a présenté très peu de variation saisonnière surtout pour les hydrocarbures et le zinc. Les rendements sont meilleurs l'hiver pour les sédiments en suspension et l'été pour le nitrate (Roseen *et al.*, 2006).

1.3.3 Les végétaux

La présence des végétaux dans les cellules de biorétention dans les manuels de base et dans certains projets de recherche se retrouve dans la description des composantes d'une cellule type. L'importance est reconnue pour le processus d'évapotranspiration des végétaux et le maintien de la porosité du sol par le système racinaire. De plus, les racines des plantes créent des conduits d'infiltration continuant le processus d'infiltration été comme hiver (Davis, 2008; Muthanna *et al.*, 2007b). Les végétaux remplissent des fonctions hydrologiques avec l'interception de l'eau de pluie par la biomasse (le feuillage et la structure), l'évapotranspiration, la recharge de la nappe phréatique, le contrôle de la qualité de l'eau et du débit de pointe. (Clar, Barfield et O'Connor, 2004). De plus, ils peuvent absorber des polluants, soit 6 % du zinc, 8 % du cuivre et 2 % du plomb en masse, mais cela dépend des

espèces. L'utilisation de plantes pouvant absorber une quantité plus importante d'éléments nutritifs ou de polluants, dite aussi plantes hyperaccumulatrices pourrait être intéressante selon la situation à remédier (Muthanna *et al.*, 2007b), mais est encore peu explorée dans le contexte. Muthanna conclut que les plantes ont un rôle mineur avec la filtration des métaux, mais qu'elles ont toujours un rôle important en ce qui concerne l'absorption des éléments nutritifs, le développement de la zone racinaire pour l'amélioration de l'infiltration et la réduction du colmatage, et tous les processus présent dans la rhizosphère. Les racines et radicelles sont les vaisseaux conducteurs pour l'absorption des polluants, mais l'activité microbienne qui se retrouve autour est tout aussi importante pour la dégradation des polluants organiques (Davis, 2008). Toutefois, le rôle des végétaux est plus souvent associé à une question d'esthétique et d'intégration des cellules dans la trame urbaine. Lorsque les aménagements sont prévus hors du contexte de recherche, dans un milieu commercial ou résidentiel par exemple, la qualité de cette intégration est directement reliée à la perception des citoyens environnants et ne peut être négligée dans une conception de projet (Echols, 2007).

Une plante est dite indigène lorsqu'elle croit spontanément dans un secteur donné, sans intervention humaine. L'utilisation de plantes indigènes est privilégiée dans la littérature dans une optique d'optimiser leur développement et leur capacité d'adaptation dans ce type de milieu. Le choix des végétaux pour les cellules de biorétention est surtout orienté vers des espèces qui peuvent tolérer des moments d'inondation variant entre 48 et 72 heures comme temps maximum (Carpenter et Hallam, 2010; Département of Environmental Ressources, 2007; Minnesota Stormwater Steering Committee 2006). Étant donné la configuration en cuvette des cellules, le choix de végétaux doit aussi être en fonction des points hauts et des points bas, avec des secteurs à plus grand risque d'inondation que d'autres (City of Portland, 2008; Vermont Agency of Natural Ressources, 2002), comme pour de la plantation en berge de cours d'eau.

Les plantes peuvent aussi jouer un rôle d'indicateur du bon fonctionnement du système. Le taux de croissance et la survie des plantes signalent s'il y a un problème de teneur en eau

dans la cellule, de compaction ou de colmatage qui ne serait peut-être pas toujours évident à identifier à l'œil nu (Asleson *et al.*, 2009).

1.4 Les arbres en milieu urbain

L'importance des arbres en milieu urbain se démarque en Amérique du Nord pour prendre en considération les bénéfices environnementaux, économiques et sociaux des communautés urbaines. La séquestration de carbone dans la biomasse ligneuse, la diminution des polluants volatils et la diminution de la température estivale contribuent à l'amélioration de la qualité de l'air. L'interception des eaux de pluie par la biomasse, l'augmentation de capacité et du taux d'infiltration d'un sol par la présence des racines améliorent la qualité des cours d'eau en diminuant le volume et le débit d'eau de ruissellement (McPherson, 2000).

Un inventaire forestier du campus Davis de l'Université de Californie a permis de calculer et démontrer l'impact de des arbres selon différents critères, en plus de cibler les interventions futures d'entretien pour maintenir la couverture végétale. Les auteurs ont calculé que, pour une population d'arbres relevée à plus de 584 000 individus, un arbre séquestre en moyenne 851 kg de CO₂ par année et intercepte en moyenne 403 L de pluie par année. Les résultats varient selon les espèces en fonction de l'état et surtout de la biomasse générale de la plante, soit la dimension de la couronne et de la structure. En exemple, l'érable de Norvège séquestre en moyenne 232 kg de CO₂ par année et intercepte en moyenne 408 L de pluie par année alors qu'un cerisier séquestre en moyenne 51 kg de CO₂ par année et intercepte en moyenne 75 L de pluie par année. En fonction des montants d'entretien sur ces arbres, les bénéfices nets annuels pour une municipalité peuvent être de l'ordre de 1,29 \$ par arbre pour le CO₂ et la réduction de pollution, et de 61 \$ par arbre pour l'eau qui ne doit pas être traitée en usine d'épuration (Macon *et al.*, 2004). De plus, les arbres ont un impact sur la température où ils se trouvent. Pour une même surface imperméable avec une canopée d'arbres matures, il peut avoir une diminution de 1 à 3,3 °C grâce à la couverture végétale (Vergriete et Labrecque, 2007). Ils deviennent une stratégie importante pour réduire les

phénomènes d'îlot de chaleur retrouvés dans les centres urbains de toute taille, où les surfaces imperméables dominant et accumulent la chaleur du soleil.

1.4.1 L'évapotranspiration

La photosynthèse est le processus par lequel les végétaux capturent l'énergie de la lumière pour transformer le dioxyde de carbone en glucose nécessaire pour leur développement. À l'inverse de la photosynthèse est la respiration, où l'énergie du glucose et autres composés organiques utilise l'oxygène pour produire du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau qui est dissipée par les stomates des feuilles (Jensen, Jensen et Rosbjerg, 1991; Ricklefs, 1999). Les deux processus forment l'équilibre du développement de la plante. Le processus d'évaporation, ou d'évapotranspiration dépend du taux de photosynthèse d'une plante. Ce dernier est lui-même dépendant de l'habilité de la plante à tolérer la variation de l'humidité dans le sol, ainsi que de la température ambiante et de la radiation solaire (Ricklefs, 1999). L'évapotranspiration se divise majoritairement en deux volets : par bilan énergétique et par étude d'humidité dans le sol. La modélisation de l'évapotranspiration totale est souvent associée ou adaptée à partir de la formule de Penman-Monteith (Bidlake, 2002; Engineers, 1996; Jensen, Jensen et Rosbjerg, 1991) pour prendre en considération les différents paramètres climatiques locaux comme la vitesse du vent, la température moyenne, l'humidité relative et la radiation solaire.

L'évapotranspiration totale est une somme de trois composantes : l'évaporation des surfaces, la transpiration par la plante et l'évaporation à partir de la surface de plante, ou évapotranspiration potentielle, limitée à perte d'eau à partir de la surface végétale. La structure de la masse végétale a une influence sur le taux d'évapotranspiration potentielle (E_T) (Jensen, Jensen et Rosbjerg, 1991; Nowak, 1996). En Floride (Bidlake, 2002), l'étude d'une prairie typique de la région a permis d'établir des valeurs annuelles variant de 944 mm à 978 mm pour E_T sur la surface de la prairie. L'étude se penche sur l'intégration de la valeur de la résistance de la couronne dans ladite équation avec la valeur de la hauteur de couronne. La résistance de la couronne est basée sur la conductance des stomates, contrôle principal de

la perte par E_T . Cette conductance répond à l'état du potentiel hydrique dans la feuille (voir figure 1.6), de la différence de la pression-vapeur de la feuille sur l'air, de la température de la feuille, de la densité du flux énergétique due à la photosynthèse et de la concentration atmosphérique de CO_2 .

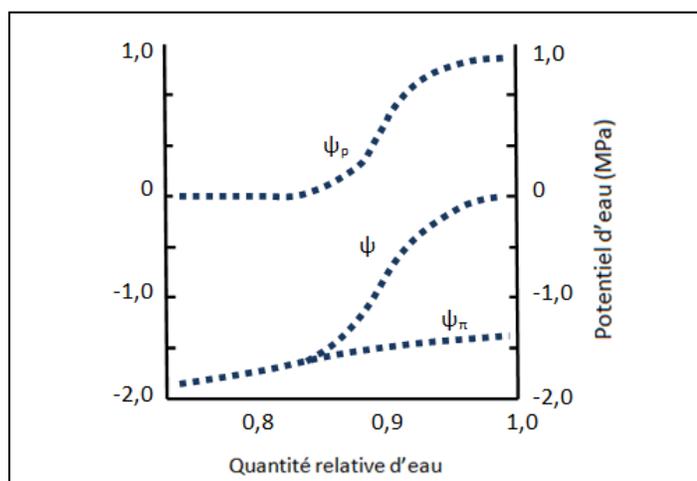


Figure 1.6 Diagramme schématique de Höfler. La relation du potentiel hydrique total (ψ), le potentiel de turgescence (ψ_p) et le potentiel osmotique (ψ_π) avec la quantité relative d'eau d'une plante.

Adaptée de Jensen, 1991 (p. 298)

La turgescence est la fermeté des tissus végétaux due à la pression de leur contenu liquide, c'est le seuil maximal de teneur en eau associé à la santé d'une plante et est variable selon les espèces. Un feuillage fané est indicateur d'une diminution du potentiel de turgescence avec une valeur se rapprochant du zéro. Lorsque la quantité relative de l'eau diminue, la turgescence suit. Lorsque la quantité relative d'eau augmente à sa capacité maximale, les potentiels de turgescence et osmotique sont à leur maximum et le mouvement d'eau dans la plante est minimal (Jensen, Jensen et Rosbjerg, 1991). La teneur en eau d'une plante est en relation directe avec la teneur en eau du sol.

1.4.2 L'interception

L'évaporation à partir de la surface de la plante est définie par le volume d'eau intercepté par le feuillage et sa structure (tronc et branches). L'interception est la différence entre la pluie brute au dessus de la couronne (R) et la pluie nette sous la couronne (P_f), comme illustré dans la figure 1.7 suivante. Cette interception est temporaire, car elle est soit retransmise au sol ou évaporée de la surface de la feuille. La pluie est interceptée par toutes les parties de la plante : la couronne (I) et le tronc (S_f). L'infiltration sur place est augmentée par le système racinaire de la plante qui crée un passage pour les eaux de ruissellement. La quantité d'eau interceptée dépend de plusieurs facteurs, soit l'intensité de pluie, l'intensité du vent et l'humidité, ainsi que la structure de la plante (Xiao *et al.*, 1998). Un arbre avec une structure plus ouverte et un feuillage léger et peu dense risque de retenir moins d'eau qu'un arbre qui avec du feuillage large, dense et une structure plus refermée. La taille, la forme et l'orientation des feuilles vont aussi influencer le taux d'interception.

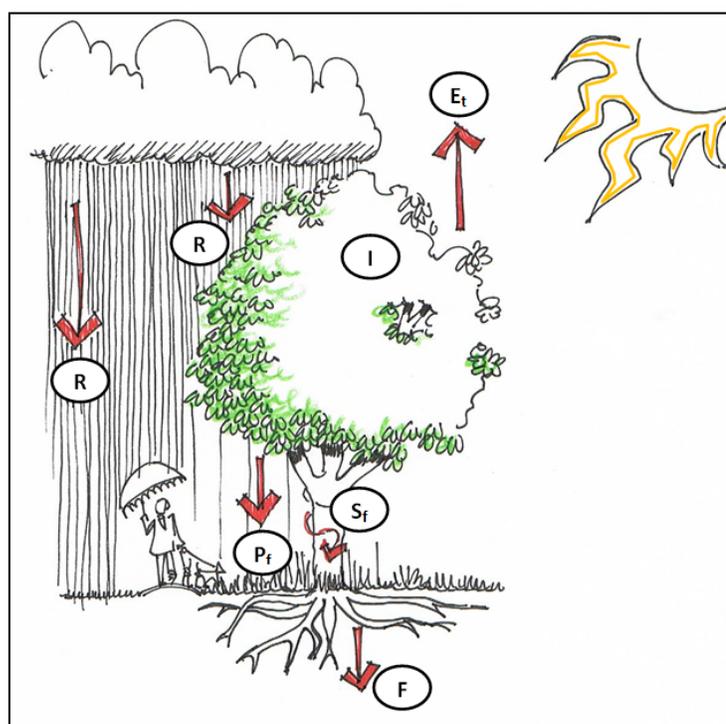


Figure 1.7 Le cycle de l'eau en relation avec l'arbre.

En 1914, Horton installe des pluviomètres sous les arbres et sur les troncs à plusieurs endroits sur une propriété à Albany dans l'état de New York. Une station météorologique incluant aussi un bac de même type que sous les arbres permet de suivre les différences observées selon la position des bacs. La perte associée à l'interception des végétaux est calculée à partir de la différence entre l'eau dans les bacs et la pluie réelle, ainsi que par la durée de l'évènement, le ratio de surface d'évapotranspiration selon la surface projetée et le taux de précipitation. La moyenne relevée est de 0,5 mm d'eau, ou 61 % de l'évènement de pluie, à 8,1 mm d'eau, mais seulement 25 % de l'évènement lors de pluie de plus de 25 mm. Il a élaboré une série de formules d'interception selon différents types de plantes (arbres et arbustes conifères et feuillus). Ces formules sont basées sur la relation des quantités de précipitations par rapport à des constantes associées à l'espèce d'arbre et qui prennent en considération l'âge et la hauteur de ce dernier. Ces formules sont encore trouvées dans les manuels d'hydrologie urbaine aujourd'hui. De cette modélisation sont issus de nombreux autres modèles empiriques pour évaluer l'interception pour un regroupement d'arbres et dernièrement des arbres en isolés (Muzylo *et al.*, 2009). Le processus étant directement relié aux données climatiques et il peut être laborieux d'établir des bases de données selon la quantité demandée de paramètres spécifiques à la plante et au lieu.

Ceci sous-entend que la quantité d'eau interceptée par une plante va varier selon les espèces. Plus la dimension de la couronne de l'arbre prend de l'ampleur, plus la plante consomme de l'eau. (Harris, 2002). Lorsque le point de flétrissement est atteint, la photosynthèse diminue ou s'arrête et la survie de la plante est mise en question. Une étude sur deux ans d'un poirier et d'un chêne a permis d'établir des différences : 15 % d'interception par le feuillage de la pluie relevée pendant la période par le poirier et 27 % par le chêne, de la même façon 8 % et 15 % interceptés par la ramure, pour le poirier et le chêne respectivement (Xiao *et al.*, 2000a). La différence peut être expliquée par plusieurs points physiologiques : le chêne était plus grand et plus large que le poirier, avec une ramure plus imposante. Toutefois, le ratio de la hauteur de la couronne par rapport à son diamètre est similaire pour les deux arbres. De plus, le chêne peut conserver ses feuilles en hiver et a donc une plus grande surface d'interception que le poirier qui n'a que sa ramure pour cette période. La différence entre les

deux arbres n'est toutefois pas expliquée pour les mêmes moments des saisons. Les résultats d'interception semblent être meilleurs pour les petits événements de pluie, de 2 mm et moins, mais les résultats sont en fonction de pourcentage de l'évènement de pluie intercepté, et non de volume total.

L'interception est aussi un phénomène dynamique et, pour un même évènement, la courbe de pluie nette n'est pas parallèle à la courbe de pluie brute. L'interception peut varier selon le vent et l'intensité d'une pluie et surtout selon les conditions initiales avant l'évènement de précipitation. Lorsque la surface de la plante est déjà humide ou mouillée, sa capacité d'accumulation est réduite par rapport à un état initial sec (Xiao *et al.*, 2000a).

L'interception va aussi varier selon les saisons. En France, une haie de Chêne pédonculé (*Quercus robur*) a intercepté 25 % des précipitations durant la période estivale et 12 % en période hivernale (Ghazavi *et al.*, 2008). De plus, le pourcentage d'interception va augmenter pour une année plus sèche par rapport à une année avec une pluie plus importante, car la capacité de stockage de l'arbre va être dépassée moins rapidement (Rahgozar, Shah et Ross, 2007).

Une étude sur les arbres dans les parcs et les rues de Santa Monica en Californie (Xiao et McPherson, 2002) a révélé qu'en moyenne, chaque arbre intercepte 6,6 m³ de pluie annuellement. La variation selon la taille des arbres, avec le meilleur rendement pour les arbres ayant un diamètre de tronc variant de 46 à 61 cm interceptant entre 6,35 et 19,62 m³ par arbre annuellement. Les résultats varient aussi selon les villes : Sacramento 1,8 m³ et Modesto 3,2 m³ en moyenne. La quantité d'eau interceptée varie selon la l'espèce, sa stature et sa texture de tronc, allant de 0,2 à 3,8 m³/an (Macon *et al.*, 2004). Cette eau interceptée est retournée directement à l'atmosphère par évaporation, réduisant la quantité d'eau de ruissellement qui s'achemine vers les infrastructures souterraines, les réseaux naturels et minimisant les impacts de l'urbanisation sur le milieu naturel.

1.4.3 La teneur en eau du sol

L'évaporation de l'eau interceptée par un arbre dépend de sa capacité de stockage de la couronne. Mais la transpiration de la végétation dépend de la teneur en eau du sol et de sa disponibilité pour la plante à différents moments, comme discuté plus haut. La quantité d'eau dans le sol varie selon la texture de celui-ci. La texture se caractérise par la dominance d'une des grandes catégories de particules du sol identifiable par le diamètre : l'argile, le limon et le sable. Le triangle des textures se retrouve à l'annexe I, illustrant la nomenclature selon le pourcentage des différentes particules. La teneur en eau d'un sol se divise en trois grandes catégories : l'eau de gravité, l'eau utilisable par les plantes et l'eau inutilisable par les plantes. L'eau de gravité, ou de saturation, est contenue dans les larges pores de la terre. La quantité d'eau qui reste dans le sol après l'infiltration par gravité est la capacité de rétention, aussi appelée la capacité au champ (voir figure 1.8). L'eau retenue par les pores du sol est adhérente aux particules et est accessible aux plantes par leur système racinaire. Les particules fines des argiles et limons offrent peu d'espace, en opposition aux particules des sables et graviers qui permettent un mouvement rapide de l'eau. Lorsque les pores du sol regorgent d'eau, l'eau est facilement utilisable. Lorsque l'eau commence à disparaître, la tension augmente et on se retrouve dans la zone d'eau utilisable. Lorsque les plantes n'ont plus accès à l'eau parce que les racines ne peuvent y avoir accès rapidement, les stomates de la plante se ferment, la plante se fane on se retrouve au point de flétrissement permanent (Soltner, 2005). À ce moment, la plante est à son point de turgescence (ou de teneur en eau) minimal et ne peut s'en remettre à moins d'un apport en eau, artificiel ou naturel. La teneur en eau du sol a donc un impact sur l'état de turgescence de la plante, comme présenté avec la figure 1.6. Le contrôle de cette teneur en eau est essentiel pour maintenir l'équilibre de la plante et lui permettre de se développer.

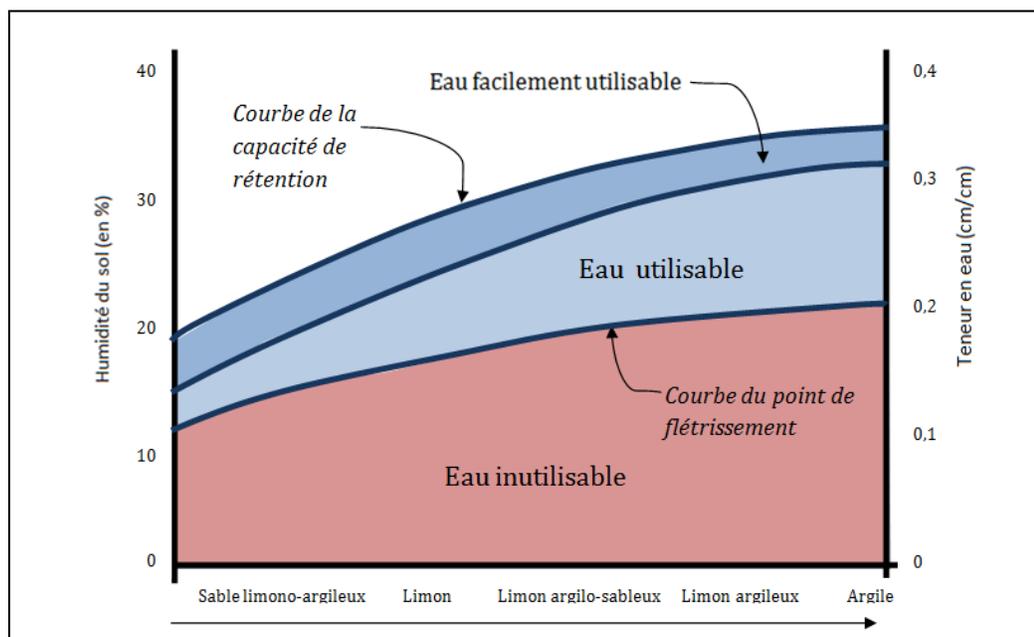


Figure 1.8 Relation entre la texture du sol et les caractéristiques d'humidité disponible.
Adaptée de Harris, 2002 (p. 310)

En mesurant l'humidité dans le sol à plusieurs niveaux, il est possible d'établir le fonctionnement de l'évapotranspiration (E_T) pour certaines situations. Trout et Ross (2006) ainsi que Rahgozar (2007) ont étudié la relation de l'humidité dans le sol à différents moments de la journée et des saisons pour comprendre le comportement réel de l'évapotranspiration. La perte d'humidité dans le sol est due à l'évaporation, la transpiration des plantes et le drainage par gravité. À l'aide de sondes et à partir des données d'humidité et du graphique journalier et saisonnier, il a été possible d'évaluer l'évapotranspiration réelle dans le sol en séparant le drainage par gravité de la perte générale en humidité du sol par dérivation. Cette méthode est restrictive sur plusieurs aspects car elle est directement liée au site, avec tous les facteurs météorologiques et biophysiques qui s'y associent et ne peut être extrapolée. Pour Rahgozar, des résultats variant de 50 à 55 % des précipitations annuelles pour la surface herbacée et 67 à 85 % pour la surface boisée, en E_T totale incluant l'interception, et entre 26 et 40 % et 46 et 77 % respectivement pour E_T à partir de l'humidité du sol. Ceci représente toutes surfaces confondues à entre 400 et 1040 mm annuellement pour le secteur. Ainsi, à partir des données météorologiques et des résultats obtenus d'après la lecture des sondes, l'humidité du sol fluctue en fonction de facteurs extérieurs soit la variation de la nappe phréatique, les précipitations et la radiation solaire. Alors que les deux

premiers points peuvent apparaître plus simples comme constatation, l'équipe de Rahgozar a pu remarquer l'impact d'une variation aussi passagère qu'un passage nuageux. L'impact des variations pouvaient se retrouver dans les minutes qui suivaient l'évènement. Une étude comparative de même végétaux dans des secteurs différents permettrait une meilleure interprétation des données pour l'espèce.

La majorité de la documentation disponible pour établir des programmes d'irrigation pour ne pas perdre des récoltes (Engineers, 1996; Rushton, 2002) sont pour des projets forestiers ou agricoles. Dans un contexte qui voulait reproduire un milieu urbain, 203 plantes de camélias en pots identiques ont été placés sur une surface en béton, avec des densités de plantation (faible, moyen et fort) pour étudier la variation de la teneur en eau dans le sol. La transpiration des plantes augmente avec la distance de plantation, 59 % de plus avec une plantation de basse densité que par rapport à une de plus forte densité (Hagishima, Narita et Tanimoto, 2007). De plus, à l'intérieur d'un même regroupement de plantation, les plantes qui se retrouvent au centre des regroupements transpirent 25 % de moins que les plantes en périphérie. La densité de plantation a donc un effet sur l'humidité conservée au sol, et sur l'eau disponible pour la plante. Les difficultés de développement des arbres en isolé dans les aménagements urbains s'expliquent donc non seulement par la place disponible pour le développement des racines (Urban, 2004) mais aussi par le rapport au flux de chaleur latente des surfaces imperméables environnantes généré dans les centres urbains (Lee et Park, 2008).

Contrairement aux infrastructures souterraines et aux bassins de rétention, les cellules de biorétention font partie des types d'ouvrages, ou pratiques de gestion optimales, conçus pour retenir les plus petits évènements de pluie qui sont plus fréquent durant une année. La conception des cellules de biorétention sous entend la création d'un milieu de plantation idéal pour les végétaux pouvant s'adapter à ces zones d'inondation. En dirigeant les eaux de ruissellement vers ces espaces, un apport d'eau est assuré pour les plantations. Le type de substrat doit permettre une infiltration rapide pour éviter des débordements trop fréquents et maximiser la retenue sur le site par infiltration, évaporation et évapotranspiration, sans causer préjudice au développement de la plante en provoquant des situations de flétrissement trop

fréquent et d'une durée trop longue. La section suivante explique la méthodologie utilisée pour évaluer ce critère de conception des cellules, ainsi que l'impact possible de l'interception de la pluie par les arbres sur la plantation en place.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Les aires de stationnement et les rues sont des éléments de la trame urbaine qui se retrouvent autant en milieu urbain que périurbain intégrant souvent des plantations arborescentes et arbustives. Ces surfaces imperméables ont le potentiel de déplacer de larges volumes d'eau de pluie par ruissellement. La cellule de biorétention est donc une solution intéressante pour intégrer des solutions de développement à faible impact. Grâce à des collaborations avec une municipalité et un promoteur immobilier, deux sites ont été retenus dans le contexte de la recherche pour illustrer l'impact hydrologique des cellules de biorétention à partir d'aménagements typiques urbains. Les deux sites sont des nouveaux aménagements, mais la biorétention est un système qui peut aussi s'intégrer à un site existant. À partir des configurations déterminées pour les surfaces imperméables, la modélisation des cellules avait pour but d'analyser le comportement hydrologique et le développement anticipé des végétaux, notamment des arbres. L'intérêt de l'intégration et l'étude des arbres dans ces aménagements découle de l'importance de les inclure comme mesure de compensation pour combattre le phénomène d'îlot de chaleur (Macon *et al.*, 2004) retrouvé en milieu urbain.

Le déroulement du projet de recherche se divise en trois grandes étapes soit d'identifier les surfaces disponibles dans les projets pour intégrer la biorétention, d'utiliser le modèle RECARGA pour étudier le comportement hydrologique des différentes cellules, et finalement d'évaluer le volume d'eau intercepté par les arbres selon les événements de pluie et l'impact sur les volumes d'eau entrant dans le système. Les sections suivantes décrivent les différentes étapes et méthodes utilisées.

2.1 Description des projets

Le premier site est à Mont-Saint-Hilaire, à côté du centre civique de la Ville. C'est un nouveau stationnement de 96 places en continuation d'un stationnement existant. L'intégration de la biorétention s'inscrit à l'intérieur de l'objectif principal de la municipalité

de planifier dans un esprit durable en remettant en question toutes les étapes et les choix de design traditionnel pour un stationnement. Dès le départ, l'utilisant des îlots séparateurs que l'on retrouve dans ce type d'aménagement pour intégrer la biorétention à été retenue. Le stationnement a été construit au courant de l'été 2009 et se veut un projet pilote pour les municipalités voisines.¹

Le second projet est aussi sur la Rive-Sud de Montréal, dans le secteur de la phase 3 du quartier Dix30 à Saint-Hubert. C'est donc un secteur de quartier commercial, avec des rues secondaires, des trottoirs larges et un mail piétonnier en façade des commerces, ainsi que des débarcadères en arrière de plusieurs commerces. Les surfaces vertes planifiées sont minimales et se retrouvent sur les limites extérieures du projet. L'objectif est d'utiliser tous les espaces possibles pour traiter les eaux de ruissellement des voies d'accès des automobiles et des piétons pour diminuer le volume d'eau devant être acheminé dans le bassin de rétention souterrain prévu. La majorité de l'espace central est construit au-dessus d'un stationnement souterrain, limitant la profondeur possible de la cellule.

Les croquis d'ensemble des deux projets se retrouvent en annexe II et III du présent document, avec les plans du projet de Mont-Saint-Hilaire.

2.2 Les cellules de biorétention

La première étape de la planification est d'identifier la localisation des cellules dans les projets, en fonction des surfaces à desservir et de la place disponible. La composition des cellules est présentée par la suite avec description des matériaux et identification de zones qui la composent.

¹ Le projet a d'ailleurs été finaliste pour le prix Ovation de l'Union des municipalités du Québec en 2010 pour la catégorie 'Environnement et développement durable'.

2.2.1 Calculs de la superficie des cellules

De façon générale, les différents volumes techniques et manuels de gestion des eaux de pluie qui existent à travers l'Amérique du Nord identifient le calcul de la superficie nécessaire pour la cellule de biorétention en fonction de la superficie à traiter. Plusieurs sources préconisent un calcul à partir d'une pluie de 2,5 cm et sont des variations de la méthode Rationnelle (à partir de la surface à traiter, le coefficient de surface et le facteur de traitement), de la méthode de Surface Imperméable (identifiant le pourcentage de surface de traitement), ou en fonction du temps de résidence de l'eau en surface, comme au Minnesota. Une analyse des méthodes de dimensionnement préconisées par les différents États américains donne une superficie de cellule variant de 5 à 12% de la surface à traiter, pour une hauteur d'accumulation de 15 cm (Muthanna, Viklander et Thorolfsson, 2007). Pour la présente recherche, la méthode de calcul du Prince George's County à 1,27 cm de hauteur d'eau. La formule est comme suit :

$$A_{\text{bio}} = A_{\text{imp}} \times \frac{1,27}{100} \times 1/d_{\text{bio}} \quad (2.1)$$

A_{bio} : superficie de la cellule de biorétention (m²)

A_{imp} : superficie de la surface à traiter (m²)

d_{bio} : profondeur de l'accumulation d'eau (m)

Cette formule est retenue pour deux raisons. La première est que c'est celle qui semble donner des meilleurs résultats pour les climats froids où il y a accumulation de neige (Muthanna, Viklander et Thorolfsson, 2007). La deuxième raison est que malgré les recommandations des ouvrages techniques sur ce point, la conception peut être ajustée par les responsables du projet, notant que l'approche par un niveau de service (événement 1 dans 5 ans, ou 1 dans 10 ans) a aussi été utilisée (Brown et Hunt III, 2010; Xiao et McPherson, 2008). Il s'agit de prévoir les débordements par des systèmes plus traditionnels de trop-pleins (ou mini puisards) pour minimiser l'inondation sur les surfaces imperméables. À noter que dans les deux cas les aménagements le sol en place varie de limono-argilo-sableux à limono-argileux, l'infiltration en profondeur n'est pas envisageable et l'installation d'un drain sera

un incontournable dans la conception. La nappe phréatique est située entre 1,5 m et 2 m de profondeur sous le niveau du terrain pour le projet du stationnement.

2.2.1.1 Site du stationnement

La coordination avec le service de l'ingénierie et de l'environnement, ainsi que le service de l'aménagement du territoire a permis d'élaborer le plan du stationnement et des aires adjacentes en conséquence de l'espace nécessaire pour le traitement. Trois cellules ont été planifiées pour desservir les surfaces de stationnement. Les dimensions réelles des cellules ont été mesurées sur le site après la construction (voir plan en annexe I).

2.2.1.2 Site des commerces

Une évaluation des superficies disponibles pour traitement et des superficies à traiter identifie huit (8) cellules possibles sur le terrain (voir l'annexe II pour les détails).

2.2.2 Composition des cellules

Dans les deux cas, la conception est basée sur les recommandations du manuel de biorétention du Maryland (Department of Environmental Resources, 2007) et du Vermont (Vermont Agency of Natural Resources, 2002). Dans les deux cas, la hauteur d'eau de 15 cm a été retenue, car elle suit le minimum recommandé par les manuels. Il n'y a pas de réglementation municipale par rapport à la hauteur d'eau permise pour ce type d'aménagement. Il faut se référer alors aux règlements pour les bassins et piscines, statuant qu'aucun ouvrage de protection n'est exigé à moins de 45 cm d'accumulation permanente.

Pour le stationnement, les cellules sont intégrées dans les îlots de plantation. L'eau ruisselle vers des interruptions dans la bordure et passe par des trappes à sédiments qui ont été conçues pour récolter les débris des premiers moments d'une pluie. L'eau passe ensuite par une bande filtrante gazonnée pour aboutir dans la cellule. Celle-ci permet 15 cm d'accumulation en surface, et est composée de 10 cm de paillis, 60 cm de substrat de

plantation, 40 cm de sable drainant avec drain de 200 mm de diamètre perforé et filtré, le tout entouré d'une membrane géotextile non tissée (voir figure 2.1) et des trop-pleins prévus dans deux des trois cellules. Le drain et le trop-plein sont raccordés au bassin de débordement. La liste des différents matériaux se retrouve en annexe.

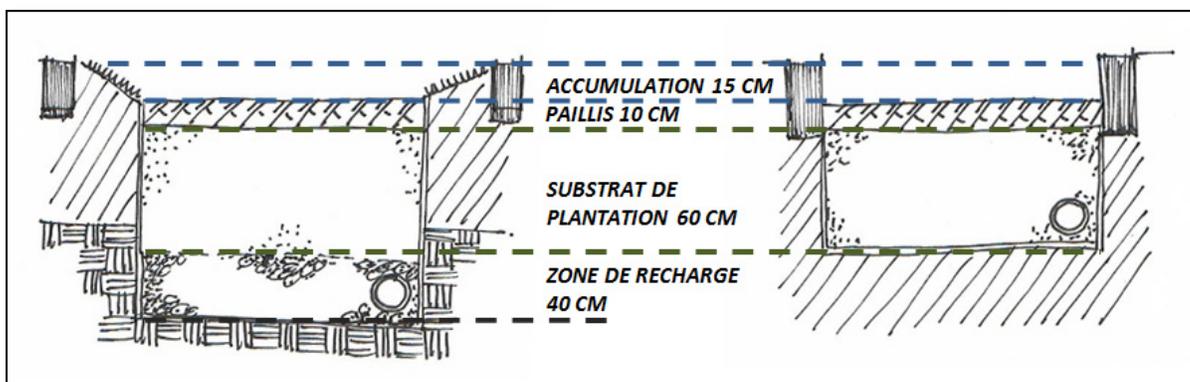


Figure 2.1 Concepts de construction des cellules de biorétention pour le stationnement (gauche) et les commerces (droite).
Adaptés de DNR 2007 (p 19 et 20)

Pour le site des commerces, il y a deux types d'aménagements mais avec la même configuration des couches de matériaux. Avec 15 cm d'accumulation en surface, il y a 10 cm de paillis, 60 cm de substrat, un drain de 150 mm de diamètre perforé et filtré et des trop-pleins prévus dans chaque cellule. Le drain et le trop-plein sont raccordés au système pluvial qui est aussi constitué d'un bassin de rétention sous-terrain. Une bande filtrante gazonnée est possible pour les cellules situées en périphérie du complexe. Les autres cellules sont situées dans l'esplanade piétonne et le long du trottoir sont dans des zones à imperméabilité maximale. Étant donné les contraintes de sites avec les infrastructures souterraines importantes, dont un stationnement souterrain pour le secteur central, la hauteur des cellules est limitée au paillis et au substrat.

Le choix du substrat de plantation est important pour créer l'équilibre d'infiltration de l'eau et la survie des plantes. Les différents manuels préconisent un mélange suivant des proportions spécifiques de matière organique (à partir de compost), sable, limon et argile ainsi que le pH. Pour faciliter le contrôle de qualité, il a été convenu de choisir un mélange

existant sur le marché (Carpenter et Hallam, 2010). En se basant sur les données du manuel du Vermont, le choix s'est arrêté au mélange pour plantation 'Éco-vert' de la compagnie Matériaux paysagers Savaria pour sa composition et son taux d'infiltration (voir fiche en annexe IV). Les caractéristiques du manuel de référence sont : un pH de 5,2 à 7, un taux de matière organique de 1,5 à 4 %, 10 à 25 % d'argile, 30 à 55 % de limon et 35 à 60 % de sable. La perméabilité doit être d'au moins 1,25 cm/hr et le matériel doit être exempt de pierres ou éléments de plus de 2,5 cm de diamètre (Vermont Agency of Natural Resources, 2002). À partir des informations disponibles lors de la conception des cellules, la valeur de 0,5 cm/hr pour le mélange retenu donnait des résultats positifs pour la survie des plantes dans les essais préliminaires². Les tests de perméabilité pour le sable et le substrat, ont été effectués par le laboratoire LMV Technisol à Boucherville pour évaluer la conductivité hydraulique. La grande différence entre les valeurs théoriques du substrat de plantation (0,5 cm/hr) et mesurée sur les échantillons pris sur le terrain (5,8 cm/hr) a été le sujet de plusieurs discussions lors du chantier. L'écart de valeur s'est expliqué par les différentes techniques utilisées et par la variation des échantillons. La perméabilité mesurée a été reprise plusieurs fois en variant le compactage du sol pour obtenir un résultat similaire à la valeur théorique avec les tests d'essai de perméabilité et d'essai de perméabilité à charge constante. La conclusion des représentants du laboratoire est qu'il n'y a pas moyen d'avoir un test efficace pour régler ce point. Le matériel était déjà livré et en place lorsque la différence a été notée, il a été décidé conjointement avec les représentants de la municipalité et du fournisseur que le matériel resterait dans les cellules, et qu'une observation pour les prochaines années permettra de juger de la nécessité d'amender le substrat. Étant donné que le modèle RECARGA ne prend pas en considération la compaction dans le temps, ou la

² Une revue des mélanges de plantation disponibles par le fournisseur donnait une valeur de 0,12 cm/hr d'infiltration pour le mélange pour arbre et pelouse, 0,08cm/hr pour le mélange pour arbustes et vivaces et 5,9 cm/hr pour le mélange pour terrain sportif sans système d'irrigation. Les deux premiers apparaissaient beaucoup trop faibles pour l'utilisation désirée, et le dernier trop élevé.

variation de la texture du sol par la décomposition du paillis ou des mottes des végétaux, il est apparu plus intéressant de prendre les deux valeurs pour chacun des espaces et d'étudier l'écart des résultats. Le substrat n'a pas été compacté, l'installation du matériel a été réalisée avec la machinerie de chantier et un léger tassement du matériel pour obtenir un milieu uniforme.

Une zone de recharge est planifiée pour les cellules du stationnement. Il a été choisi de remplacer la nature de gravier recommandé par les différents manuels par un lit de sable. Selon les expériences du Vermont, la présence d'une membrane poreuse entre le gravier et le substrat de plantation peut rapidement créer des situations de colmatages et limiter l'accès au drain. La contamination du sable par les particules fines du substrat de plantation à dominance de sable est minime dans le temps, la membrane n'est donc pas nécessaire. Par contre, une membrane poreuse (un géotextile non-tissé) couvre les parois et le fond des cellules pour contrôler les volumes de matériaux en place et assurer que les matériaux de fondation des surfaces imperméables environnantes ne migrent pas vers le substrat, et inversement. C'est une membrane perméable, permettant l'exfiltration de l'eau

2.2.3 Choix des végétaux

N'ayant pas de liste spécifique locale pour ce genre d'aménagement, les listes des différents manuels ont été consultées comme point de départ. Le choix des plantes a été fait en considération de la zone de rusticité et des caractéristiques de sol et d'ensoleillement. Les plantes indigènes ont été privilégiées, mais plusieurs choix horticoles ont quand même été retenus pour une question de disponibilité et de diversité.

Le concept de plantation pour le stationnement est en deux parties. Pour les cellules, un mélange d'arbres, d'arbustes et de vivaces est préconisé pour créer une diversité de feuillage et de couleur. En périphérie des cellules, c'est uniquement des plantations d'arbres, certains identiques à ceux planifiés dans les cellules. Ce dédoublement permettra le suivi du développement de ces arbres en comparant leurs comportements. La liste complète se

retrouve en annexe sur le plan de plantation, incluant les calibres de plantation. Les arbres sont en panier de broches avec un diamètre de tronc de 50 mm de diamètre, respectant la réglementation municipale des aménagements urbains, et les arbustes et vivaces sont en pots avec des hauteurs variables selon l'espèce. Pour les commerces, aucune liste officielle n'a été préparée.

2.3 Modélisation avec RECARGA

La modélisation en drainage urbain existe surtout pour analyser des réseaux complets basés sur des réseaux de conduites comme outil de conception ou comme outil de contrôle et d'opération d'un réseau existant. Plusieurs des modèles existants sur le marché peuvent introduire les bassins de rétentions, et quelques uns peuvent aussi analyser le contrôle de la qualité de l'eau. Les principaux modèles utilisés au Québec sont Stormwater Management Model (SWMM), Hydrologic Model (HYMO) et Illinois Urban Drainage Area Simulator (ILLUDAS) (Rivard, 2005). La limite de ces modèles est qu'ils ne permettent pas d'intégrer des pratiques de gestions optimales comme la biorétention.

Le Water Balance Model est un modèle accessible en ligne (<http://qc.waterbalance.ca/>) qui a pour but de valider les impacts des différentes pratiques de gestion optimales comme méthode de contrôle à la source sur des terrains de différentes tailles. Il veut être un outil de conception permettant de minimiser le ruissellement et l'impact de nouveaux projets de construction. Il est encore en phase d'essai et, comme indique son nom, se limite à l'équilibre hydrologique, ou bilan hydrique. Le modèle RECARGA a été conçu par une équipe de l'Université du Wisconsin en 2004, au Water Resources Institute (Atchison, 2006), comme un outil de conception et d'évaluation de performance pour la biorétention et les bassins d'infiltrations. Contrairement aux modèles identifiés plus haut, il caractérise un ouvrage à la

fois pour optimiser le rendement de chaque système en manipulant chacun des paramètres de conception identifiés plus haut soit l'épaisseur des 3 zones et conductivité hydraulique du substrat. Les simulations peuvent être selon une pluie type ponctuelle ou selon une simulation à long terme définie par l'utilisateur.³ La simulation à long terme est importante pour comprendre le comportement de la saturation du sol dans le temps, et pour l'étude de ce comportement sur les végétaux. Le modèle analyse les résultats d'un point de vue hydrologique et aussi d'un point de vue de survie des plantes. Des études aux États-Unis et en Europe ont identifiées que les résultats calculés par RECARGA sont concluants lorsque comparées aux résultats de cellules construites (Davis, 2008; Muthanna, Viklander et Thorolfsson, 2007) pour l'hydrologie. Toutefois, le modèle ne donne pas la possibilité de relier les ouvrages entre eux pour avoir une vision d'ensemble d'un site. Ces données doivent être intégrées dans les modèles de réseau pour donner une vision d'ensemble. De plus, la position du drain ne peut être modifiée de sa place entre le substrat de plantation et de recharge. La position de se dernier varie selon les objectifs de conception du projet, créant ou non des zones anoxiques dans le fond, ou des réserves d'eau (Department of Environmental Resources, 2002).

La méthode suit celle démontrée dans le manuel du modèle (Atchison, 2006). Pour les simulations à long terme, il faut en premier lieu préparer la base de données de précipitations pour la période voulue. Il s'agit ensuite d'établir les paramètres de conception des cellules et produire les différentes simulations.

³ Ce modèle est recommandé par le Environmental Protection Agency des États-Unis (EPA) et par l'État du Wyoming pour les calculs de biorétention.

2.3.1 Base de données

La modélisation hydrologique est basée sur l'utilisation de moyenne de données sur plusieurs années, comme avec les courbes d'intensité, durée et fréquence, pour avoir une vue d'ensemble sur le comportement possible de l'ouvrage analyse. Le volet végétal de la présente recherche demande une approche différente. La nature vivante des plantes les rend sensible à des évènements ponctuels, comme une sécheresse ou un verglas intense. Une analyse avec des extrêmes de comportement pour les précipitations permet une analyse plus précise du comportement de la cellule et des plantes. Les rapports de données mensuelles d'Environnement Canada disponibles en ligne (Environnement Canada, 2009) ont été parcourus pour les années 2005 à 2008 en s'attardant sur les données de pluie et non de précipitation totale. Le choix s'est arrêté sur l'année 2006 pour l'année pluvieuse avec 1214,4 mm de pluie (6 mois hors gel à plus de 100 mm par mois) et 2008 pour une année moins pluvieuse avec seulement 514,3 mm de pluie (1 mois hors gel à plus de 100 mm). De plus, étant donné le critère minimal de conception de 1,27 cm on remarque que 2006 a 182 évènements de pluie, dont 26 avec plus de 1,27 cm et 2008 a 160 évènements de pluie dont 15 avec plus de 1,27 cm. Les cellules planifiées peuvent donc accommoder entre 85,7 % et 90,6 % des précipitations respectivement pour les années retenues.

La base de données du modèle a été bâtie à partir des données obtenues pour la station de 'Montréal/St-Hubert A' pour les deux projets. À partir des données météorologiques recensées sur les périodes, la première étape est de calculer les données d'évapotranspiration journalières. Il faut évaluer la quantité totale par jour, la diviser par le nombre d'heure par jour sans précipitation et le répartir également.

Les auteurs du modèle privilégient l'utilisation de l'équation de Lamoreux si la valeur d'évaporation du bac (E_p) n'est pas disponible. La formule se définit comme suit (Lee, 2000) :

$$E_p = \{ \exp[(T_a - 212)(0,1024 - 0,01066 \ln R_d)] - 0,0001 + 0,025(e_s - e_a)^{0,88} (0,37 + 0,0041 U_p) \} \times \{ 0,025 + (T_a + 398,36)^{-2} 4,7988 \times 10^{10} \exp[-7482,6 / (T_a + 398,36)] \}^{-1} \quad (2.2)$$

T_a : température de l'air (°F)

T_d : température au point de rosée (°F)

e_a : pression de vapeur (pouces de mercure à T_a)

e_s : pression de vapeur (pouces de mercure à T_d)

R_d : radiation solaire (langleys/jour)

U_p : mouvement du vent (miles/jour)

Certains éléments de la formule ont été trouvés à partir des formules suivantes. La pression de vapeur à la température au point de rosée se calcule comme suit (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et de l'agriculture) :

$$e_s = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27T}{T + 237,3} \right] \quad (2.3)$$

La pression de vapeur à la température de l'air se trouve en transformant la formule d'humidité relative (Llamas, 1993) :

$$e_a = \frac{H_r}{100} e_s \quad (2.4)$$

La valeur de la radiation solaire (R_d) est donnée dans l'Atlas du Canada consulté en ligne (Ressources naturelles Canada, 2008). La valeur pour la région de 12 à 13 MJ/m², selon la carte Rayonnement solaire – annuel produite en 1984. La valeur est traduite en langleys en multipliant par 23,89 pour une valeur maximale de 310,57 langleys. Les valeurs de T_a , T_d et U_p sont trouvées dans le fichier de données d'Environnement Canada.

En utilisant l'équation de Lamoreux, et convertissant en mm, il faut ensuite calibrer la valeur obtenue en divisant la valeur d'évaporation journalière par 0,75 (Atchison, 2006). La valeur journalière calculée est divisée uniformément durant les heures où il n'y a pas de

précipitation d'enregistrée. Les équations de RECARGA se limitent à une interprétation d'eau dans le sol, selon les capacités hydrologiques, les épaisseurs de substrat et la présence d'un drain de fond. L'objectif est de calculer la quantité en hauteur d'eau selon un évènement ou une série d'évènements. Dans les PGO on vise une minimisation des débits et des volumes qui doivent se rendre au système pluvial. Les résultats sont donnés par rapport à une donnée de rétention totale sur le site.

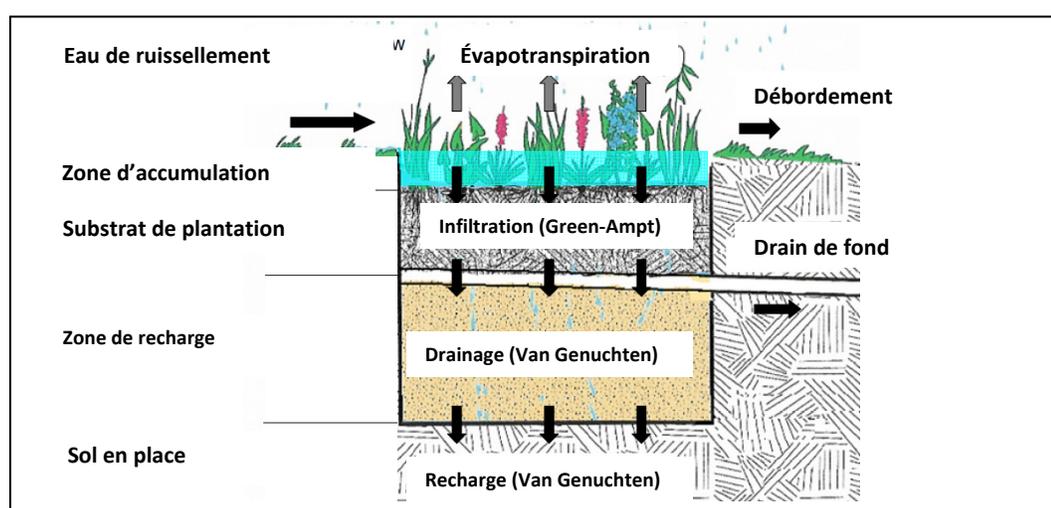


Figure 2.2 Représentation du bilan hydrique de RECARGA.
Adaptée Gaffield et al 2008 (p20)

La figure 2.2 identifie les formules utilisées pour calculer les volumes des entrées et sorties du système soit : le ruissellement du sol avec l'approche du Soil Conservation Service (SCS) pour les surfaces perméables et imperméables, le modèle Green-Ampt pour l'infiltration et le modèle Van Genuchten pour le drainage de la zone de recharge et la recharge du sol en place (Atchison, 2006). L'évapotranspiration prend compte de la zone racinaire et la texture du substrat de plantation.

Le modèle fait abstraction du type ou de la densité des végétaux plantés et est exprimée par la formule suivante :

$$Q_n = E_{max}(1 - (1 + A_w)^{1/m}) \quad (2.5)$$

Où $A_w = \frac{\theta - \theta_{pwp}}{\theta_{ft} - \theta_{pwp}}$

E_{max} : la donnée d'évapotranspiration relevée sur station météorologique

θ : Capacité d'eau en condition actuelle

θ_{fc} : Capacité de rétention (capacité au champ)

θ_{pwp} : Capacité d'eau au point de flétrissement permanent

m : Constante de Van Genuchten

Le modèle ne prend pas en considération l'épaisseur ou le type de paillis qui est nécessaire en surface. En plus d'ajouter une épaisseur de 10 cm dans le calcul total de la cellule, la rétention d'eau du paillis varie selon le type utilisé. Un paillis plus fin va conserver l'humidité plus longtemps que le paillis de branche (ou bois raméal fragmenté), mais les deux ont vocation à conserver l'humidité dans le sol plus longtemps. Aussi, le degré de tassement de la terre dans le temps ou lors de la construction n'est pas pris en considération, ce qui peut affecter la porosité et la densité apparente du sol. Comme mentionné, le type de plantation (arborescente ou arbustive), la densité de plantation et le substrat des mottes des végétaux dans le substrat de plantation (tant en volume que pour la texture) ne sont pas non plus considérés. La simulation est limitée à des événements de pluie, l'accumulation de neige et les périodes de gel ne font pas partie de la vue d'ensemble.

2.3.2 Entrée de données – les simulations

Une fois la base de données complétée, les simulations peuvent commencer pour chacune des cellules. La simulation se fait en identifiant pour le terrain : la superficie totale à traiter (m^2), la superficie de la cellule projetée (m^2), la valeur CN de la surface de ruissellement, les pourcentages de surface imperméable et perméable, la moyenne régionale d'évapotranspiration (cm/jour), la durée de la période étudiée, l'identification du fichier de données (format texte) et des fichiers de résultats (aussi format texte). Pour la cellule, il faut identifier : la hauteur d'accumulation d'eau (cm), la texture (classement SCS), la conductivité

hydraulique (cm/hr) et la hauteur du substrat de plantation (cm) ainsi que de la zone de réserve, s'il y a lieu. Finalement il faut identifier le diamètre du drain et la texture du sol en place. Pour la moyenne régionale d'évapotranspiration, une carte d'évapotranspiration annuelle est disponible par le site de l'Atlas hydrologique de 1978, consulté en ligne (Ressources naturelles Canada, 2008). Avec une valeur entre 50,8 et 61,0 cm par année, ceci donne une valeur minimale de 0,139 cm/jour pour le secteur du Québec où se retrouvent les deux projets. Un exemple de fenêtre est placé en annexe du document avec les résultats complets (Annexe V).

Une fois toutes les données entrées pour chaque cellule, le modèle peut donc produire, en plus du résumé par la boîte de dialogue, jusqu'à deux fichiers de résultats pour la cellule : résumé du bilan hydrique et de survie des plantes en pourcentage, volumes et quantité et durées d'évènements, ainsi que le suivi temporel de la teneur en eau pour suivre de façon graphique les points critiques. Deux séries de résultats sont préparées pour chaque projet : un pour la période d'avril à octobre 2006 et un pour les périodes d'avril à octobre 2008.

2.4 Évaluation d'interception

L'interception de l'eau de pluie par une plante, quelle qu'elle soit, se retrouve en évaluant la hauteur d'eau retenue sur la couronne à un moment précis, en soustrayant de l'évènement de pluie la quantité d'eau passante (librement entre le feuillage ou par ruissellement sur la structure de la plante) et la quantité d'eau évaporée à partir de la surface de la plante. La capacité de la plante de retenir l'eau dépend de plusieurs facteurs environnementaux, comme la température et le vent, mais surtout des caractéristiques physiques de la plante et surtout de sa couronne. Dans les premiers stades d'interception au début de l'évènement de pluie, la capacité maximale de stockage de l'arbre (S) peut être exprimée selon la relation (Wang, Endreny et Nowak, 2008) :

$$S = S_L(LAI) \quad (2.6)$$

S_L a une valeur par défaut de 0,0002m et LAI est le ratio de surface de feuillage par rapport à la surface projetée au sol. Ceci donne une hauteur d'eau retenue par rapport à la hauteur

d'eau tombée, sans tenir compte des paramètres de vent et de chaleur. Les données LAI des différents arbres sont trouvées à partir des données relevées dans le **GLOBAL LEAF AREA INDEX FROM FIELD MEASUREMENTS, 1932-2000** de la NASA (Scurlock, Asner et Gower, 2001). Des nombreuses études identifiées dans la base de données, seules les nord-américaines de latitudes similaires à nos sites pour les plantes de même espèce sont retenues, soit les *Acer* (Érables) et les *Quercus* (Chênes). Il ne sera donc pas possible d'évaluer l'interception des tous les arbres plantés dans le projet du stationnement. Outre la ramure et le feuillage de l'arbre, la fréquence des événements de pluie et leur intensité peuvent avoir un impact sur le volume d'eau effectivement retenu (Wang, Endreny et Nowak, 2008).

Il est donc possible d'évaluer la différence entre certaines des espèces prévues quant à leur capacité de rétention d'eau de pluie, ou évaporation à partir de la surface du feuillage. L'interception est toutefois calculée comme un flux d'évaporation par rapport au stockage sur la couronne (Wang, Endreny et Nowak, 2008) selon la relation :

$$E = \left(\frac{C}{S}\right)^{\frac{2}{3}} E_p \quad (2.7)$$

E : Interception en m/s

E_p : évaporation potentielle (m/s)

S : Capacité de stockage (m)

C : Hauteur d'eau accumulée sur la couronne a un moment donné (m)

La capacité de stockage est établie selon la formule 2.4, et la valeur C est variable dans le temps selon les événements de pluie. Lorsque la capacité maximale de stockage est atteinte, et que $C = S$, le taux d'interception devient égal à l'évaporation potentielle. Ceci est atteignable lors de petits événements de pluie, avec un minimum de vent ou d'intensité de pluie pour conserver l'eau sur la feuille. Un autre élément variable dans le temps est la masse de feuillage d'un arbre. Les différentes références horticoles identifient des dimensions pour les arbres, en hauteur et largeur de couronne. Ces dimensions sont atteignables après plusieurs années de développement sans événement majeur (sécheresse, verglas, bris de branche, etc.) et pour les arbres à feuillage caduc, variables selon la saison. La superficie de feuillage peut se calculer à partir de la couronne ou à partir du diamètre du tronc à hauteur de poitrine. L'utilisation des valeurs de couronne a été démontrée comme plus juste que par le

diamètre de tronc, et ce peu importe l'espèce, à cause du lien plus direct entre le volume de feuillage et les dimensions de la couronne (Nowak, 1996). Le calcul de la superficie de feuillage à partir de la couronne se calcule comme suit (Nowak, 1996; Wang, Endreny et Nowak, 2008) selon la relation :

$$\ln Y = b_0 + b_1 H + b_2 D + b_3 O + b_4 C_v \quad (2.8)$$

Y : superficie de feuillage (m²)

b₀, b₁, b₂, b₃ et b₄ sont des paramètres identifiés

H : hauteur de couronne (m)

D : diamètre de couronne (m)

O : facteur d'ombre (à partir de données dans le tableau (Nowak, 1996))

C_v : valeur calculée à partir des données de la couronne ($\pi D(H+D)/2$)

Cette équation peut être utilisée pour des arbres avec des hauteurs de couronnes de 1 à 12 m et des largeurs de couronne de 1 à 14 m. De plus, le rapport de hauteur sur la largeur doit être de 0,5 à 2. Le résultat est une superficie en mètres carrés qui peut être multipliée par la capacité de stockage identifiée plus haut, pour donner un volume d'eau théorique qui peut être intercepté par l'arbre, et donc soustrait du volume d'eau total qui tombe sur le site. Cette approche simplifiée permet d'évaluer le volume possible d'interception d'une partie des arbres. Encore une fois il y a une limite sur les espèces d'arbres, cette fois-ci pour la valeur du facteur d'ombre (O). Selon les données de Nowak (1996) il sera possible d'évaluer pour les *Acer*, les *Celtis*, les *Fraxinus*, les *Juglans*, les *Quercus*, les *Tilia* et les *Gymnocladus*.

Il n'y a pas de banque de données locales pour les dimensions des arbres à différents stades de développement, laissant l'option de mesurer les spécimens qui ont été plantés ou d'utiliser les données théoriques. Étant donné la période de plantation, fin été 2009, plusieurs arbres ont souffert du manque de pluie et ont rapidement perdus une partie de leur feuillage. La mesure devenait donc difficile. En utilisant les valeurs du **RÉPERTOIRE DES ARBRES ET ARBUSTES ORNEMENTAUX** d'Hydro-Québec (Pellerin, 2005), il est possible d'estimer les superficies et volumes et d'évaluer les superficies à différents degrés de maturités.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Les situations extrêmes pour les plantes sont les temps de flétrissement et d'inondation. Autant il est nécessaire de calculer les volumes d'eau à retenir suite à un évènement de pluie d'un point de vue de l'infrastructure, autant il est important de comprendre le mouvement de l'eau dans le système pour l'approvisionnement des plantes et leur survie dans les systèmes. Pour les deux sites étudiés, les résultats obtenus ont été analysés selon deux grandes catégories, soit la saturation en eau du milieu de croissance liée aux possibilités de survie des plantes dans la cellule, et l'équilibre hydrologique général du système.

3.1 Équilibre hydrologique et saturation du milieu de croissance

Avec 182 évènements de pluie en 2006, dont 26 de 12,7 mm et plus et 160 évènements de pluie en 2008, dont 15 de 12,7 mm et plus, la quantité d'eau de ruissellement a doublé de 2006 à 2008 pour les mêmes périodes d'avril à octobre pour les deux sites.

3.1.1 Stationnement

Pour le site du stationnement, il y a trois cellules de biorétention pour un total de 372 m² pour traiter 3 401 m² de surfaces dures et gazonnées. Les tableaux qui suivent illustrent la variation de quantité d'eau qui a été retenue sur le site par la recharge du sol en place, et de quantité d'eau qui a été évacuée du système par évaporation à partir de la surface, par le drain de fond et par le trop-plein avec les débordements. Le tableau 3.1 présente les résultats en pour les deux taux d'infiltration des les trois cellules pour 2006. Le tableau 3.1 présente les résultats en pour les deux taux d'infiltration des les trois cellules pour 2008.

Pour l'année 2006, il y a 2 102 m³ d'eau dirigés vers les cellules par ruissellement. De ce volume, pour le taux d'infiltration de 5,7 cm/hr, 1 188 m³ sont conservés en place par la recharge du sol en place et dans la couche sous le substrat de plantation et 915 m³ sont

évacués du système par le drain de fond et l'évaporation. Il n'y a pas de débordement. Pour le taux d'infiltration de 0,5 cm/hr, 1 265 m³ sont conservés en place par la recharge du sol en place et dans la couche sous le substrat de plantation et 838 m³ sont évacués du système par le drain de fond, l'évaporation et lors des débordements.

Tableau 3.1 Stationnement - Bilan hydrique des cellules avril à octobre 2006
(Volumes en m³)

Volume	Identification des cellules							
	2006							
	Conductivité hydraulique 5,7 cm/hr				Conductivité hydraulique 0,5 cm/hr			
	A	B	C	Total	A	B	C	Total
Ruissellement	810	1206	86	2102	810	1206	86	2102
Débordement	0	0	0	0	93	107	0	201
Recharge	453	701	64	1218	472	729	63	1265
Évaporation	94	149	23	266	87	140	22	249
Drain de fond	273	373	3	649	156	229	2	388

Pour l'année 2008, il y a 1 021 m³ d'eau dirigés vers les cellules par ruissellement. De ce volume, pour le taux d'infiltration de 5,7 cm/hr, 689 m³ sont conservés en place par la recharge du sol en place et dans la couche sous le substrat de plantation et 333 m³ sont évacués du système par le drain de fond et l'évaporation. Il n'y a pas de débordement. Pour le taux d'infiltration de 0,5 cm/hr, 705 m³ sont conservés en place par la recharge du sol en place et dans la couche sous le substrat de plantation et 316 m³ sont évacués du système par le drain de fond, l'évaporation et lors des débordements.

Tableau 3.2 Stationnement - Bilan hydrique des cellules avril à octobre 2008
(Volumes en m³)

Volume	Identification des cellules							
	2008							
	Conductivité hydraulique 5,7 cm/hr				Conductivité hydraulique 0,5 cm/hr			
	A	B	C	Total	A	B	C	Total
Ruissellement	389	591	41	1021	389	591	41	1021
Débordement	0	0	0	0	2	0	0	2
Recharge	279	421	23	723	278	419	20	717
Évaporation	96	151	22	269	93	148	23	264
Drain de fond	27	37	0	64	20	30	0	50

En s'attardant sur les évènements de saturation du milieu de croissance, le tableau 3.3 présente la variation des évènements de saturation, de flétrissement, d'accumulation d'eau en surface et des débordements pour les deux années et les deux taux d'infiltration. Pour l'année 2006, il y a entre 3 et 27 évènements de saturation, entre 3 et 24 moments d'accumulation en surface et jusqu'à 7 débordements. Les moments de flétrissements varient de 0 à 4 selon le taux d'infiltration.

Tableau 3.3 Stationnement – Quantité d'évènements de saturation, flétrissement, d'accumulation d'eau et de débordements, avril à octobre 2006 et 2008

Quantité évènement	Identification des cellules											
	2006						2008					
	Conductivité hydraulique 5,7 cm/hr			Conductivité hydraulique 0,5 cm/hr			Conductivité hydraulique 5,7 cm/hr			Conductivité hydraulique 0,5 cm/hr		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Saturation	21	20	3	27	27	20	4	3	0	19	16	4
Flétrissement	3	3	4	0	0	0	2	1	7	0	0	0
Accumulation	8	7	3	23	24	15	2	1	0	14	15	2
Débordement	0	0	0	7	7	0	0	0	0	1	1	0

Pour l'année 2008, il y a jusqu'à 19 évènements de saturation, jusqu'à 15 moments d'accumulation en surface et un seul évènement de débordement. Il y a entre jusqu'à 7 moments de flétrissements selon la conductivité hydraulique.

3.1.2 Commerces

Pour le site des commerces, il y a huit cellules de biorétention pour un total de 1 024 m² pour traiter 9 286 m² de surfaces imperméables. Les graphiques qui suivent illustrent la variation de quantité d'eau qui a été retenue sur le site par la recharge du sol en place, et de quantité d'eau qui a été évacuée du système par évaporation à partir de la surface, par le drain de fond et par le trop-plein avec les débordements. Le tableau 3.4 présent les résultats en ordre chronologique pour les deux taux d'infiltration.

Pour l'année 2006, il y a 6 936 m³ d'eau dirigée vers les cellules par ruissellement. De ce volume, pour le taux d'infiltration de 5,7 cm/hr, 2 334 m³ sont conservés en place par la recharge du sol en place et dans la couche sous le substrat de plantation et 4 602 m³ sont évacués du système par le drain de fond, l'évaporation et les débordements. Pour le taux d'infiltration de 0,5 cm/hr, 2 670 m³ sont conservés en place par la recharge du sol en place et dans le couche sous le substrat de plantation et 4 626 m³ sont évacués du système par le drain de fond, l'évaporation et lors des débordements.

Tableau 3.4 Commerces - Bilan hydrique des cellules, avril à octobre 2006
(Volumes en m³)

Volume	Identification des cellules																	
	Conductivité hydraulique 5,7 cm/hr								Conductivité hydraulique 0,5cm/hr									
	A	B	D	E	F	G	H	I	TOTAL	A	B	D	E	F	G	H	I	TOTAL
Ruissellement	586	480	377	1275	914	2086	418	436	6572	586	480	377	1275	914	2086	418	436	6572
Débordement	2	1	0	6	4	0	2	2	17	138	107	41	306	221	68	100	104	1085
Recharge	171	144	140	370	265	935	122	127	2273	199	166	156	430	308	986	141	147	2533
Évaporation	46	39	43	100	71	336	33	34	704	41	35	40	89	63	321	29	30	648
Drain de fond	369	298	197	805	578	835	264	275	3622	207	171	140	448	321	705	147	153	2292

Le tableau 3.5 présente les résultats de l'année 2008. Il y a 3 448 m³ d'eau dirigée vers les cellules par ruissellement. De ce volume, pour le taux d'infiltration de 5,7 cm/hr, 1 486 m³ sont conservés en place par la recharge du sol en place et dans la couche sous le substrat de plantation et 3 448 m³ sont évacués du système par le drain de fond et l'évaporation. Il n'y a pas de débordement. Pour le taux d'infiltration de 0,5 cm/hr, 1 653 m³ sont conservés en place par la recharge du sol en place et dans le couche sous le substrat de plantation et 1 795 m³ sont évacués du système par le drain de fond, l'évaporation et lors des débordements.

Tableau 3.5 Commerces - Bilan hydrique des cellules pour les deux taux d'infiltration, avril à octobre 2008 (Volumes en m³)

Volume	Identification des cellules																	
	Conductivité hydraulique 5,7 cm/hr									Conductivité hydraulique 0,5cm/hr								
	A	B	D	E	F	G	H	I	TOTAL	A	B	D	E	F	G	H	I	TOTAL
Ruissellement	291	238	188	634	454	1037	208	217	3267	291	238	188	634	454	1037	208	217	3267
Débordement	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	12	2	39	29	0	13	13	125
Recharge	119	99	90	258	184	539	85	88	1462	135	112	94	293	210	522	96	100	1561
Évaporation	47	40	44	102	73	339	33	35	712	44	38	42	95	68	337	31	33	689
Drain de fond	128	102	57	281	202	181	92	96	1141	94	76	50	205	147	176	67	70	885

En s'attardant sur les événements de saturation du milieu de croissance, les tableaux 3.6 et 3.7 montrent la variation des événements de saturation, de flétrissement, d'accumulation d'eau en surface et des débordements pour les deux années et les deux taux d'infiltration. Pour l'année 2006, il y a entre 11 et 34 événements de saturation, entre 4 et 33 moments d'accumulation en surface et jusqu'à 12 débordements. Il y a jusqu'à 3 moments de flétrissements selon la conductivité hydraulique.

Tableau 3.6 Commerces - Quantité d'évènements de saturation, flétrissement, d'accumulation d'eau et de débordements dans les cellules, avril à octobre 2006

Quantité évènement	Identification des cellules															
	Conductivité hydraulique 5,7 cm/hr								Conductivité hydraulique 0,5cm/hr							
	A	B	D	E	F	G	H	I	A	B	D	E	F	G	H	I
Saturation	33	33	22	34	34	11	34	34	28	28	29	28	28	21	28	28
Flétrissement	1	1	1	1	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Accumulation	21	20	8	20	19	4	20	20	32	33	25	31	30	24	31	31
Débordement	1	1	0	1	1	0	1	1	12	12	8	12	12	2	12	12

Pour l'année 2008, il y a entre 2 et 25 évènements de saturation, entre 1 et 29 moments d'accumulation en surface et jusqu'à 7 débordements. Il y a aussi jusqu'à 3 moments de flétrissements selon la conductivité hydraulique.

Tableau 3.7 Commerces - Quantité d'évènements de saturation, flétrissement, d'accumulation d'eau et de débordements dans les cellules, avril à octobre 2008

Quantité évènement	Identification des cellules															
	Conductivité hydraulique 5,7 cm/hr								Conductivité hydraulique 0,5cm/hr							
	A	B	D	E	F	G	H	I	A	B	D	E	F	G	H	I
Saturation	11	11	5	11	11	2	11	11	25	24	19	25	25	14	25	25
Flétrissement	1	1	1	1	1	3	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Accumulation	5	6	1	7	7	1	7	7	28	27	15	28	29	13	28	29
Débordement	0	0	0	0	0	0	0	0	4	3	1	7	7	0	7	7

3.2 Variation de l'eau dans les cellules

Pour le site du stationnement, le volume d'eau de ruissellement est diminué de plus de la moitié entre 2006 et 2008, passant de 810 m³ à 389 m³ pour la cellule A, de 1 206 m³ à 591m³ pour la cellule A et de 86 à 41 m³ pour la cellule C. Ceci a des incidences importantes pour les volumes débordement, recharge et dans le drain de fond, avec des variations jusqu'à 100% d'une année à l'autre. Les volumes d'eau évaporés varient le moins, avec entre 1 et 7% (soit 0,8 m³ à 5,7 m³) de variation selon la cellule et la conductivité hydraulique (voir tableau

3.1). Ce phénomène s'explique par la méthode de calcul d'évaporation du modèle qui se restreint à une évaluation de la teneur de l'eau dans le sol en volume (voir chapitre 2). Étant donné que la superficie et l'épaisseur des cellules ne varient pas dans le temps, les résultats sont similaires. Le peu de différence est attribuable à la conductivité hydraulique du substrat de plantation et donc la capacité de rétention du volume de terre en surface qui pourra être évaporée. Toutefois, en réalité la couche supérieure de la cellule est le paillis. Cette donnée n'est pas prise en considération par le modèle fort probablement par le manque de données de conductivité hydraulique de ce matériau. RECARGA utilise le classement SCS pour les textures de sol, soit de plantation, de recharge ou en place, mais de toute la littérature consultée il n'y a pas mention de conductivité hydraulique du paillis. Pourtant, à 10 cm d'épaisseur sur l'épaisseur totale de 1,1 m pour la construction des cellules du stationnement, le paillis a une capacité de rétention. Dans le cas du stationnement, c'est un paillis de bois raméal fragmenté (BRF). Fait à partir de branches déchiquetées, il y a quand même des morceaux de branches plus grossiers en plus de l'écorce et des feuilles. Cet aspect n'a pas été étudié dans la présente recherche.

La cellule C est celle qui a le moins d'activité en termes de volume d'eau et la cellule B est celle qui en a le plus, comme le démontre les tableaux 3.1 et 3.2. Pour des situations similaires (pourcentage de superficie imperméable et éléments de construction), les cellules A et C se démarquent pour leurs résultats opposés par rapport à la saturation en eau des milieux de croissance et la relation est similaire pour les résultats avec le taux d'infiltration de 5,7 cm/hr qu'avec le taux de 0,5 cm/hr tant en 2006 qu'en 2008. Les conditions extrêmes de sécheresse et d'eau sont les points critiques de survie des plantes. Aucune des cellules n'affiche un temps d'accumulation en surface de plus de 48 heures, elles respectent donc les conditions visées pour ce point. En ce qui concerne le flétrissement, il est inexistant avec le taux d'infiltration inférieur, et ce peu importe l'année. Pour le taux plus rapide, il y a plus de d'évènements de flétrissement pour les cellules A et B en 2006, et moins pour la cellule C en 2008. Dans tous les cas, il y a un risque pour les plantes si le temps de flétrissement dure. C'est la cellule C qui a, pour les deux années, le temps maximal et le temps total le plus élevé des trois cellules. Ceci pourrait s'expliquer par son ratio de superficie par rapport à celle de

traitement. En s'attardant au volume d'eau qui se rend au drain, on remarque que l'on trouve à peine $2,94 \text{ m}^3$ (sur un volume total de $86,34 \text{ m}^3$) ou $3,4 \%$ en 2006, comparativement à $33,7$ et $30,9 \%$ du volume entrant pour les cellules A et B respectivement. En 2008 il n'y a pas d'eau qui se rend jusqu'au drain pour la cellule C. Le volume de terre de plantation est donc trop important pour le volume d'eau entrant. Le comportement des plantes devra être observé, car il y a un risque de difficulté de croissance.

Pour le site des commerces, il y a un total de $1\,024 \text{ m}^2$ de cellules pour $9\,286 \text{ m}^2$ de surface imperméable et gazonnée à traiter pour les eaux de ruissellement. Tout comme pour le stationnement, la quantité d'eau de ruissellement qui entre dans les cellules diminue de moitié entre 2006 et 2008, soit de $6\,936 \text{ m}^3$ à $3\,447 \text{ m}^3$ respectivement pour l'ensemble des cellules.

Les cellules F et G se démarquent pour leurs résultats opposés par rapport à la saturation en eau des milieux de croissance et la relation est similaire pour les résultats avec le taux d'infiltration de $5,7 \text{ cm/hr}$ et celui de $0,5 \text{ cm/hr}$ tant en 2006 qu'en 2008. Les cellules A, F et G se démarquent pour les plus grandes différences entre les deux taux d'infiltration pour 2006, mais uniquement les cellules F et G pour 2008. Les cellules B et D sont celles où il y a le moins de situations extrêmes dans les deux cas. Pour des situations similaires (pourcentage de superficie imperméable, couches et épaisseur de cellule), la différence entre les cellules F et G peut s'expliquer par le ratio de superficie de cellule versus la superficie de traitement, $7,9 \%$ et $17,9 \%$ respectivement. À 100 et 470 m^2 respectivement, le rapport du volume de substrat sur le volume d'eau entrant double d'une cellule à l'autre.

Pour les deux projets, les risques de flétrissement sont presque nuls avec une conductivité hydraulique plus faible. Le temps maximal d'accumulation en surface, paramètre important pour les plantes, dépasse les 48 heures recommandées dans les manuels techniques pour ce même substrat lors de l'année plus pluvieuse, allant jusqu'à $77,3$ heures (voir tableau 3.8). Pour le site des commerces, les résultats indiquent que les temps d'inondation des plantes est plus important avec des temps maximums de 69 à $106,3$ heures d'accumulation en surface.

Ceci est attribuable au fait qu'il n'y a pas de zone de recharge sous la terre de plantation et que le taux d'infiltration du sol en place n'est pas assez rapide.

Tableau 3.8 Stationnement – Nombre d'heures en temps total (TTotal) et en temps maximal (TMax) dans la zone racinaire (ZR), d'accumulation et de débordement, avril à octobre 2006 et 2008

Temps en heures	Identification des cellules											
	2006						2008					
	Conductivité hydraulique 5,7 cm/hr			Conductivité hydraulique 0,5 cm/hr			Conductivité hydraulique 5,7 cm/hr			Conductivité hydraulique 0,5 cm/hr		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
TTotal - Accumulation	10	9	0	668	634	154	2	2	0	224	206	7
TTotal - Saturation ZR	69	62	4	854	810	329	11	10	0	323	299	32
TTotal - Flétrissement ZR	41	43	167	0	0	0	82	90	806	0	0	0
TMax - Accumulation	5	4	0	77	77	35	2	2	0	41	41	4
TMax - Saturation ZR	16	14	3	82	82	40	8	8	0	47	47	14
TMax - Flétrissement ZR	31	31	79	0	0	0	77	90	251	0	0	0

À noter que les résultats complets cumulatifs des deux sites se retrouvent à l'annexe V du document.

3.2.1 Ratio des superficies des cellules

Comme il a été présenté plus haut, les cellules ayant le plus de d'évènements de flétrissement et le moins de saturation de la zone racinaire ou d'accumulation en surface sont les cellules avec le plus grand ratio de superficie de la cellule pour la superficie de surface de traitement. Les figures 3.1 et 3.2 illustrent la variation de ces évènements, soit en quantité ou en temps, par rapport à ce pourcentage de superficie pour les deux années et les deux taux d'infiltration pour les deux sites.

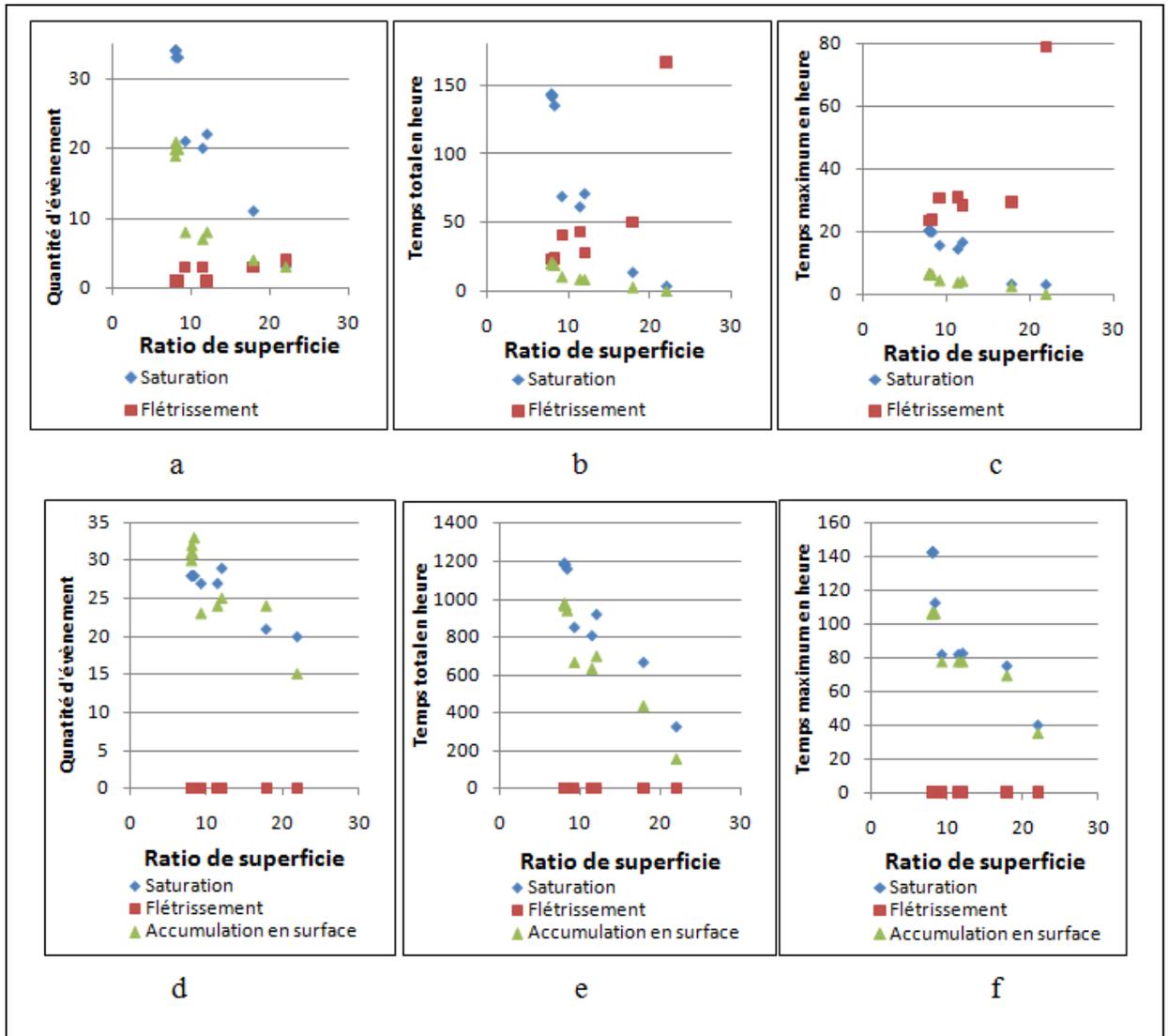


Figure 3.1 Variation en fonction du ratio de superficie de la cellule et de la surface de traitement pour la conductivité hydraulique 5,7 mm/hr (a, b et c) et pour la conductivité hydraulique 0,5 mm/hr (d, et et f) Avril à octobre 2006.

Pour 2006 et 2008, la différence la plus importante entre les deux séries de données est qu'il n'y a aucun flétrissement pour le taux d'infiltration le plus bas.

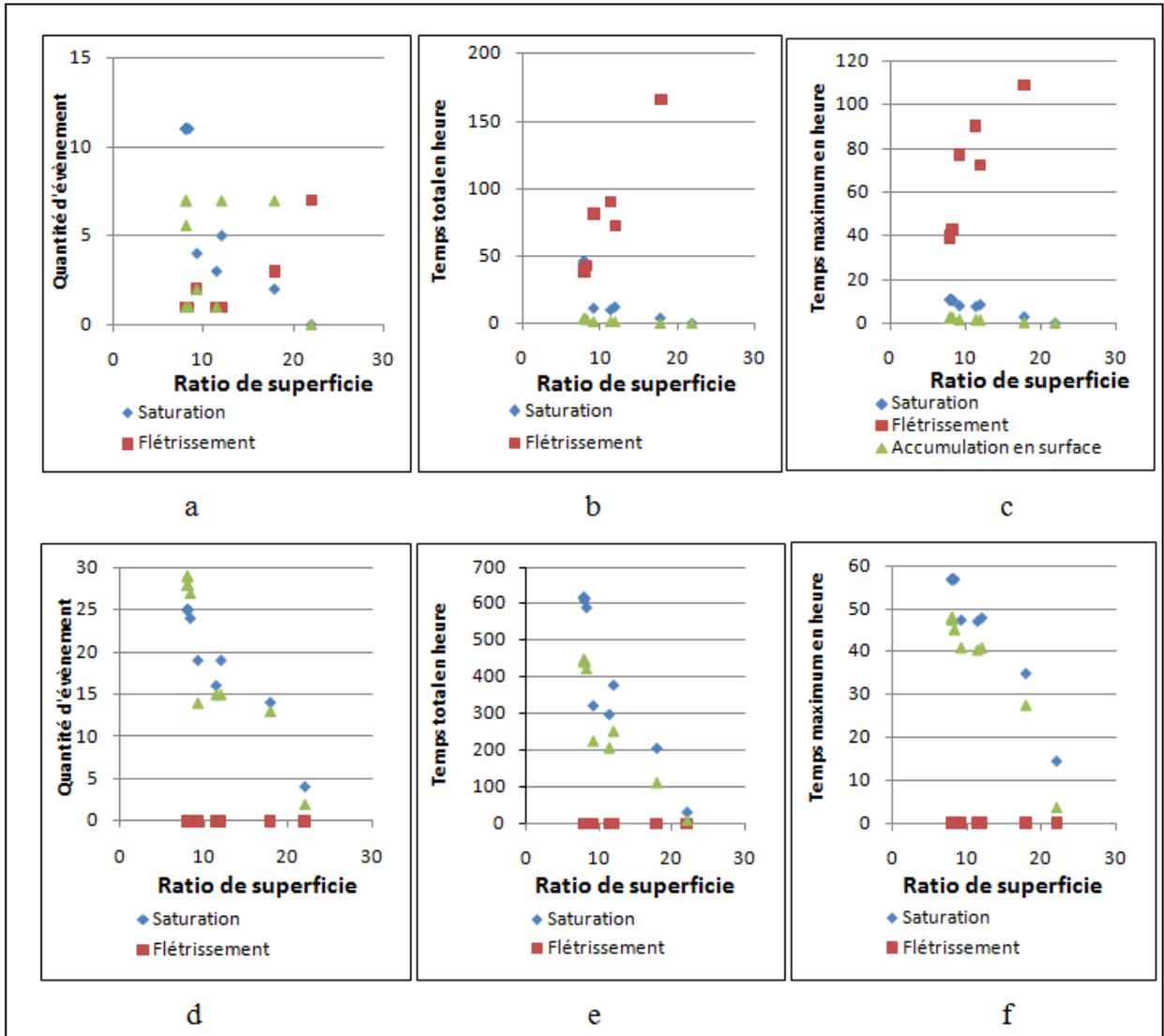


Figure 3.2 Variation en fonction du ratio de superficie de la cellule et de la surface de traitement pour la conductivité hydraulique 5,7 mm/hr (a, b et c) et pour la conductivité hydraulique 0,5 mm/hr (d, et et f) Avril à octobre 2008.

Le temps total et maximal d'accumulation en surface et de saturation est inversement proportionnel au pourcentage du ratio de la cellule, comme on peut le remarquer sur les figures d, e et f. La dynamique est la même pour le taux d'infiltration le plus élevé, à l'exception du flétrissement. Ce dernier augmente avec le ratio. On peut remarquer aussi que les comportements sont similaires pour les deux sites, alors que les 3 cellules du stationnement ont une zone d'accumulation de 40 cm sous la terre de plantation et celles des commerces n'en ont pas.

3.2.2 Sensibilité du modèle – du système

Des différents éléments de conception qui peuvent varier dans la planification d'une cellule, les points critiques sont souvent la hauteur d'accumulation d'eau et la hauteur de substrat de plantation. La différence entre la conception des cellules du stationnement et du site des commerces le démontre. Une analyse de sensibilité du modèle à partir de la cellule A pour le site du stationnement permet une comparaison plus directe des différents paramètres. Les paramètres étudiés sont l'épaisseur du substrat de plantation (30, 60, 90 et 120 cm); la conductivité hydraulique du substrat de plantation; l'épaisseur du matériaux< sous la plantation (0, 40 et 80 cm) et finalement les trois dernières séries sont une variation du diamètre du drain (0, 100, 200 et 300 mm). En faisant varier ces paramètres de la construction, ce sont la conductivité hydraulique du sol et la présence d'un drain de fond qui ont le plus d'impact pour le rendement en temps que système pluvial que de la possibilité de survie des plantes.

Les figures 3.3 et 3.4 illustrent respectivement les différences de variation dans les quantités d'évènements et de temps maximal en heures pour les cellules selon l'année et le paramètre changeant. À noter que la cellule de référence est identifiée par l'épaisseur de substrat de 60 cm, qui représente la cellule telle que construite dans le stationnement. D'un premier coup d'œil, les résultats sont identiques peu importe la dimension du drain, en terme de quantité d'évènements pour 2006 et 2008, mais avec une variation du temps maximal de saturation de la zone racinaire. Ne pas inclure de drain dans le système annule les évènements de flétrissement pour 2006, mais donne le même résultat pour l'année avec moins de pluie (voir les figures 3.3a et 3.4a).

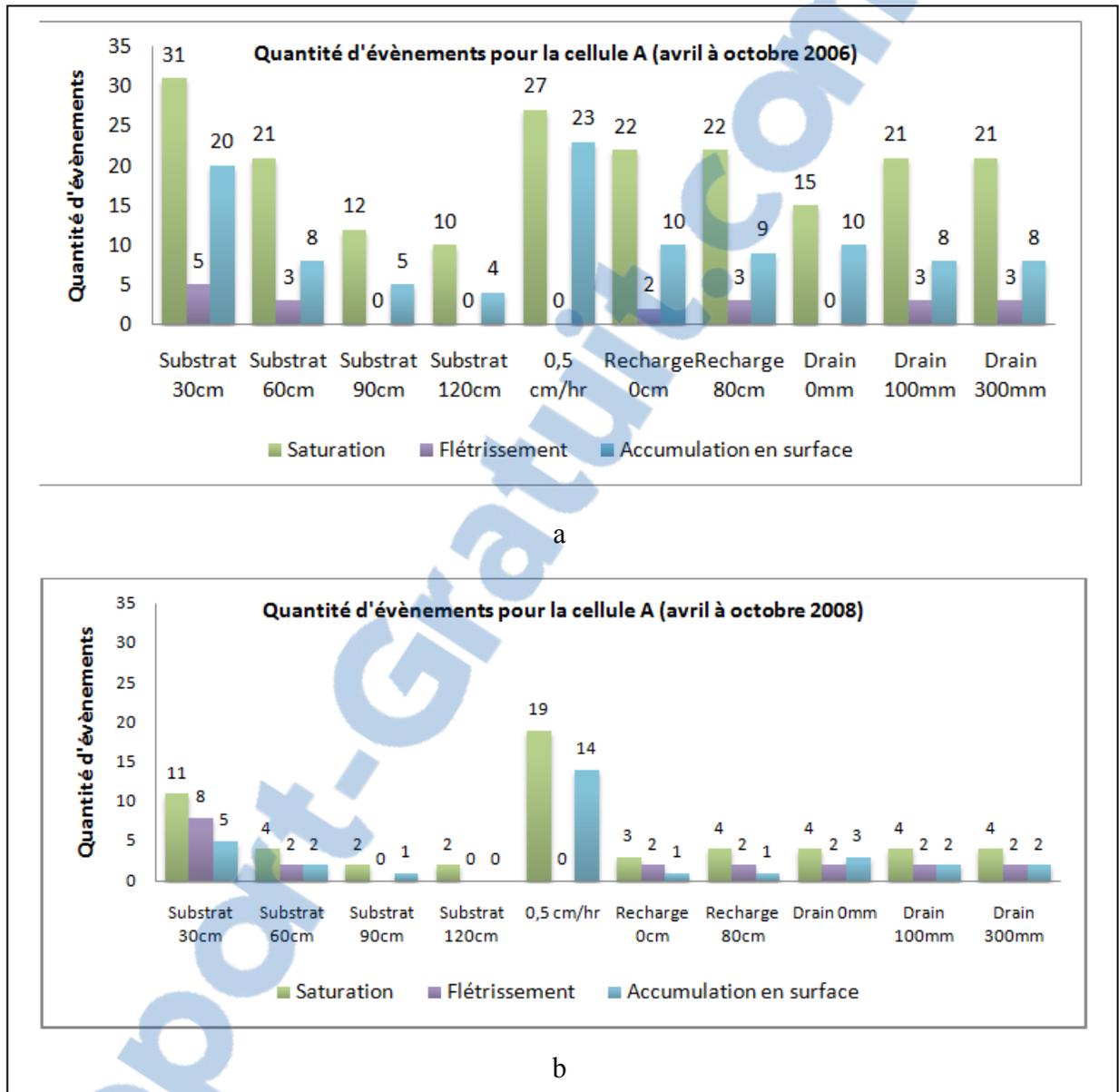


Figure 3.3 Cellule A (Stationnement) – Variation de la quantité d'évènements de saturation et flétrissement dans la zone racinaire, d'accumulation d'eau en surface selon la modification des paramètres de conception, pour les années 2006 (a) et 2008 (b).

La plus grande différence est dans le temps maximal des évènements (voir les tableaux 3.3b et 3.4b), où l'absence de drain entraîne des temps d'accumulation d'eau en surface beaucoup plus importante, dépassant largement les 48 heures prescrits avec des temps de 198,4 et 81,5 heures pour les années 2006 et 2008 respectivement. Le drain est recommandé pour éviter des accumulations d'eau dans le sol au moment du gel et permettre une infiltration

même l'hiver. Augmenter le diamètre ne donne aucun avantage au système sauf s'il doit recevoir l'eau des trop-pleins. La recommandation du manuel du Vermont est donc discutable pour son utilité tant au niveau hydrologique que pour la survie des plantes.

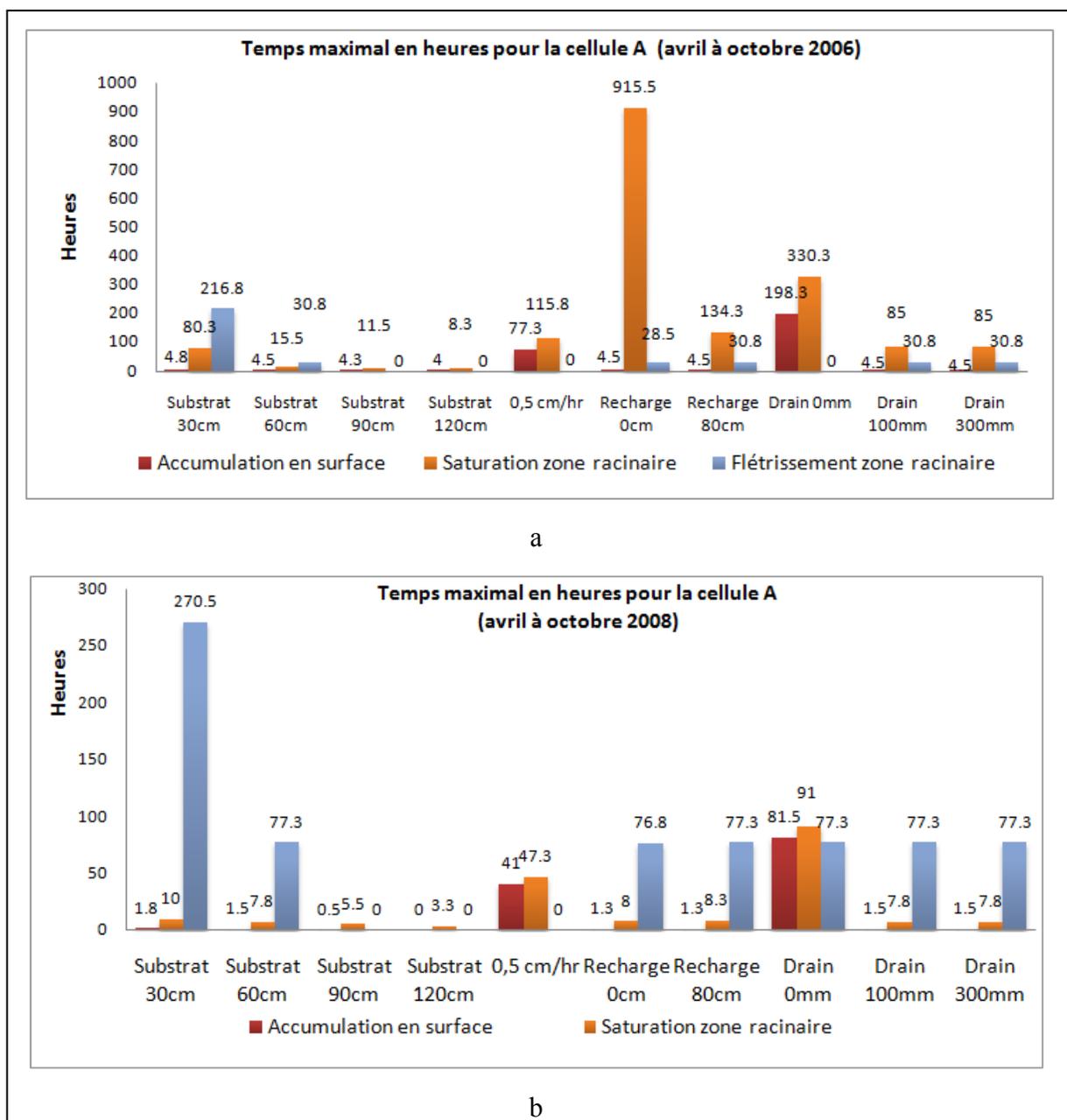


Figure 3.4 Cellule A (Stationnement) – Variation du temps maximal en heures de saturation et flétrissement dans la zone racinaire, d'accumulation d'eau en surface selon la modification des paramètres de conception, pour les années 2006 (a) et 2008 (b).

Par rapport au substrat de plantation, les quatre premières séries démontrent pour les deux années une réduction de tous les événements en augmentant l'épaisseur de la couche du matériel de plantation. La première série se démarque surtout pour les heures maximales de flétrissement qui sont les plus élevées de toutes les séries. La quatrième série, avec une épaisseur de substrat de 120 cm, est celle qui obtient les résultats les plus bas autant en événement qu'en temps. Il faut noter que cette épaisseur de plantation n'est pas recommandée dans la norme de plantation NQ0605-100 (Bureau de Normalisation du Québec, 2001) pour éviter des affaissements des mottes et qu'il y ait de l'humidité en permanence autour du tronc.

L'épaisseur de 60 cm reste le plus recommandable pour l'exécution, avec une modification du choix du substrat pour la conductivité hydraulique. La cinquième série, avec une conductivité de 0,5 cm/hr n'a donc pas de flétrissement, mais un temps maximal d'accumulation en surface dépassant la recommandation à 77,3 heures et à la limite avec 41 heures pour 2008.

La présence ou non d'une zone d'accumulation sous le terreau de plantation amène un minimum de variation au niveau des quantités d'événements pour les deux années, et des rendements similaires pour les temps maximal pour l'année 2008, année avec moins de précipitation (figures 3.3 a et 3.3 b). Sans cette zone, la cellule a un temps maximal de saturation beaucoup plus important que la cellule de référence pour 2006 (figure 3.4 a). Sans zone d'accumulation ou en doublant son volume, soit 80 cm, la saturation de la zone racinaire est plus importante qu'avec 40 cm.

Le taux de conductivité hydraulique a aussi un impact remarqué sur la teneur en eau. Tous les essais de la recherche ont comparés les valeurs extrêmes obtenues par le laboratoire (0,5 cm/hr et 5,7 cm/hr). Les quantités d'événements de saturation et d'accumulation en surface sont largement plus élevées pour l'année 2008. La différence est moins marquée pour 2006. La durée de ces événements est ce qui marque le plus. Avec 0,5 cm/hr le temps maximal est supérieur à la recommandation de 48 heures pour 2006, mais étant quarante fois plus élevée

en 2008. Une comparaison de 8 taux de conductivité hydraulique variant de 0,25 cm/hr à 10 cm/hr a démontré que l'accumulation en surface et le flétrissement augmente avec le taux d'infiltration, et que les quantités de débordements est inversement proportionnel au taux. Le flétrissement apparaît à partir de 5,7 cm/hr. Les taux de 2,5 cm/hr et moins permettent de respecter la barrière de 48 heures d'accumulation maximale en augmentant de 36 à 80 heures pour une diminution de 1 cm/hr. Les essais ont été fait pour l'année 2006 et en conservant la valeur d'infiltration du sol en place, soit 0,18 cm/hr).

La différence de la saturation de la zone racinaire peut s'observer dans le temps sur la période étudiée. La figure 3.5 illustre la variation de la teneur en eau dans cette zone pour la cellule A. Comme identifié dans le 3.3 b, il y a 4 évènements de saturation pour le mélange A1 (5,7 cm/hr), et 19 pour le mélange A2 (0,5 cm/hr). Les pentes d'augmentation et surtout de perte sont similaires peu importe le mélange, étant reliés à la quantité et intensité des évènements de pluie.

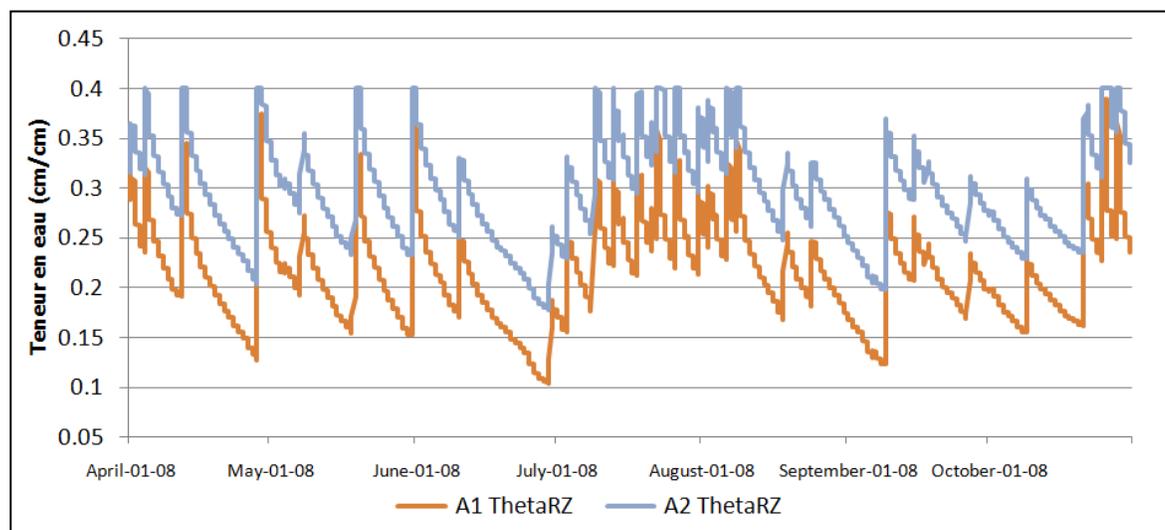


Figure 3.5 Cellule A (Stationnement) – Variation de la teneur en eau de la zone racinaire (RZ) pour les deux taux de conductivité hydraulique pour l'année 2008.

En se référant à la figure 1.8 de la revue de littérature, la variation de la teneur en eau de la zone racinaire (le substrat de plantation) chute sous la valeur de 0,15 trois fois atteignant un seuil de flétrissement permanent pour le mélange à 5,7 cm/hr et deux fois à 0,2 et moins pour

le mélange à 0,5 cm/hr. La variation de conductivité hydraulique étant tributaire de la texture du substrat, la différence de valeur de point de flétrissement est attendue. À noter que le modèle RECARGA n'inclut pas le paramètre du paillis, comme mentionné plus tôt, qui aurait une influence sur la rétention d'eau dans la cellule. Il y a aussi le volume des mottes de terre des végétaux plantés. Pour les vivaces et les arbustes, cela peut représenter un petit volume (pots de 10 cm, 1 litre, 1 à 2 gallons). Dans le cas des arbres cela peut représenter des volumes de l'ordre de 0,15 à 1 m³ selon le calibre de plantation. Les terreaux utilisés pour la production des plantes sont ajoutés au volume de terre de plantation, changeant la nature générale du sol et son comportement hydraulique. Une motte de plantation essentiellement sablonneuse n'aura pas le même impact qu'une motte plus limoneuse, avec une capacité de rétention d'eau plus importante.

Les paramètres d'évapotranspiration sont étudiés autant dans la base de données initiale que dans les informations de base pour l'évaluation individuelle d'une cellule. En reprenant la configuration de cellule de référence A et faisant varier cette valeur dans la boîte de dialogue de base, les valeurs sont inchangées pour les résultats d'évènements et d'heures de saturation, flétrissement ou accumulation en surface. Même en multipliant la valeur de 0,139 cm/j par 10 les résultats sont inchangés. En doublant la valeur de l'évapotranspiration dans la base de données annuelle, il y a une augmentation systématique et considérable des périodes et quantités de flétrissement de la plante. Il y a 4 évènements de flétrissement de plus et un temps maximal de 198,3 heures conduisant à des pertes potentielles de végétaux. Toutefois, la valeur maximale de 30,8 heures de la cellule de référence plus d'une journée, mais avec des possibilités de survie en prenant en considération les limites du modèle (paillis, terre de la motte). À noter que les volumes de recharge, de drain et d'évapotranspiration sont presque les mêmes, et les débordements sont inchangés. Étant donné le critère de conception établi dans la littérature pour la survie des plantes est un temps d'inondation 48 heures, le problème de flétrissement n'aurait peut-être pas été décelé.

3.2.3 Résultats observés au site du stationnement

Une observation des végétaux, spécifiquement les arbres, a eu lieu à différents moments de la saison de croissance 2010. La majorité des arbres ont eu un comportement qui pourrait être identifié comme normal par rapport aux végétaux existants environnants. Il n'y a pas eu de retard dans le débournement des bourgeons et ils ont rapidement atteint leur capacité maximale de feuillage attendue.

Des visites mensuelles du mai à septembre permettent de constater que les arbres se développent selon les attentes de nouvelles plantations. Ils ont tous survécus à l'hiver, ont débourré avec un feuillage au même rythme que la végétation environnante. Comme il se voit sur la liste de plantation, certaines espèces ont été plantés à la fois dans les cellules et en périphérie. Il n'y a pas de comportement différent observés entre les espèces dans les cellules et ceux dans les surfaces gazonnées. La couleur et la quantité de feuillage est similaire (mais n'ont pas été calculés) et il n'y a pas eu de perte. Cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas eu des moments importants de stress pour les arbres, surtout pour les questions de flétrissement. Les données météorologiques de la station Saint-Hubert pour 2009, couvrant la période suivant la plantation au mois d'août donne une hauteur de pluie de 204 mm, soit du même ordre que pour 2008. Les données ne sont pas encore disponibles pour 2010, mais les données pour Montréal indiquent 351,8 mm d'avril à juillet, soit aussi du même ordre que pour 2008. Sachant que l'entretien habituel à la suite de plantation du genre demande un arrosage régulier pendant au moins les douze mois suivant la mise en place, le peu de précipitations observées pour 2010 ajoute un stress aux végétaux. Un suivi pendant les prochaines années permettra d'observer les différences dans le développement des spécimens. L'entretien des plantations a été organisé par le service d'entretien des parcs et des espaces verts de la Ville, et selon les informations obtenues il n'y a pas eu d'arrosage additionnel sur les plantations. L'*Acer rubrum* a montré des signes de stress à quelques reprises, mais celui qui a éprouvé le plus de difficulté est le *Celtis occidentalis*. Les photos de la figure 3.6 ont été prises au mois de mai et août pour un spécimen situé à l'extérieur des cellules. Il y a un changement de couleur marqué, indiquant une situation de stress, mais la quantité de feuillage n'a pas

diminué durant la saison. L'arbre n'as donc pas subit de difficulté d'une durée trop longue ou d'une variation marquée de la teneur en eau.



Figure 3.6 Photos d'un *Celtis occidentalis* situé à l'extérieur des cellules de biorétention au site du stationnement, mai (a) et août (b) 2010.

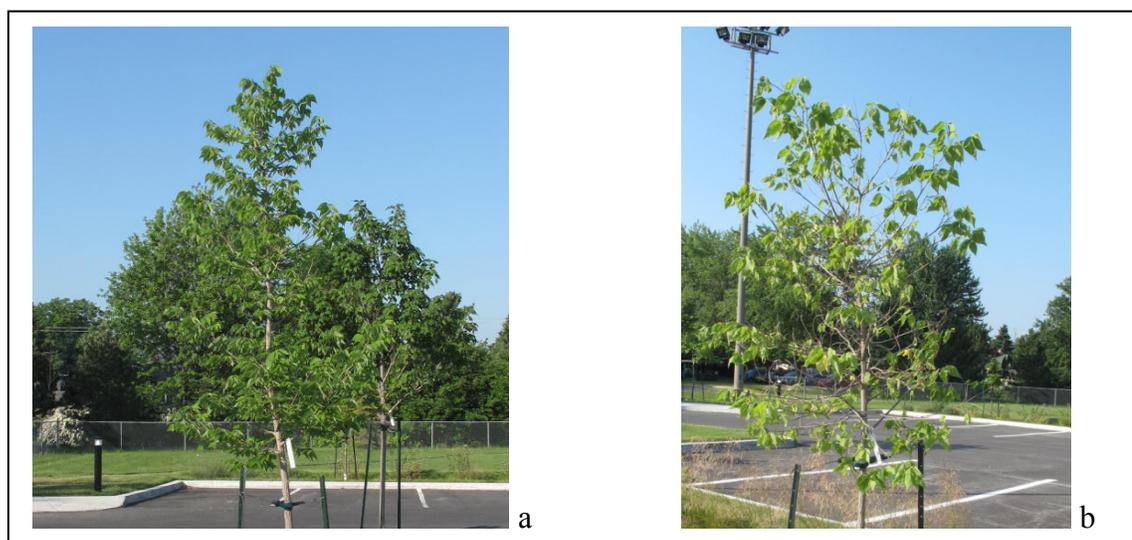


Figure 3.7 Photos d'un *Celtis occidentalis* situé à l'intérieur des cellules de biorétention au site du stationnement, mai (a) et août (b) 2010.

La figure 3.7 illustre des photos prise aux mêmes moments de la saison, mais pour un spécimen situé dans la cellule de biorétention. Le changement de couleur est similaire à

l'arbre de la figure 3.6, mais la diminution de feuillage est apparente sans devoir le calculer. Cet arbre a subi un stress hydrique, et un suivi serré sera nécessaire.

Ceci permet de conclure que la spécificité des espèces a un rôle important à jouer dans le choix des plantations pour ce type d'aménagement. Dans les deux cas, il y a un stress hydrique évident, mais celui planté dans la cellule a beaucoup plus souffert que celui à l'extérieur. Ceci laisse aussi croire que la conductivité hydraulique du substrat de plantation est relativement élevée, se rapprochant du 5,7 cm/hr, et que les résultats de laboratoires fait à partir des relevés sur le site sont probablement les plus justes.

3.3 Interception des arbres

L'interception des arbres est évaluée suivant différents paramètres identifiables pour chaque espèce et plusieurs facteurs climatiques. Il est possible d'estimer le volume d'eau intercepté à partir de la superficie du feuillage et de la hauteur d'eau pouvant être accumulée en surface.

3.3.1 Superficie de feuillage

À partir des données de hauteur et de largeur d'arbre, la superficie de feuillage anticipée à 50 % de développement de l'arbre varie de 117,5 m² pour le micocoulier (*Celtis occidentalis*) à 761,1 m² pour le noyer noir (*Juglans nigra*). La figure 3.7 illustre l'évolution de la superficie totale du feuillage en fonction du pourcentage de la croissance de la plante pour 9 variétés d'arbres.

Par ordre croissant, le *Celtis occidentalis* est donc le moins volumineux, suivi du *Gleditsia* avec 126,3m², le *Fraxinus* avec 256,8 m², le *Quercus bicolor* avec 293,3 m², l'*Acer rubrum* avec 328m², le *Gymnocladus dioicus* avec 359,2 m², le *Quercus rubra* avec 369,9 m², le *Tilia americana* avec 572,9 m² et finalement le *Juglans nigra*.

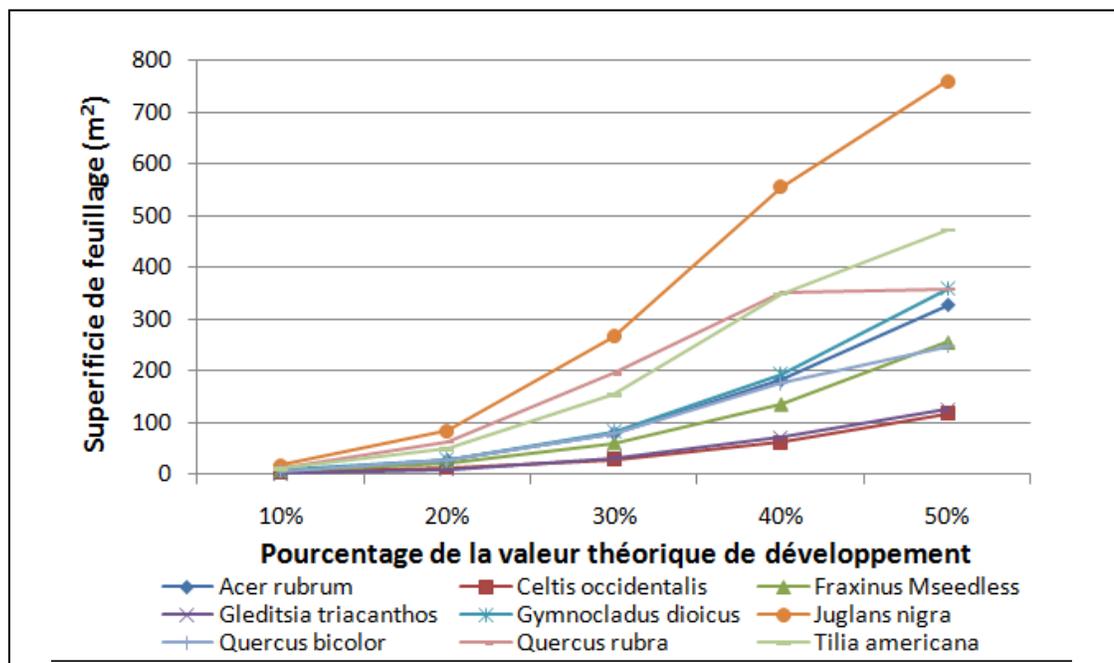


Figure 3.8 Évolution de la superficie des arbres en fonction du pourcentage de la dimension des espèces selon les valeurs théoriques.

La marge d'erreur se limite essentiellement au manque de base de données pour les dimensions d'arbres. Peu d'ouvrages techniques présentent les deux valeurs (hauteur et diamètre de couronne) nécessaire pour calculer les valeurs de biomasse de feuillage. Le peu de données trouvées ne considère pas le dégagement du feuillage à partir du sol. Seuls les arbustes, ou les formes plus arbustives d'arbres avec du feuillage sur toute la hauteur peuvent considérer d'utiliser les valeurs théoriques. En soustrayant 2 m de la hauteur de couronne (Kenney, 2008), le résultat peut être modifié considérablement. Le graphique ci-dessous illustre des variations allant de 11 m² pour le *Quercus rubra* à 100 m² pour le *Tilia americana*. Ceci représente des réductions de volume d'interception de 17,2 % à 19,7 % pour le site du stationnement et des commerces respectivement, et donc un impact sur la quantité d'eau accessible dans les zones d'accumulation des cellules. Il faut souligner que la figure 3.7 n'est pas une courbe temporelle, mais une évaluation de la superficie selon des pourcentages des valeurs théoriques des dimensions. Les plantes ne se développent pas au même rythme et les courbes n'auraient certainement pas la même allure.

3.3.2 Accumulation sur le feuillage

En utilisant la moyenne des valeurs LAI de la base de données de la NASA (Scurlock, Asner et Gower, 2001), les capacités d'accumulation en surface de feuille, ou stockage, sont calculées. Les chênes vont intercepter les premiers 0,91 mm d'une pluie et les érables les premiers 1,06 mm de chacun des évènements de pluie. Pour l'année 2006, 182 évènements de pluie sont enregistrés dont 8 ont moins de 0,91 mm de hauteur d'eau et 17 ont moins de 1,06 mm. Les chênes et érables vont donc intercepter la totalité de 8 et 17 évènements respectivement, pour une hauteur d'eau de 7,3 et 18,3 mm respectivement. Pour 2008, avec moins d'évènements de pluie et surtout moins de quantité de pluie en moyenne pour les évènements relevés, ceci représente 20 et 29 évènements pour une hauteur d'eau de 15,8 et 39,4 mm respectivement.

3.3.3 Taux d'interception

La dernière évaluation de l'interception des arbres est en le traitant comme un taux d'interception en fonction de la précipitation. L'eau interceptée sera évaporée par la suite. En prenant en exemple la période du 1^{er} juin à la fin octobre 2006, le taux d'interception atteint son maximum lorsque le rapport C/S est égal à 1. Ceci se présente 35 fois pour l'érable (acer) et 39 fois pour le chêne (quercus). Le graphique qui suit illustre la différence du taux d'interception pour 3 évènements de pluie en juin.

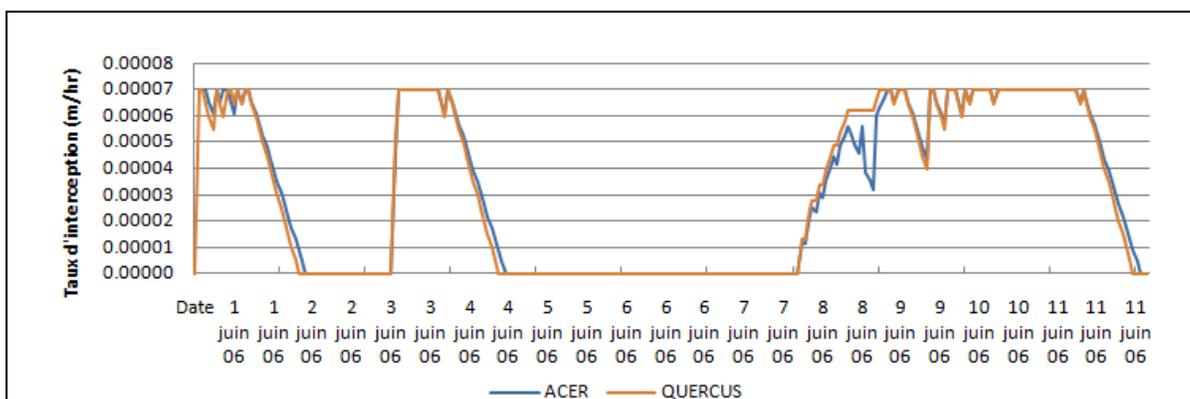


Figure 3.9 Taux d'interception pour le *Quercus* et l'*Acer* pour la période du 1^{er} au 12 juin 2006.

En considérant que la valeur d'évapotranspiration potentielle est la même pour tous les arbres, soit 0,00007 m/hr, il faudra 15,2 heures pour que l'érable évapore la quantité d'eau accumulée et 13,7 heures pour le chêne. Le chêne est donc plus rapide pour atteindre le taux d'interception maximum, ayant une capacité de stockage de plus faible que l'érable.

3.4 Volume d'eau intercepté

Pour le projet du stationnement, avec les 3 *Quercus bicolor*, les 2 *Quercus rubra* et les 4 *Acer rubrum*, il est possible d'estimer que les arbres peuvent intercepter 32,5 m³ pour 2006 et 81,3 m³ pour 2008, soit 1,6 % et 8 % respectivement de l'eau de ruissellement calculée par RECARGA pour le site. Pour le site des commerces, si on compte aussi une plantation traditionnelle d'arbre plantés 8 m centre à centre, on retrouve 15 *Quercus bicolor* et 15 *Acer rubrum*. Ces arbres peuvent intercepter 109,7 m³ pour 2006 et 274,3 m³ pour 2008, soit 1,6 % et 8 % respectivement de l'eau de ruissellement calculée par RECARGA pour le site. À partir des données de stockage d'eau sur le feuillage à la section précédente, et en supposant une capacité maximale de rétention sur la totalité des feuilles de l'arbre, les 3 types d'arbres ont intercepté plus de pluie en 2008 qu'en 2006. Ceci s'explique par le nombre supérieur d'évènements de moins de 1,06 mm en 2008 (29 de moins de 1,06 mm et 20 de moins de 0,91 mm) et près de la moitié moins en 2006 avec 17 évènements de moins de 1,06 mm (17 de moins de 1,06 mm et 9 de moins de 0,91 mm). La figure 3.10 illustre les volumes d'eau interceptés par arbre, estimés pour les deux saisons. La variation représente de 3,2 à 7,6 m³ d'eau intercepté en plus pour les années avec moins de pluie, ou plutôt moins d'évènement important de pluie. Le calcul a été fait à partir des valeurs des dimensions à 50% de la croissance sans inclure le dégagement du tronc à partir du sol discuté dans la section méthodologie.

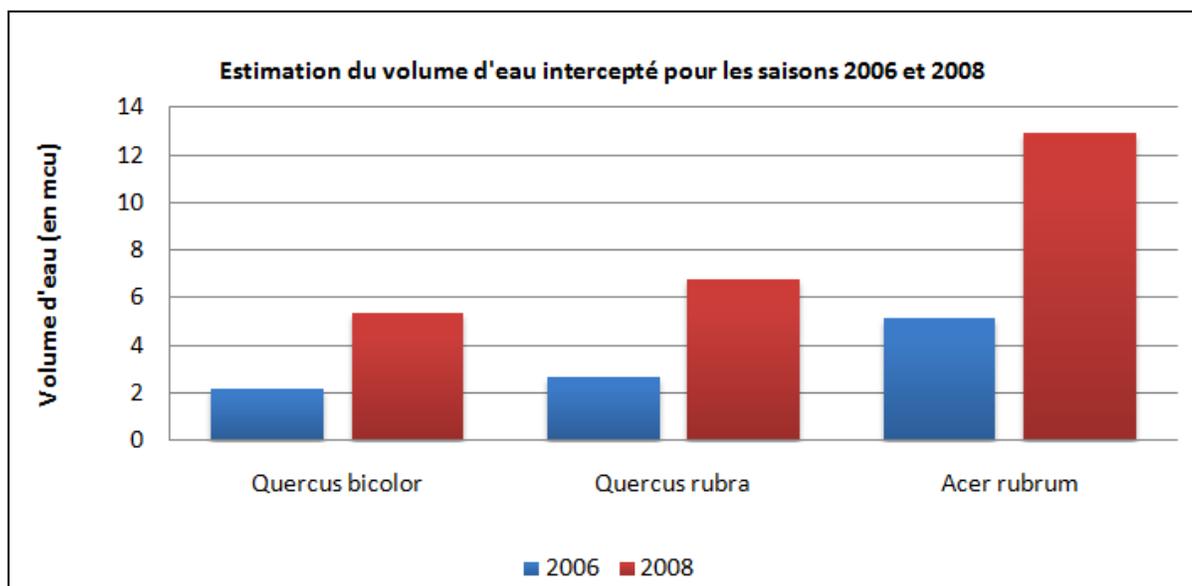


Figure 3.10 Estimation du volume d'eau intercepté (m³) par unité de *Quercus* et d'*Acer* pour les saisons 2006 et 2008, à 50% de leur de croissance potentielle.

L'impact sur la végétation sera plus important pour l'année avec moins de pluie. En réduisant les quantités d'eau disponible, il est possible que le volume qui reste ne soit pas toujours suffisant et que les quantités d'évènements de flétrissement augmentent.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

De tous les paramètres étudiés, la conductivité hydraulique du substrat est ce qui a été le plus comparé et discuté, surtout lors de la construction des cellules du stationnement. Étant donné les différences entre la valeur théorique et la valeur en laboratoire d'un même mélange retenu pour le projet du stationnement, tous les essais ont été effectués avec les deux valeurs pour comparer les résultats des éléments de survie pour les plantes soit le flétrissement, la saturation de la zone racinaire et l'accumulation d'eau en surface.

En cumulant les volumes d'eau dans la recharge, l'évaporation et l'accumulation sous la zone racinaire, les cellules du site du stationnement peuvent diminuer les eaux de ruissellement acheminées vers le réseau pluvial de 69 à 72 % pour 2006, et 93 à 95 % pour 2008. Pour le site des commerces, c'est 44 à 48 % pour 2006 et 64 à 68 % pour 2008. Les résultats obtenus se comparent aux résultats retrouvés dans la littérature allant de 88,8 % (Xiao et McPherson, 2009) à 57,7 % (Toronto and Region Conservation Authority, 2006) ou entre 50 à 60 % (Davis, 2008).

Les différents manuels présentent des méthodes de calculs qui résultent en une proportion de superficie de cellule par rapport à la superficie de traitement variant entre 8 et 12 % (Muthanna, Viklander et Thorolfsson, 2007). Gaffield (2008) établit le ratio à 15 % pour optimiser la recharge sur le site. Ce dernier affirme que l'augmentation de l'évaporation explique la diminution de recharge lorsque la superficie de la cellule dépasse 15 % de la superficie de traitement. Les résultats observés dans les deux sites ne sont pas concordants. Pour le site du stationnement, la cellule C qui est à 22 % a un volume de recharge et d'évaporation presque identique, contrairement aux deux autres cellules qui ont 9 (A) et 11 % (B) de ratio respectivement où la recharge compte pour 71 % du volume et l'évaporation compte pour 25 %. L'observation de Gaffield est confirmée, car le volume de recharge diminue et l'évaporation augmente, et ce pour les deux taux d'infiltration et pour les

deux années observées. Pour les commerces, la cellule G se démarque avec un ratio de presque 18 %, comparé aux autres qui varie de 8 à 12 % a systématiquement des volumes de recharge et d'évaporation plus importants, et ce, pour les deux taux d'infiltration et pour les deux années observées. Ceci pourrait être expliqué par un ratio de superficie imperméable inférieur pour la cellule G par rapport aux autres, le volume de substrat de plantation prend donc plus d'importance. Les tableaux cumulatifs détaillés se retrouvent en annexe V.

La variation du comportement des cellules entre les deux sites peut être attribuée à la différence de conception. Au stationnement il y a la zone racinaire et la zone d'accumulation sous la zone racinaire, alors que dans les commerces il n'y a que la zone racinaire. L'analyse de sensibilité de la cellule A démontre que la présence d'une zone de storage a une influence sur le volume de recharge. À noter que l'étude de Gaffield visait un maximum de recharge pour conserver l'hydrologie pré-développement et que sa conclusion suivait les objectifs de son étude.

Un phénomène observé et non expliqué est la différence d'évaporation entre les deux taux d'infiltration. Dans tous les cas, le volume d'évaporation est moins important avec un taux de 0,5 cm/hr qu'avec 5,7 cm/hr. La différence d'infiltration est expliquée par la différence de la texture du substrat. Une infiltration plus rapide est associée avec des sols sablonneux et étant donné la différence de texture sous-entendue, le raisonnement porterait à croire que le taux plus faible permettrait un plus grand volume d'eau (référence à la figure 1.2) que celui a plus fort taux d'infiltration. Mais pour un même volume de terre, la force de tension des particules plus fines doit expliquer la plus grande retenue d'eau dans le sol (Harris, 2002; Soltner, 2005).

Pour le site du stationnement, les observations durant la saison estivale portent à croire que le taux d'infiltration est plus de 5,7 cm/hr que de 0,5 cm/hr, et que certains amendements de compost ou autre matière organique seront peut-être à envisager. Pour le site des commerces, qui n'est pas construit, la recommandation serait d'opter pour le taux d'infiltration de 5,7 cm/hr pour minimiser les évènements de débordements. L'absence de zone de recharge

double la quantité d'eau qui est transmis dans le drain de fond étant de l'ordre de 30% pour le site du stationnement et de l'ordre de 60% pour le site des commerces (voir tableaux 3.1, 3.3 et 3.4). Dans un objectif de diminuer le volume d'eau qui est dirigée vers le bassin de rétention souterrain, la conception des cellules A, B, D, E et F pourrait être modifiée pour augmenter la quantité d'eau retenue sur le site en ajoutant la recharge. Le choix du substrat pourrait aussi être alors révisé pour minimiser les taux de flétrissement. Dans les deux cas, le stationnement et les commerces, l'évacuation du drain pourrait être contrôlée par un système de valves pour maximiser la rétention dans les cellules durant la période estivale, mais permettre un système d'évacuation lorsque nécessaire. Aussi, le système de trop-plein relié au drain pourrait être sur un conduit indépendant du drain pour accommoder les événements de pluie plus importants.

Le bilan global est plus important pour le site du stationnement, car les cellules traitent la totalité des surfaces imperméables du site et donc l'eau de pluie qui y tombe et qui ruisselle sur la surface. Dans le cas des commerces, les cellules traitent moins du quart de la superficie totale des surfaces imperméables, et les surfaces imperméables représentent la quasi-totalité du lotissement. Il n'y a que quelques bandes vertes sur trois des quatre côtés du site (voir annexe III). D'autres stratégies seraient à envisager pour maximiser l'infiltration et l'évaporation des petits événements de pluie

Quand il y a moins de précipitation, et moins d'eau de ruissellement, il y a augmentation du stress hydrique sur les plantes, avec plus de chances d'atteindre le point de flétrissement et d'arrêter la photosynthèse. Une cellule qui apparaît avoir un bon équilibre entre un minimum de débordement et peu ou pas de périodes de flétrissement et avec un temps d'inondation de moins de 48 heures. L'évapotranspiration est un flux d'énergie important un milieu urbain, surtout en milieu résidentiel. Dans plusieurs cas l'évaporation peut excéder les précipitations d'où la demande d'irrigation (Grimmond et Oke, 1999). En reprenant la formule présentée dans la revue de littérature (équation 1.3), si les valeurs des différentes composantes d'évapotranspiration totale augmentent les valeurs du côté droit de l'équation, un apport d'eau sera nécessaire pour rétablir l'équilibre.

Dans le contexte de l'étude, les surfaces sont essentiellement imperméables (le site du commerce a un minimum de surfaces perméables aménagées en périphérie du site) avec un taux maximale de ruissellement. La modification des surfaces de type asphalte ou béton pour des surfaces perméables comme des pavés poreux ou de la poussière de pierre va modifier la quantité et le débit d'eau qui sera dirigé dans les cellules. En effet, les plus petits événements de pluie seront retenus en place par évaporation ou infiltration selon la nature du sol en place (argile ou sable). Un drainage souterrain sera toujours nécessaire en milieu plus argileux et devra être intégré à la conception des cellules. Le modèle RECARGA permet une variation du coefficient de ruissellement de la surface tributaire dans les entrées de données, mais il n'y a pas d'indication sur le drainage qui pourrait être intégré dans cette section du projet.

Pour les valeurs calculées des superficies de feuillages, les résultats obtenus sont sensiblement les mêmes que dans la littérature. Les résultats varient de 26 m² pour un arbre de petite taille, à 410 m² pour un arbre à grand développement de taille mature. Ceci se rapproche des valeurs calculées à différents stades de développement de la plante. À 20 % de sa taille maximale, l'érable a une superficie de feuillage 27 m², et à 40 % de développement l'érable et le gymnocladus ont une valeur de 182 et 193 m² respectivement, se rapprochant de la valeur de 172 m² pour un arbre moyen (Kenney, 2008).

Pour ce qui est des valeurs d'interception calculées, les valeurs sont très variables variant par région, par espèces et par technique mesurée ou calculée. En le comparant par volume d'eau un arbre peut intercepter de 0,07 m³ (Macon *et al.*, 2004) à 19,3 m³ (Xiao et McPherson, 2002) alors que la présente étude a calculé 0,05 m³ à 18,3 m³ selon l'espèce et la taille de l'arbre. Le tableau récapitulatif du volume d'eau intercepté est en annexe. En comparant en termes de hauteur d'eau un arbre peut intercepter de 0,5 mm (Horton, 1919) à 32,3 mm (Asadian et Weiler, 2009) alors que la présente recherche a calculé de 7,3 à 39,3 mm selon l'espèce. Finalement en termes de pourcentage de volume intercepté, les résultats varient de 0,7 % (Xiao *et al.*, 2000b) à 98 % (Asadian et Weiler, 2009) alors que la présente recherche a calculé de 4 à 16 % selon l'espèce et la quantité d'arbres pour un site, en terme individuel,

cela représente 1,2 à 10,9 % selon l'espèce et la quantité et intensité de pluie durant la période mesurée.

Le point commun de chacune des études d'interception est la variabilité des résultats par rapport à la saison et la quantité de feuillage sur l'arbre (Ghazavi *et al.*, 2008; Horton, 1919) en plus de l'intensité de l'évènement et du vent sur la capacité de stockage de l'arbre (Asadian et Weiler, 2009). Cette dernière est affectée par le poids de l'eau sur la feuille et l'intensité et la direction de la pluie pour déséquilibrer la feuille et lui faire perdre le volume qu'elle peut accumuler (Xiao *et al.*, 2000a). Dans un modèle encore en devenir (Wang *et al.*, 2007), certains de ces paramètres sont pris en considération en introduisant un index d'humidité qui doit être ajouté à la valeur initiale de la feuille pour chaque calcul en pas de temps. En effet, le ruissellement sur le tronc commence 5 à 10 minutes plus tôt pour un arbre qui a un degré d'humidité de départ de 50 à 95 % par rapport à une couronne avec feuillage sec (Xiao *et al.*, 2007).

L'impact des changements climatiques sur le drainage urbain entre autre (Mailhot *et al.*, 2007) est qu'il y aurait moins de petits évènements de pluie et plus d'évènements importants. Comme démontré l'arbre intercepte au maximum lors de petits évènements tant en quantité qu'en intensité, les changements prévus dans les pluies n'augmentera pas la possibilité d'interception. Le système de cellules avec plantation d'arbre pourra donc fonctionner sans se causer préjudice. En ce qui concerne la conception des cellules, qui est prévue pour retenir les petits évènements de pluie, il n'y a pas d'adaptation possible une fois que le système est construit. Toutefois, il est possible d'augmenter la superficie calculée pour augmenter le volume de rétention d'eau à la conception pour s'ajuster.

L'interception des arbres est bénéfique comme pratique de gestion optimale, et comme réduction de chaleur ambiante en milieu urbain. L'impact anticipé de la réduction du volume peut être comparable à la différence observée entre 2006 et 2008. Lorsque le volume d'eau est réduit, les quantités et temps de flétrissement augmentent. Il faut étudier pour voir s'il y a

un maximum de plantation à respecter en situation de biorétention pour éviter des stress et des pertes (dans la conclusion)

Pour que l'arbre se développe pour assurer un réseau racinaire favorisant l'infiltration et jouer sur rôle d'intercepteur d'eau de pluie il a besoin d'un volume de substrat assez important pour permettre le développement racinaire nécessaire pour soutenir sa structure (Harris, 2002; Urban, 2004). Pour le site du stationnement les cellules varient de 2,7 à 3 m de large, établissant un volume d'environ 11 à 18 m³ de terre par arbre (qu'il partage avec des arbustes et vivaces) sans compter la zone de recharge. Pour les plantations en périphérie le volume est de 3,75 m³ par arbre la fosse en tant que telle. Les arbres sont plantés dans un matériel de remblai de type classe B, donc avec un minimum de matière organique et n'est pas contaminé. Le volume de terre est donc plus important dans les cellules et offre donc une meilleure chance de développement à long terme pour les arbres. Les zones urbaines de haute densité de construction avec des superficies de surfaces imperméables ont créées des phénomènes de zones chaudes appelés les îlots de chaleur. Ces zones de chaleur ont aussi un impact sur le processus d'évapotranspiration de l'arbre, car une augmentation de chaleur peu diminuer ou arrêter la photosynthèse et le développement de l'arbre (Lee et Park, 2008). Plus l'arbre peut se développer, plus son volume de feuillage va augmenter vers son maximum et il pourra atteindre son potentiel tant pour l'interception de l'eau de pluie que pour le contrôle des îlots de chaleur en abaissant la température ambiante (Macon *et al.*, 2004).

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Dans un premier temps, l'étude de la teneur en eau dans le sol de deux projets types a permis d'évaluer la survie des plantes par rapport à la quantité d'eau conservée sur le site et la variation de l'eau dans les cellules. La quantité annuelle d'eau conservée sur le site a variée de 70 à 95 % du volume estimé par modélisation pour le site du stationnement, et de 44 à 68 % pour le site du stationnement. L'utilisation du modèle RECARGA, a résulté en une série de réflexions pour les critères de conception des cellules. Les grands écarts entre les quantités d'évènements et de durée de flétrissement et d'accumulation en surface selon la texture du substrat de plantation, et la conductivité hydraulique. À 5,7 cm/hr de conductivité hydraulique, les arbres et le reste de la végétation risquent des moments de sécheresse lors des années avec une pluie moins importante et de grandes périodes sans précipitations. En opposition, à 0,5 cm/hr, il y a des possibilités d'inondation qui peuvent aussi mettre en péril la survie des plantes selon le temps total passé dans l'eau. L'épaisseur du substrat a aussi une influence, mais au-delà de 60 cm le choix du substrat de plantation pourra être aussi important pour le bon fonctionnement du système. Il y a deux grandes distinctions entre la conception des cellules du stationnement et celle des commerces : le diamètre du drain de fond et la zone d'accumulation. L'analyse de sensibilité a démontré que le diamètre du drain n'a pas d'impact sur les quantités d'évènements et les temps maximales de saturation, d'accumulation en surface ou de flétrissement. De plus, la zone sous la zone racinaire a peu d'impact sur les quantités ou les durées d'évènements à l'exception de la durée maximale de saturation de la zone racinaire pour une année avec beaucoup de pluie (2006) lorsqu'il n'y a pas de zone de recharge. Toutefois, ceci ne résulte pas en une augmentation de débordement ou d'accumulation en surface. La zone de recharge peut diminuer de moitié la quantité d'eau qui est infiltrée dans le drain et ensuite évacuée dans le système pluvial. L'absence de zone de recharge peut augmenter les quantités (et volumes) de débordement.

Il faut créer un équilibre entre une infiltration des eaux de ruissellement assez rapide pour éviter des inondations trop longues (pour le confort des usagers et la survie des plantes) et une infiltration rapide qui ne permet pas d'avoir une réserve assez importante pour les plantes

lors que la pluie se fait attendre. Le choix de substrat doit être fait en conséquence du ratio de la cellule avec la superficie de traitement. Le choix de plantation doit être fait en conséquence du substrat de plantation. Deux espèces d'arbre sont plantées à la fois dans les cellules et en périphérie du site pour le projet du stationnement, les *Celtis occidentalis* et les *Acer rubrum*. À peine 12 mois suivant la plantation, il est encore trop tôt pour observer une différence de croissance des arbres dans les cellules et ceux à l'extérieur. Étant donné qu'un arbre transplanté va prendre les premières années pour rétablir la masse racinaire qui a été coupée durant l'opération de mise en motte, les seuls signes sont l'état du feuillage. À la fin du mois de juillet, après plus de 6 jours sans pluie, les deux espèces dans les deux situations (dans la cellule et en périphérie) semblaient montrer des signes de sécheresse. La différence se voit beaucoup plus vers la fin de l'été, où les *Celtis* ont définitivement soufferts d'un manque d'eau.

Dans un deuxième temps, l'interception des arbres a été estimée afin d'évaluer l'impact de la réduction du volume d'eau qui sera accessible aux plantes. Les arbres ont un potentiel d'interception plus important avec les petits événements de pluie, car c'est un phénomène qui dépend de la quantité et l'intensité de pluie. L'impact des arbres au niveau de l'interception et de l'évapotranspiration est variable selon la saison et l'essence retenue. De plus, la taille finale de l'arbre et sa vitesse de développement vont aussi avoir une influence sur les résultats. Les superficies de feuillage estimées pour une série de neuf types d'arbres donnent des résultats variant de 117,5 m² pour un *Celtis occidentalis* à 761,1 m² pour un *Juglans nigra*, à 50% de son volume à maturité. L'intensité de l'évènement de pluie va aussi varier le rendement d'interception. La capacité de stockage varie aussi d'une espèce à l'autre. Les résultats calculés pour les Quercus sont de l'ordre de 1,06 mm de hauteur d'eau pour un volume de 2,1 à 5,8 m³ par arbre selon l'année. Pour les Acer, les résultats sont de l'ordre de 0,91 mm de hauteur pour un volume de 5,2 à 12,9 m³ par arbre selon l'année. L'interception de la pluie par les arbres influence la teneur en eau du sol, représentant entre 1,5 et 8 % du volume d'eau de ruissellement calculé avec le modèle, et pourrait selon les années, représenter des difficultés pour le développement pour les arbres et pour les plantes (arbustes et vivaces) planifiés dans les cellules.

Intégrer des arbres dans les systèmes de biorétention est intéressant pour augmenter l'infiltration par les racines et l'accumulation à plus long terme de polluants dont le CO₂. Dans les limites de la biorétention, ce qui manque surtout est le paramètre de l'imprévu pour la plante. C'est un organisme vivant qui, contrairement aux bactéries et autres éléments vivants dans le sol, ne se développe pas très rapidement (pour les arbres) et peut être affecté par plusieurs causes en milieu urbain. Il est difficile de compter sur la valeur potentielle de l'arbre pour diminuer la quantité d'eau dans le réseau, car son comportement peut varier d'une année à l'autre. Une tempête de vent ou de glace peut réduire la masse de l'arbre rapidement et donc diminuer son potentiel d'interception. De plus, contrairement aux vivaces, annuelles et arbustes, les arbres peuvent prendre plusieurs années pour montrer les impacts d'un stress qui pourrait éventuellement le tuer.

La biorétention est un concept qui commence dans les projets au Québec et les défis d'intégration touchent autant les donneurs d'ouvrages pour changer les habitudes, les concepteurs pour bien comprendre tous les éléments du système et le milieu de la construction pour le choix et suivi de matériaux. Une étape importante est l'entretien des espaces une fois les travaux terminés, surtout considérant la sensibilité d'une plante pendant les premiers 12 à 24 mois suivant la plantation. Une attention particulière aux moments plus secs d'une saison doit être envisagée par les équipes d'entretien pour combler les manques selon les quantités et volumes des événements de pluie. Il est nécessaire de créer des projets pilotes pour étudier dans notre milieu le comportement de tous les éléments du système. Pour ce faire, il est important de souligner certains besoins tant pour la cellule que pour les plantes.

Pour les cellules, une meilleure connaissance des substrats de plantations selon les situations d'aménagement est nécessaire, selon la nature du sol en place et les critères de conception de la cellule. Des modélisations et des essais sur le terrain sont nécessaires pour comprendre le comportement de l'eau sur toute la hauteur de la cellule. Des sondes peuvent être utilisées pour détecter la teneur en eau à différents niveaux avec un suivi sur plusieurs années pour étudier le comportement du substrat, son tassement naturel et l'incorporation de la terre des

mottes et des pots des végétaux plantés. Les suivis de teneur en eau doivent inclure aussi le paillis, élément qui est nécessaire pour conserver l'humidité et accumuler des métaux présents dans la matière en suspension des eaux de ruissellement.

Les limites du modèle RECARGA ont déjà été mentionnées et pourraient être adressées dans une prochaine version. Le type et l'épaisseur du paillis ont une influence sur la capacité de rétention d'eau et du comportement hydraulique du substrat de plantation. De plus, la plantation avec des végétaux à grand et petit développement (arbres, arbustes et vivaces) doit être validée pour son impact sur le comportement hydrologique de la cellule. L'analyse doit être autant pour le type que par la densité de plantation.

Les données de biomasses sont peu nombreuses et les modèles existants ne sont pas facilement accessibles comme outil de planification. Le modèle préconisé pour l'interception au début de la recherche s'est dévoilé inaccessible pour l'interprétation des données. Les formules retenues dans la présente recherche ont permis de tracer les grandes lignes du comportement, mais le manque d'outils est réel. Les volumes d'eau qui sont représentées n'apparaissent pas importants, surtout l'échelle d'un événement de pluie. Mais l'importance est à long terme, et il ne faut pas le négliger. Il n'y a pas de bases de données canadiennes pour les valeurs des arbres, que ce soit pour l'Index foliaire (LAI) ou pour les dimensions de tronc et de couronne. Les méthodes de différenciation et qualification des végétaux doivent continuer du point de vue allométrique et sur des suivis de systèmes réels pour mieux comprendre les processus. Le suivi des projets actuels est important pour établir une liste de végétaux (arbres, arbustes et vivaces) pouvant s'intégrer dans ce genre de milieu, tant pour leur esthétique que pour leur capacité d'adaptation du milieu. Le suivi visuel permet d'évaluer le comportement de la plante par les excès d'eau (taches noires) et les manques (jaunissement précoce et perte de feuillage). La mesure de la couronne et du tronc sont d'autres indices de développement de l'arbre qui doit être fait sur plusieurs années, sachant qu'un arbre développe plutôt son système racinaire au début de sa transplantation.

L'impact sur la santé des populations pour ces types d'aménagement devrait être étudié sous tous ces aspects. L'utilisation comme outils de lutte contre les îlots de chaleur, comme capteur de polluants volatils et comme filtre pour les polluants des eaux de ruissellement doit être calculé en valeur ajoutée au rôle hydrologique étudié ici. L'impact sur les nappes phréatiques (recharge et aussi modification du niveau selon les profondeurs d'aménagement) et sur la santé générale doit aussi être étudié. La quantité et la qualité de l'eau doivent être documentées pour répondre aux soucis de ceux qui vont côtoyer ces aménagements.

La biorétention a un potentiel d'intégration dans les municipalités surtout pour suivre l'objectif de la **POLITIQUE NATIONALE DE L'EAU** (Québec, 2002) qui préconise d'utiliser des techniques de réhabilitation des réseaux par rapport à un remplacement (no45), ainsi que le futur guide de gestion des eaux de pluie du MDDEP. Ces aménagements peuvent s'intégrer dans la trame existante, surtout dans le cas des rues relativement larges où on peut réduire la surface d'utilisation et où les plantations sont déjà souhaitées. C'est une question de créer une chaîne de traitement, où plusieurs pratiques sont utilisées en succession pour réduire la charge sur les réseaux souterrains en place et améliorer la performance des réseaux existants.

Les résultats de la modélisation de la cellule de biorétention montrent que c'est un système viable de contrôle et de réduction des eaux de pluie en milieu urbain. Elle peut réduire l'eau de ruissellement d'une surface qui serait dirigée dans le système pluvial de la ville. Par sa nature d'îlot de plantation, elle peut s'insérer dans la trame urbaine et jouer un double rôle, soit de gérer l'eau de pluie et réduire les îlots de chaleur. Contrairement aux ouvrages traditionnels de génie civil utilisant des tuyaux ou même les bassins de rétention, la biorétention est un système vivant qui va plus loin que le simple calcul de volume d'eau qui peut être accumulé.

ANNEXE I

FIGURES COMPLÉMENTAIRES



**Figure-A I-1 Exemples de cellules de biorétention
Intégrées dans la trame urbaine.**

Crédits photos :

A. [http : //hvatoday.org/Bioretenction](http://hvatoday.org/Bioretenction)

B. [http : //Deckerhomes.com/bioretenction2](http://Deckerhomes.com/bioretenction2)

C. [http : //Hpigreen.files.wordpress.com/portland-green-streets](http://Hpigreen.files.wordpress.com/portland-green-streets)

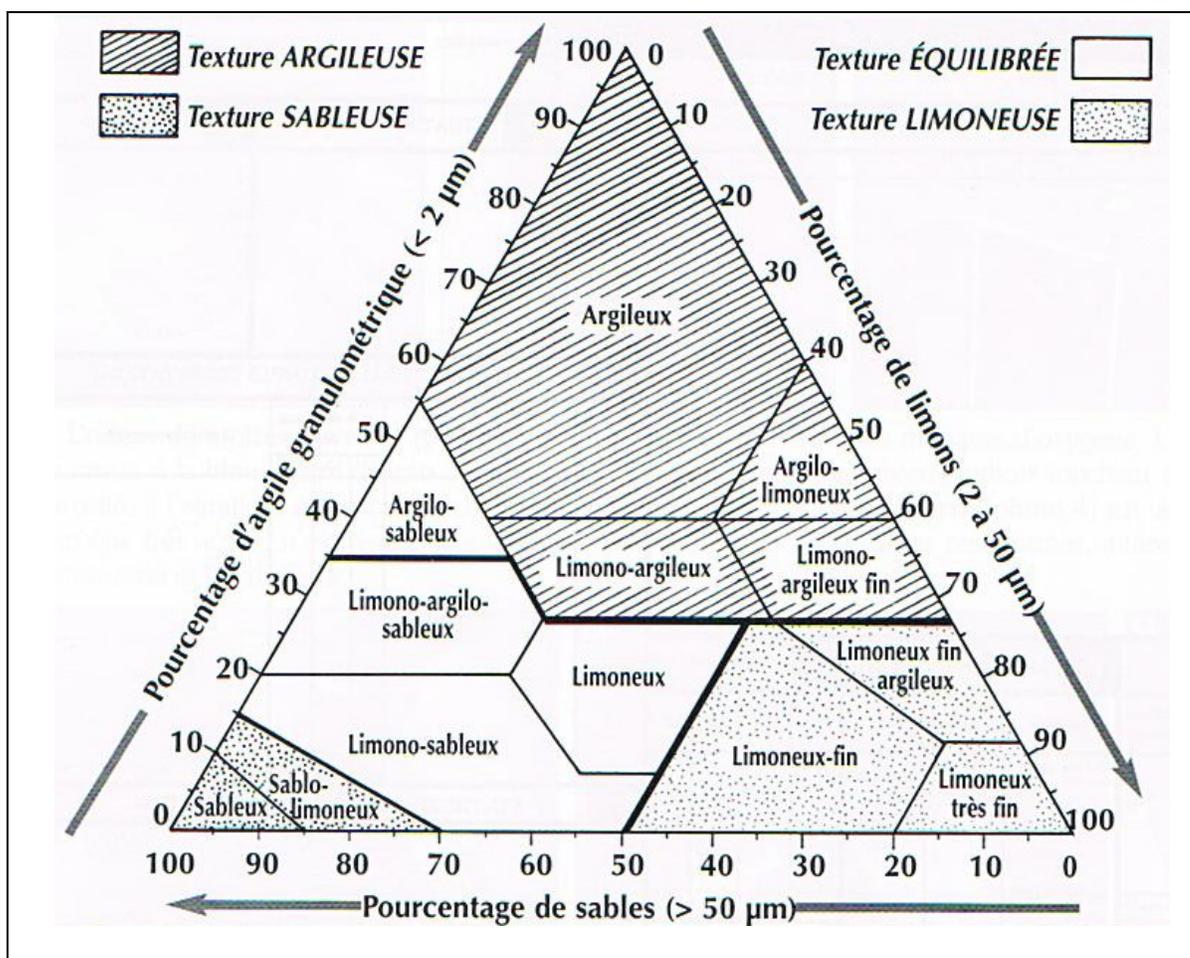


Figure-A I-2 Triangle des textures.

Tirée de Soltner (2005, p. 48)

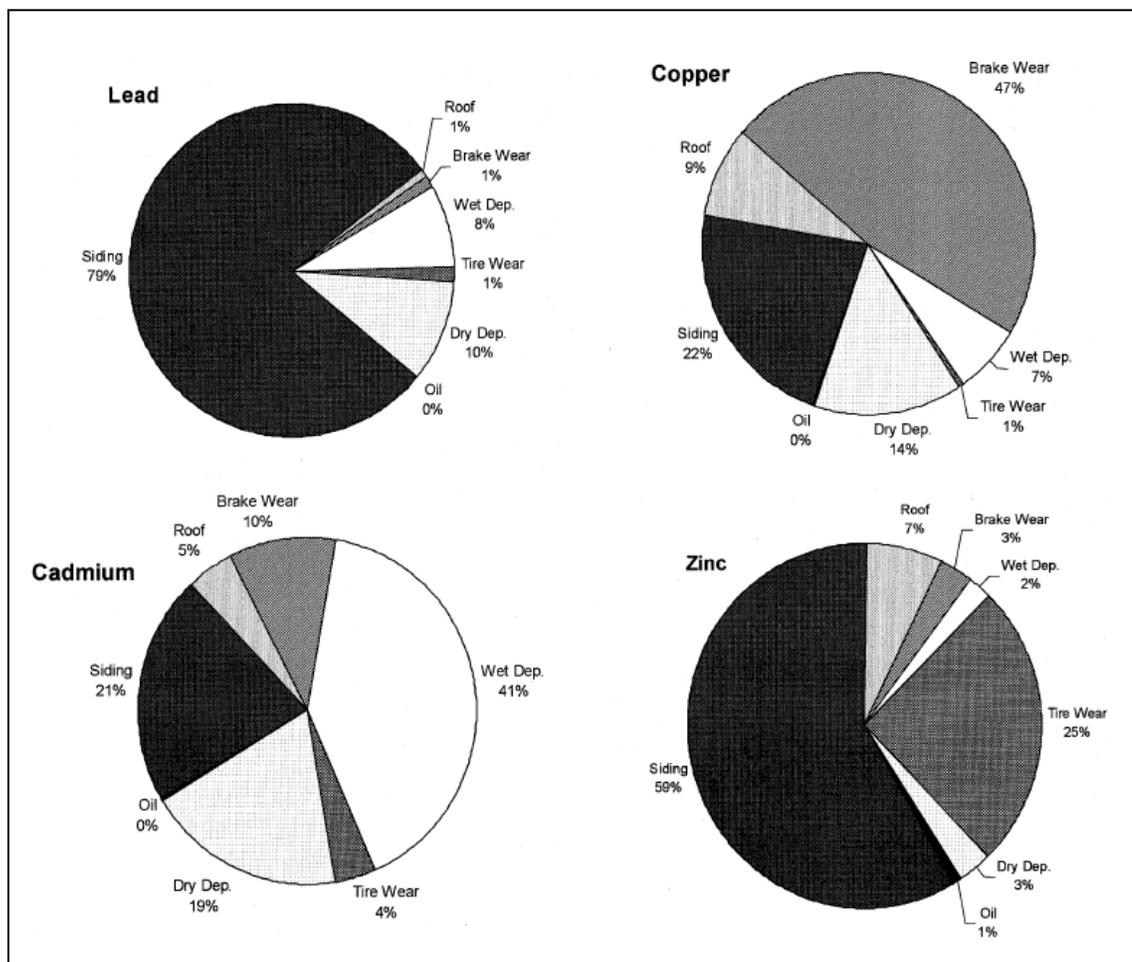


Figure-A I-3 Contribution de différentes sources de métaux dans les eaux de ruissellement d'un secteur urbain résidentiel. Bâtiment en brique.
Tirée de Davis (2001, p. 1005)

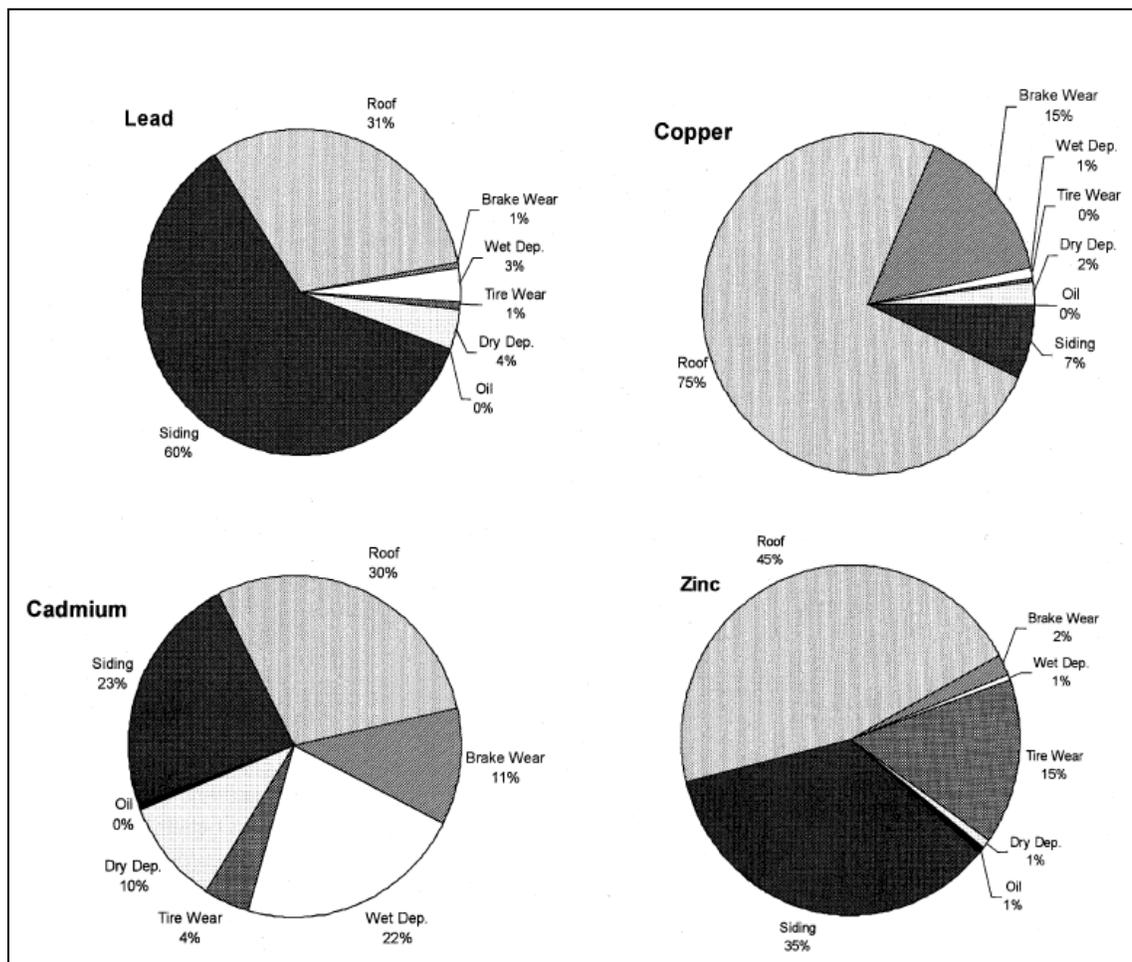


Figure-A I-4 Contribution de différentes sources de métaux dans les eaux de ruissellement d'un secteur urbain résidentiel. Bâtiment commercial.
Tirée de Davis (2001, p. 1005)

ANNEXE II

LE STATIONNEMENT DE MONT-SAINT-HILAIRE

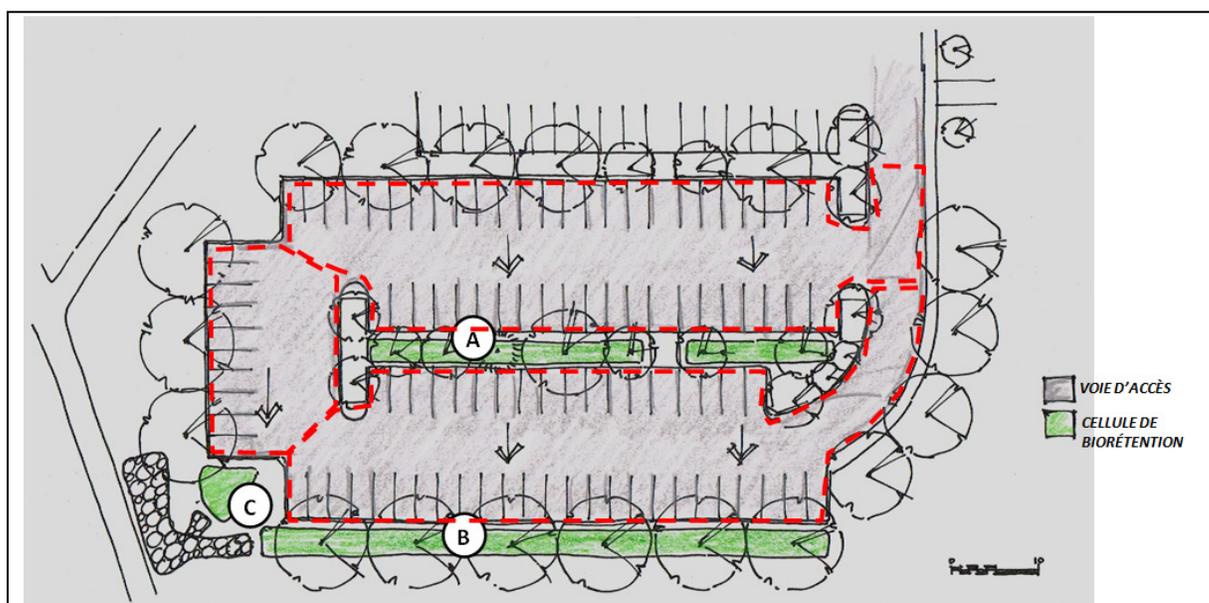


Figure-A II-1 Schéma d'ensemble du stationnement avec identification des cellules de biorétention en fonction des zones de traitement (surface avec ligne pointillée rouge).

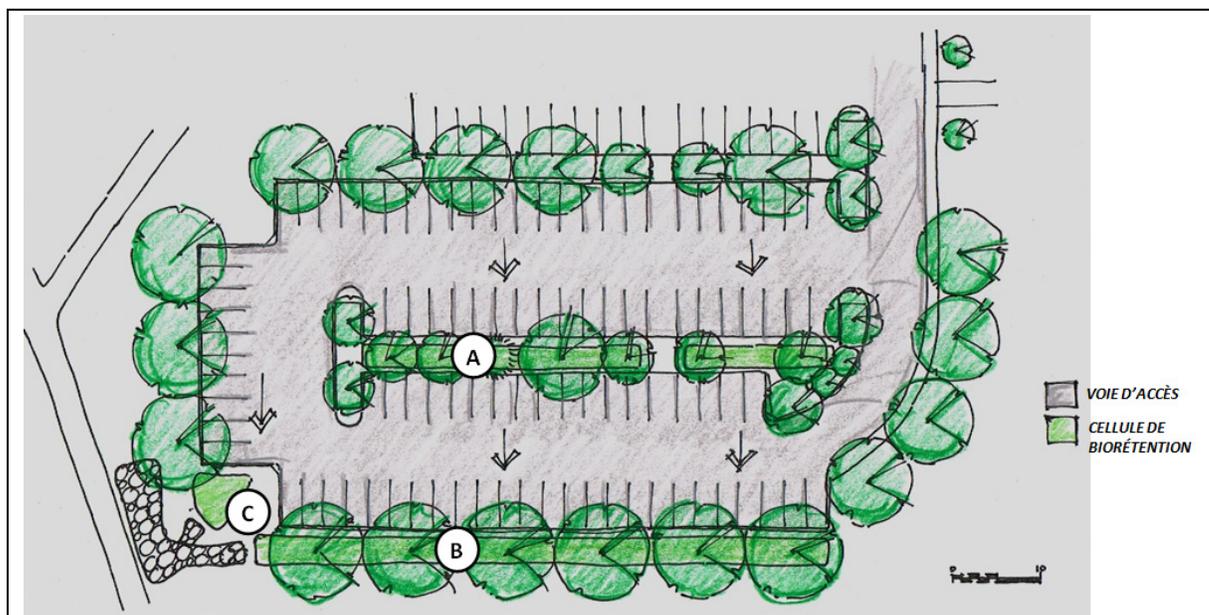


Figure-A II-2 Schéma d'ensemble du stationnement avec identification des cellules de biorétention et la masse arborescente.

DIMENSION DES CELLULES

Une première cellule (A) mesure 132 m^2 pour traiter une surface de $1\,430 \text{ m}^2$. Le ratio de superficie de cellule par rapport à la surface à traiter est de 9,2 %. La deuxième cellule (B) mesure 209 m^2 pour traiter une surface de $1\,828 \text{ m}^2$, avec un ratio est de 11,5 %. Finalement, la troisième cellule (C) mesure 32 m^2 pour traiter une surface de 143 m^2 , avec un ratio de 22,2 %. À noter aussi que pour la cellule B, il est prévu d'agrandir le stationnement de l'autre côté dans une phase ultérieure, augmentant la quantité des eaux de ruissellement et ramenant le ratio plus près du 8 %. Étant donné que la superficie des cellules A et B se trouve dans la marge inférieure du ratio recommandé par la littérature, faute d'espace, un déversoir en pierres des champs est ajouté pour accumuler les quantités d'eau lors des événements de pluie plus importants.

ANNEXE III

LE QUARTIER DIX30

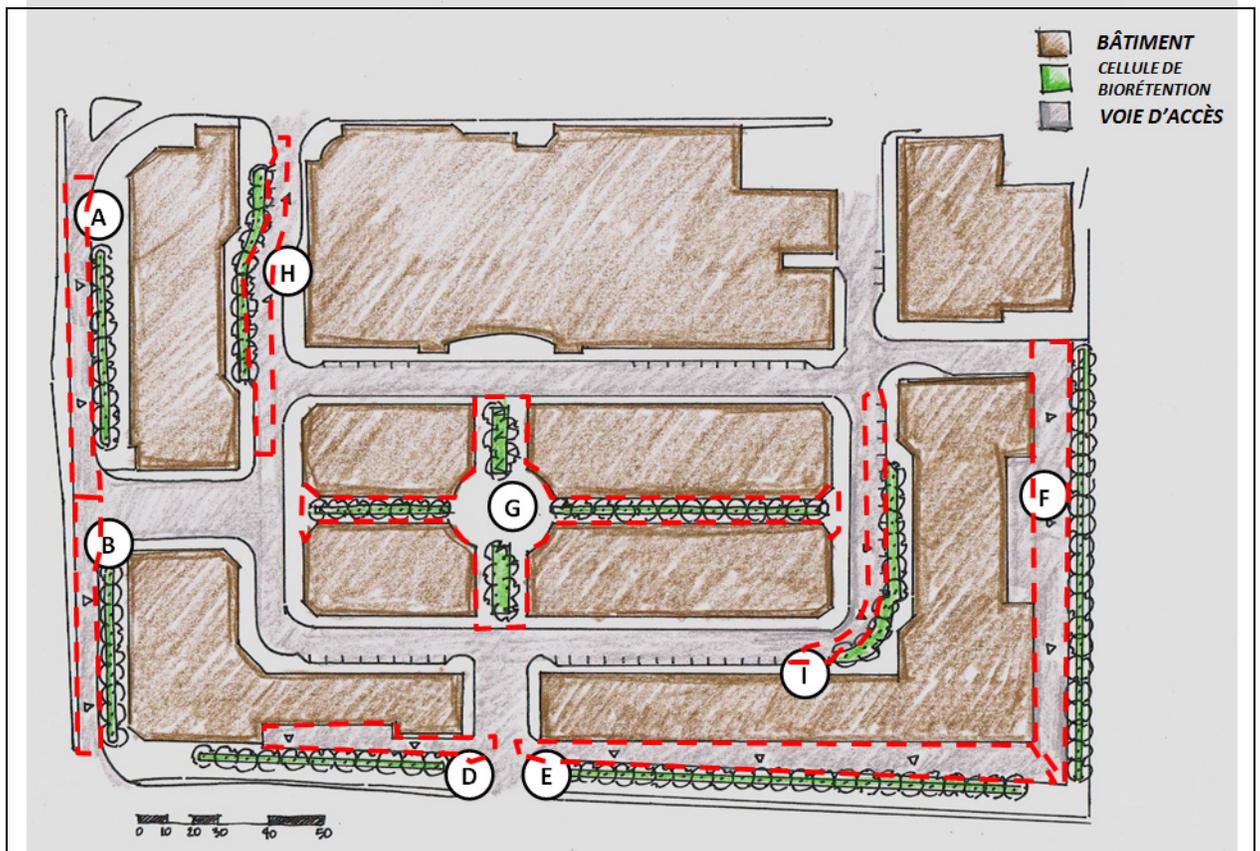


Figure-A III-1 Schéma d'ensemble des commerces avec identification des cellules de biorétention en fonction des zones de traitement (surface avec ligne pointillée rouge).



Figure-A III-2 Schéma d'ensemble des commerces avec identification des cellules de biorétention et la masse arborescente.

DIMENSION DES CELLULES

La cellule A mesure 65 m^2 pour traiter une surface de 806 m^2 . Le ratio de superficie de cellule par rapport à la surface à traiter est de 8,1 %. La cellule B mesure 55 m^2 pour traiter une surface de 658 m^2 , avec un ratio de 8,4 %. La cellule D mesure 50 m^2 pour traiter une surface de 501 m^2 , avec un ratio de 9,9 %. La cellule E mesure 140 m^2 pour traiter une surface de $1\,755 \text{ m}^2$, avec un ratio de 7,9 %. La cellule F mesure 100 m^2 pour traiter une surface de $1\,259 \text{ m}^2$, avec un ratio de 7,9 %. La cellule G mesure 470 m^2 pour traiter une surface de $2\,630 \text{ m}^2$, avec un ratio de 17,9 %. La cellule H mesure 46 m^2 pour traiter une surface de 576 m^2 , avec un ratio de 7,9 %. Et finalement la cellule I mesure 48 m^2 pour traiter une surface de 600 m^2 avec un ratio de 8,0 %.

ANNEXE IV

LISTE DES MATÉRIAUX DES CELLULES

Paillis : Bois raméal fragmenté (BRF) : fait par la municipalité pour le projet du stationnement à partir des branches récoltées dans la municipalité et transportées au garage municipal.

Substrat de plantation : Mélange 'Éco-vert' de Matériaux Paysagers Savaria Ltée

Perméabilité théorique : 0,504cm/hr (1,4^e-04cm/s)

Perméabilité mesurée : 5,688cm/hr (1,58^e-03cm/s)

Sable drainant : Sable drainant de Matériaux Paysagers Savaria Ltée

Perméabilité théorique : 100cm/hr

Drain : PEHD 200mm de diamètre, perforé et filtré, de SOLENO

Trappe à sédiment : Système conçu par l'équipe de travail, incorporant un caniveau de plastique dans une bordure de béton pour capter les gros sédiments qui se déplacent lors des premiers moments d'une pluie.





Matériaux Paysagers
Savaria Ltée



950, de Lorraine
Boucherville (Québec)
J4B 5E4

Téléphone
450 655-6147 / 1 877 728-2742
418 832-0180 (Québec)

Télécopieur
450 655-5133
418 832-6879 (Québec)

www.savariatlee.ca
info@savariatlee.ca

FICHE TECHNIQUE

MÉLANGE ÉCO VERT (3110)

DISPONIBLE À PARTIR DE BOUCHERVILLE

TERREAU POUR ENGAZONNEMENT ET PLANTATION D'ARBRES

- Le Mélange Éco Vert est un terreau favorisant l'enracinement en profondeur du gazon en plaque et la germination des semences à gazon.
- Ce terreau se prête aussi bien aux travaux de plantation d'arbres.
- Développé pour assurer un minimum d'arrosage, par conséquent, une économie d'eau.

ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE

pH	6 - 7
Matière organique (Walkley Black)	2 - 5 %
C.E.C. (capacité d'échange cationique)	10-20 méq. / 100 g de sol
Salinité (conductivité électrique)	< 3,5 mmhos / cm
Tassement (Taux de compaction)	25 %
P (Phosphore) Mehlich 3	> 26 ppm
K (Potassium) Mehlich 3	> 126 ppm
Mg (Magnésium) Mehlich 3	> 126 ppm
Ca (Calcium) Mehlich 3	> 500 ppm
Masse volumique humide non-tassée	900 kg / m ³ ***
Masse volumique humide tassée	1300 kg / m ³ ***
Dimension du tamisage	20 mm
Composition : Compost, sable, terre arable, terre noire Intrants recyclés : 40 %	
*** Les masses volumiques peuvent varier selon différents facteurs.	

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

TAMIS (mm)	% PASSANT
10	100
5	98 - 100
2,5	90 - 100
1,25	90 - 97
,630	80 - 95
,315	50 - 85
,160	35 - 65
,080	15 - 35

ANNEXE V

RÉSULTATS RECARGA



RECARGA Version 2.3

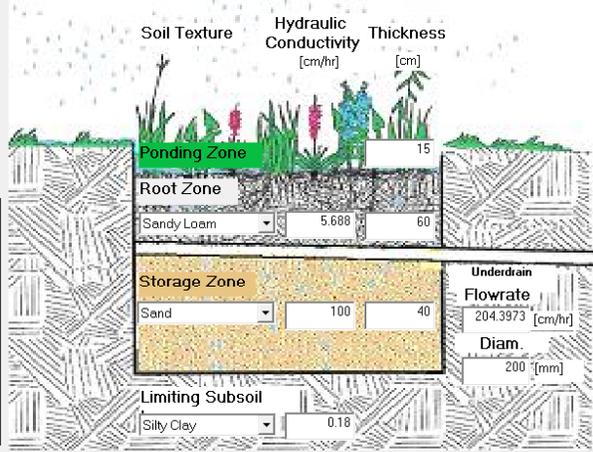
Bioretention/Raingarden Sizing Program

Units: Metric

Planview Data

Facility Area: [m²]
 Tributary Area: [m²]
 Percent Impervious:
 Pervious CN:

Facility Inputs



Results

Plant Survivability
(Less than 48 hours max. ponding is desirable)

	max.	Total
Hrs. Ponded	<input type="text" value="4.5"/>	<input type="text" value="10.25"/>
Number of overflows	<input type="text" value="0"/>	
Tributary Runoff	<input type="text" value=""/>	
Precipitation	<input type="text" value="88.1255"/>	
Impervious Runoff	<input type="text" value="67.2755"/>	
Pervious Runoff	<input type="text" value="6.6933"/>	

Raingarden Water Balance

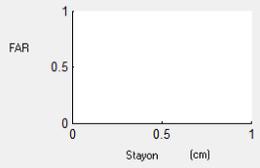
	[cm]	%
Runon	<input type="text" value="51.8546"/>	<input type="text" value="58.8418"/>
Runoff	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Recharge	<input type="text" value="29.0211"/>	<input type="text" value="32.9316"/>
Evaporation	<input type="text" value="6.0321"/>	<input type="text" value="6.8449"/>
Underdrain	<input type="text" value="17.4819"/>	<input type="text" value="19.8375"/>
Soil Moisture	<input type="text" value="-0.68053"/>	<input type="text" value="-0.77223"/>
Stay-on	<input type="text" value="70.643"/>	<input type="text" value="80.1625"/>

Files

Regional Ave. ET: [cm/day]
 Simulation Type: Continuous
 Input File Length: days
 Precip. File Name:
 Output File Name:

Summary Record

Target Stay-on: (cm)
 Facility Area Ratio:



Developed by the University of Wisconsin-Madison
 Civil & Environmental Engineering Water Resources Group
 (D. Atchison, A. Dussailiant, L. Severson)

Figure-A V-1 Stationnement – Exemple de fenêtre d’entrée de données et de résultats pour la cellule A.

Tableau-A V-1 Stationnement - Résultats récapitulatifs pour l'équilibre hydrologique et la survie de la plante pour la période d'avril à octobre 2006

	A1223(08)	A2223(08)	B1223(08)	B2223(08)	C1223(08)	C2223(08)
INPUT TERMS						
%Impervious=	72,2	72,2	85,2	85,2	64	64
Pervious CN=	61	61	61	61	61	61
Facility Area (m2)=	131,77	131,77	208,85	208,85	31,71	31,71
Trib. Area (m2)=	1430	1430,06	1827,72	1827,7	142,98	142,98
RATIOimp2rg=	7,83532	7,83565	7,45615	7,45607	2,88575	2,88575
RATIOperv2rg=	3,01692	3,01705	1,2952	1,29519	1,62324	1,62324
LAYER						
	DEPTH (cm)					
Depression	15	15	15	15	15	15
Root Zone	60	60	60	60	60	60
Storage	40	40	40	40	40	40
Native	---	---	---	---	---	---
Init. Cond.: suction head (cm)=	-100	-100	-100	-100	-100	-100
Max. Underdrain flow (cm/hr)=	0	0	0	0	0	0
Underdrain diam (mm)=	200	200	200	514	200	200
WATER BALANCE TERMS						
(volumes en mcu)	A1223(08)	A2223(08)	B1223(08)	B2223(08)	C1223(08)	C2223(08)
Ruissellement	389,37	389,38	590,63	590,63	41,21	41,21
Débordement	0	1,67	0	0,2	0	0
Recharge	278,94	278,05	421,47	419,13	22,56	19,86
Évaporation	95,55	93,15	151,44	148	21,87	22,98
Drain de fond	26,87	20,41	36,74	29,88	0	0
Storage	-11,99	-3,89	-19,02	-6,58	-3,22	-1,63
Infiltration	389,37	387,71	590,63	590,42	41,21	41,21
Ruissellement - imperméable	262,03	262,04	249,35	249,35	96,51	96,51
Ruissellement - perméable	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
PLANT SURVIVABILITY TERMS						
	A1223(08)	A2223(08)	A1223(08)	B2223(08)	C1223(08)	C2223(08)
Temps total - Accumulation en surface	1,5	224,3	1,5	206,3	0	7
Temps maximal - Accumulation en surface	1,5	41	1,5	40,5	0	3,5
Temps total - Saturation zone racinaire	11,3	323	10	299	0	31,8
Temps total - Flétrissement zone racinaire	81,5	0	90,3	0	806,3	0
Temps maximal - Saturation zone racinaire	7,8	47,3	7,5	47	0	14,3
Temps maximal - Flétrissement zone racinaire	77,3	0	90,3	0	251,3	0
Qtée - Saturation	4	19	3	16	0	4
Qtée - Flétrissement	2	0	1	0	7	0
Qtée - Accumulation en surface	2	14	1	15	0	2
Qtée - Débordement	0	1	0	1	0	0

Tableau-A V-2 Stationnement - Résultats récapitulatifs - Équilibre hydrologique et survie de la plante pour la période d'avril à octobre 2008

	A1223(06)	A2223(06)	B1223(06)	B2223(06)	C1223(06)	C2223(06)
INPUT TERMS						
%Impervious=	72,2	72,2	85,2	85,2	64	64
Pervious CN=	61	61	61	61	61	61
Facility Area (m2)=	131,77	131,77	208,85	208,85	31,71	31,71
Trib. Area (m2)=	1430	1430,06	1827,72	1827,7	142,98	142,98
RATIOimp2rg=	7,83532	7,83565	7,45615	7,45607	2,88575	2,88575
RATIOperv2rg=	3,01692	3,01705	1,2952	1,29519	1,62324	1,62324
LAYER						
	DEPTH (cm)					
Depression	15	15	15	15	15	15
Root Zone	60	60	60	60	60	60
Storage	40	40	40	40	40	40
Native	---	---	---	---	---	---
Init. Cond.: suction head (cm)=	-100	-100	-100	-100	-100	-100
Max. Underdrain flow (cm/hr)=	0	0	0	0	0	0
Underdrain diam (mm)=	200	200	200	514	200	200
WATER BALANCE TERMS						
(volumes en m cu)	A1223(06)	A2223(06)	B1223(06)	B2223(06)	C1223(06)	C2223(06)
Ruissellement	809,85	809,88	1206,24	1206,22	86,34	86,34
Débordement	0	93,24	0	107,32	0	0
Recharge	453,24	472,17	701,3	729,05	63,65	63,43
Évaporation	94,21	87,45	149,32	139,5	22,67	22,26
Drain de fond	273,03	156,37	372,56	229,37	2,94	1,96
Storage	-10,63	0,65	-16,94	0,98	-2,92	-1,31
Infiltration	809,85	716,64	1206,24	1098,91	86,34	86,34
Ruissellement - imperméable	527,12	527,15	501,62	501,61	194,14	194,14
Ruissellement - perméable	20,19	20,19	8,67	8,67	10,86	10,86
PLANT SURVIVABILITY TERMS						
(Temps en heures)	A1223(06)	A2223(06)	B1223(06)	B2223(06)	C1223(06)	C2223(06)
Temps total - Accumulation en surface	10,3	667,8	8,5	634,3	0	154,3
Temps maximal - Accumulation en surface	4,5	77,3	3,8	77,3	0	34,5
Temps total - Saturation zone racinaire	69	853,8	61,5	810	3,8	329,3
Temps total - Flétrissement zone racinaire	41	0	43,3	0	166,8	0
Temps maximal - Saturation zone racinaire	15,5	81,8	14,3	81,8	2,8	40
Temps maximal - Flétrissement zone racinaire	30,8	0	31	0	79	0
Qtée - Saturation	21	27	20	27	3	20
Qtée - Flétrissement	3	0	3	0	4	0
Qtée - Accumulation en surface	8	23	7	24	3	15
Qtée - Débordement	0	7	0	7	0	0

Tableau-A V-3 Commerces - Résultats récapitulatifs - Équilibre hydrologique et survie de la plante pour la période d'avril à octobre 2006, taux d'infiltration 5,7 cm/hr

	A1215(06)	B1215(06)	D1215(06)	E1215(06)	F1215(06)	G1215(06)	H1215(06)	I1215(06)
INPUT TERMS								
%Impervious=	100	100	100	100	100	100	100	100
Pervious CN=	80	80	80	80	80	80	80	80
Facility Area (m2)=	65	55	60	140	100	470	46	48
Trib. Area (m2)=	806	658	501	1755	1259	2630	576	600
RATIOimp2rg=	12,4	11,9636	8,35	12,5357	12,59	5,59574	12,5217	12,5
RATIOperv2rg=	0	0	0	0	0	0	0	0
LAYER								
	DEPTH (cm)							
Depression	15	15	15	15	15	15	15	15
Root Zone	60	60	60	60	60	60	60	60
Storage	5	5	5	5	5	5	5	5
Native	---	---	---	---	---	---	---	---
Init. Cond.: suction head (cm)=	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
Max. Underdrain flow (cm/hr)=	0	0	0	0	0	0	0	0
Underdrain diam (mm)=	150	150	150	150	150	150	150	150
WATER BALANCE TERMS								
(volumes en m cu)	A1215(06)	B1215(06)	D1215(06)	E1215(06)	F1215(06)	G1215(06)	H1215(06)	I1215(06)
Ruisselement	585,97	479,67	377,42	1274,87	914,27	2085,54	418,45	435,94
Débordement	2,33	1,22	0	5,56	4,12	0	1,81	1,86
Recharge	171,42	143,67	140,1	370,05	264,6	934,92	121,56	126,8
Évaporation	46,47	39,32	42,9	100,09	71,49	336,02	32,89	34,32
Drain de fond	368,53	297,82	197,05	805,16	578,34	835,49	264,16	275,02
Storage	-2,78	-2,36	-2,63	-5,99	-4,28	-20,89	-1,97	-2,05
Infiltration	583,64	478,45	377,42	1269,31	910,15	2085,54	416,64	434,09
Ruisselement - imperméable	834,22	804,86	561,75	843,35	847	376,46	842,41	840,94
Ruisselement - perméable	0	0	0	0	0	0	0	0
PLANT SURVIVABILITY TERMS								
	A1215(06)	B1215(06)	D1215(06)	E1215(06)	F1215(06)	G1215(06)	H1215(06)	I1215(06)
Temps total - Accumulation en surface	19,8	18,8	8,3	20,5	20,5	2,8	19,8	19,8
Temps maximal - Accumulation en surface	6,5	6,3	4,3	6,5	6,5	2,5	6,5	6,5
Temps total - Saturation zone racinaire	141,3	135	71	142,8	143,5	13,8	142,5	142,3
Temps total - Flétrissement zone racinaire	23,5	23,8	28,3	23,5	23,5	30,3	23,5	23,5
Temps maximal - Saturation zone racinaire	4537,5	4532,8	4435,3	4538,5	4539,3	4223,3	4538,3	4538,3
Temps maximal - Flétrissement zone racinaire	23,5	23,8	28,3	23,5	23,5	29,5	23,5	23,5
Qtée - Saturation	33	33	22	34	34	11	34	34
Qtée - Flétrissement	1	1	1	1	1	3	1	1
Qtée - Accumulation en surface	21	20	8	20	19	4	20	20
Qtée - Débordement	1	1	0	1	1	0	1	1

Tableau-A V-4 Commerces - Résultats récapitulatifs - Équilibre hydrologique et survie de la plante pour la période d'avril à octobre 2006, taux d'infiltration 0,5 cm/hr

	A2215(06)	B2215(06)	D2215(06)	E2215(06)	F2215(06)	G2215(06)	H2215(06)	I2215(06)
INPUT TERMS								
%Impervious=	100	100	100	100	100	100	100	100
Pervious CN=	80	80	80	80	80	80	80	80
Facility Area (m2)=	65	55	60	140	100	470	46	48
Trib. Area (m2)=	806	658	501	1755	1259	2630	576	600
RATIOimp2rg=	12,4	11,9636	8,35	12,5357	12,59	5,59574	12,5217	12,5
RATIOperv2rg=	0	0	0	0	0	0	0	0
LAYER								
	DEPTH (cm)							
Depression	15	15	15	15	15	15	15	15
Root Zone	60	60	60	60	60	60	60	60
Storage	5	5	5	5	5	5	5	5
Native	---	---	---	---	---	---	---	---
Init. Cond.: suction head (cm)=	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
Max. Underdrain flow (cm/hr)=	0	0	0	0	0	0	0	0
Underdrain diam (mm)=	150	150	150	150	150	150	150	150
WATER BALANCE TERMS								
(volumes en m cu)	A2215(06)	B2215(06)	D2215(06)	E2215(06)	F2215(06)	G2215(06)	H2215(06)	I2215(06)
Ruissellement	585,97	479,67	377,42	1274,87	914,27	2085,54	418,45	435,94
Débordement	138,22	107,01	41,46	305,81	220,71	67,55	100,21	104,13
Recharge	198,79	166,02	155,76	429,83	307,51	986,49	141,18	147,23
Évaporation	41,18	35	39,6	88,56	63,22	321,11	29,1	30,38
Drain de fond	206,71	170,74	139,66	448,35	321,18	704,97	147,21	153,41
Storage	1,08	0,9	0,94	2,31	1,65	5,41	0,76	0,79
Infiltration	447,75	372,66	335,96	969,06	693,57	2017,99	318,24	331,82
Ruissellement - imperméable	834,22	804,86	561,75	843,35	847	376,46	842,41	840,94
Ruissellement - perméable	0	0	0	0	0	0	0	0
PLANT SURVIVABILITY TERMS								
	A2215(06)	B2215(06)	D2215(06)	E2215(06)	F2215(06)	G2215(06)	H2215(06)	I2215(06)
Temps total - Accumulation en surface	968	943,3	700	976	979	436	976	973,5
Temps maximal - Accumulation en surface	106,3	106,3	77,3	106,3	106,3	69	106,3	106,3
Temps total - Saturation zone racinaire	1180,5	1161,8	922,3	1187,3	1191	669	1187,8	1186,5
Temps total - Flétrissement zone racinaire	0	0	0	0	0	0	0	0
Temps maximal - Saturation zone racinaire	4799,3	4795	4697,3	4800,8	4801,3	4571	4800,8	4800,5
Temps maximal - Flétrissement zone racinaire	0	0	0	0	0	0	0	0
Qtée - Saturation	28	28	29	28	28	21	28	28
Qtée - Flétrissement	0	0	0	0	0	0	0	0
Qtée - Accumulation en surface	32	33	25	31	30	24	31	31
Qtée - Débordement	12	12	8	12	12	2	12	12

Tableau-A V-6 Commerces - Résultats récapitulatifs - Équilibre hydrologique et survie de la plante pour la période d'avril à octobre 2008, taux d'infiltration 0,5 cm/hr

	A2215(08)	B2215(08)	D2215(08)	E2215(08)	F2215(08)	G2215(08)	H2215(08)	I2215(08)
INPUT TERMS								
%Impervious=	100	100	100	100	100	100	100	100
Pervious CN=	80	80	80	80	80	80	80	80
Facility Area (m2)=	65	55	60	140	100	470	46	48
Trib. Area (m2)=	806	658	501	1755	1259	2630	576	600
RATIOimp2rg=	12,4	11,9636	8,35	12,5357	12,59	5,59574	12,5217	12,5
RATIOperv2rg=	0	0	0	0	0	0	0	0
LAYER								
	DEPTH (cm)							
Depression	15	15	15	15	15	15	15	15
Root Zone	60	60	60	60	60	60	60	60
Storage	5	5	5	5	5	5	5	5
Native	---	---	---	---	---	---	---	---
Init. Cond.: suction head (cm)=	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
Max. Underdrain flow (cm/hr)=	0	0	0	0	0	0	0	0
Underdrain diam (mm)=	150	150	150	150	150	150	150	150
WATER BALANCE TERMS								
(Volumes en m cu)	A2215(08)	B2215(08)	D2215(08)	E2215(08)	F2215(08)	G2215(08)	H2215(08)	I2215(08)
Ruissellement	291,28	238,44	187,61	633,73	454,48	1036,71	208,01	216,71
Débordement	16,95	12,08	1,81	39,08	28,84	0	12,74	13,19
Recharge	135,18	111,88	93,54	292,86	209,58	521,64	96,17	100,27
Évaporation	44,3	37,59	42,22	95,35	68,09	337,31	31,33	32,7
Drain de fond	94	76,18	49,6	204,62	146,68	176,42	67,17	69,92
Storage	0,84	0,71	0,44	1,82	1,3	1,34	0,6	0,62
Infiltration	274,33	226,36	185,8	594,65	425,63	1036,71	195,27	203,52
Ruissellement - imperméable	414,69	400,09	279,24	419,22	421,04	187,14	418,76	418,03
Ruissellement - perméable	0	0	0	0	0	0	0	0
PLANT SURVIVABILITY TERMS								
	A2215(08)	B2215(08)	D2215(08)	E2215(08)	F2215(08)	G2215(08)	H2215(08)	I2215(08)
Temps total - Accumulation en surface	440,8	422,3	251	446	448	110	445,8	445
Temps maximal - Accumulation en surface	47,5	45,3	41	48	48	27,5	48	48
Temps total - Saturation zone racinaire	611,5	590,8	379	616,8	619,8	206,5	616,5	616,3
Temps total - Flétrissement zone racinaire	0	0	0	0	0	0	0	0
Temps maximal - Saturation zone racinaire	56,8	56,8	47,8	56,8	56,8	34,8	56,8	56,8
Temps maximal - Flétrissement zone racinaire	0	0	0	0	0	0	0	0
Qtée - Saturation	25	24	19	25	25	14	25	25
Qtée - Flétrissement	0	0	0	0	0	0	0	0
Qtée - Accumulation en surface	28	27	15	28	29	13	28	29
Qtée - Débordement	4	3	1	7	7	0	7	7

Tableau-A V-7 Stationnement- Résultats récapitulatifs - Analyse de sensibilité de la cellule A pour l'équilibre hydrologique et survie de la plante pour la période d'avril à octobre 2006

	A1123(06)	A1223(06)	A1323(06)	A1423(06)	A2223(06)	A1213(06)	A1233(06)	A1221(06)	A1222(06)	A1224(06)
INPUT TERMS										
%Impervious=	72,2	72,2	72,2	72,2	72,2	72,2	72,2	72,2	72,2	72,2
Pervious CN=	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
Facility Area (m2)=	131,77	131,77	131,77	131,77	131,77	131,77	131,77	131,77	131,77	131,77
Trib. Area (m2)=	1430	1430	1430	1430	1430,06	1430,06	1430,06	1430,06	1430,06	1430,06
RATIOimp2rg=	7,83532	7,83532	7,83532	7,83532	7,83565	7,83565	7,83565	7,83565	7,83565	7,83565
RATIOperv2rg=	3,01692	3,01692	3,01692	3,01692	3,01705	3,01705	3,01705	3,01705	3,01705	3,01705
LAYER										
	DEPTH (cm)									
Depression	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Root Zone	30	60	90	120	60	60	60	60	60	60
Storage	40	40	40	40	40	5	80	40	40	40
Native	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Init. Cond.: suction head (cm)=	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
Max. Underdrain flow (cm/hr)=	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Underdrain diam (mm)=	200	200	200	200	200	200	200	0	100	300
WATER BALANCE TERMS										
(volumes en m cu)	A1123(06)	A1223(06)	A1323(06)	A1423(06)	A2223(06)	A1213(06)	A1233(06)	A1221(06)	A1222(06)	A1224(06)
Ruisselement	809,85	809,85	809,85	809,85	809,88	809,88	809,88	809,88	809,88	809,88
Débordement	0	0	0	0	93,24	0	0	109,47	0	0
Recharge	431,45	453,24	474,81	496,15	472,17	302,04	532,26	605,32	453,28	453,28
Évaporation	86,08	94,21	94,21	94,21	87,45	94,21	94,21	79,63	94,21	94,21
Drain de fond	301,97	273,03	251,08	229,2	156,37	419,4	190,59	0	273,02	273,02
Storage	-9,65	-10,63	-10,25	-9,7	0,65	-5,77	-7,18	10,24	-10,63	-10,63
Infiltration	809,85	809,85	809,85	809,85	716,64	809,88	809,88	695,19	809,88	809,88
Ruisselement - imperméable	527,12	527,12	527,15	527,15	527,15	527,15	527,15	527,15	527,15	527,15
Ruisselement - perméable	20,19	20,19	20,19	20,19	20,19	20,19	20,19	20,19	20,19	20,19
PLANT SURVIVABILITY TERMS										
	A1123(06)	A1223(06)	A1323(06)	A1423(06)	A2223(06)	A1213(06)	A1233(06)	A1221(06)	A1222(06)	A1224(06)
Temps total - Accumulation en surface	14,5	10,3	8	7	667,8	8,3	11,3	918,8	10,3	10,3
Temps maximal - Accumulation en surface	4,8	4,5	4,3	4	77,3	4,5	4,5	198,3	4,5	4,5
Temps total - Saturation zone racinaire	87,8	69	57	47,3	853,8	66,3	67,3	996	69	69
Temps total - Flétrissement zone racinaire	506,5	41	0	0	612,3	4414,5	489	1440,8	568	568
Temps maximal - Saturation zone racinaire	80,3	15,5	11,5	8,3	115,8	915,5	134,3	330,3	85	85
Temps maximal - Flétrissement zone racinaire	216,8	30,8	0	0	0	28,5	30,8	0	30,8	30,8
Qtée - Saturation	31	21	12	10	27	22	22	15	21	21
Qtée - Flétrissement	5	3	0	0	0	2	3	0	3	3
Qtée - Accumulation en surface	20	8	5	4	23	10	9	10	8	8
Qtée - Débordement	0	0	0	0	7	0	0	9	0	0

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Akan, A. Osman, et Robert J. Houghtalen. 2003. *Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality engineering applications and computer modeling*. Hoboken, N.J.: J. Wiley & Sons, 373 p.
- Anctil, François, Jean Rouselle et Nicolas Lauzon. 2005. *Hydrologie : cheminement de l'eau*. Montréal, 317 p.
- Asadian, Yeganeh, et Markus Weiler. 2009. « A new approach in Measuring Rainfall Interception by Urban Trees in Coastal British Columbia ». *Water quality research journal of Canada*, vol. 44, p. 16-25.
- Asleson, Brooke C., Rebecca S. Nestingen, John S. Gulliver, Raymond M. Hozalski et John L. Nieber. 2009. « Performance Assessment of Rain Gardens ». *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 45, n° 4, p. 1019-1031.
- Atchison, Dustin; Potter, Ken; Severson, Linda. 2006. *Design guidelines for stormwater bioretention facilities*. Université de Wisconsin - Madison, 33 p.
- Bidlake, William R. 2002. « Evapotranspiration and canopy resistance at an undeveloped prairie in a humid subtropical climate ». *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 38, n° 1, p. 197-211.
- Boucher, Isabelle. 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. MAMROT (en ligne). Consulté le 26 avril 2010.
- Brown, Robert A., et William F. Hunt III. 2010. « Impacts of Construction Activity on Bioretention Performance ». *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 15, n° 6, p. 386-394.
- Bureau de Normalisation du Québec, BNQ. 2001. *Aménagement à l'aide de végétaux*. 0605-100. Québec (Qc), 185 p.
- Carpenter, Donald D., et Laura Hallam. 2010. « Influence of Planting Soil Mix Characteristics on Bioretention Cell Design and Performance ». *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 15, n° 6, p. 404-416.
- City of Portland. 2008. *Stormwater management manual*. Portland.
- Clar, M. L., Billy J. Barfield et Thomas O'Connor. 2004. « BMP design guidelines: Vegetative biofilters ». In., p. 679-687. Coll. « Proceedings of the 2004 World Water

and Environmental Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management ». Salt Lake City, UT, United States: American Society of Mechanical Engineers, New York, NY 10016-5990, United States.

- Conseil National de Recherches du Canada, et Fédération canadienne des municipalités. 2004. *Planification de la gestion des eaux pluviales : une règle de l'art du guide national pour des infrastructures municipales durables (Infraguide)*. Coll. « Guide National pour des infrastructures municipales durables (Infraguide) ». 57 p.
- Davis, Allen P. 2008. « Field performance of bioretention: Hydrology impacts ». *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 13, n° 2, p. 90-95.
- Davis, Allen P., William F. Hunt III, Robert G. Traver et M. L. Clar. 2009. « Bioretention technology : overview of current practices and futur needs ». *Journal of Environmental Engineering*, vol. 135, n° 3, p. 109-117.
- Davis, Allen P., Mohammad Shokouhian et Shubei Ni. 2001. « Loading estimates of lead, copper, cadmium and zinc in urban runoff from specific sources ». *Chemosphere* vol. 44, p. 997-1009.
- Departement of Environmental Ressources, DER. 2007. *The Bioretention Manual*. Prince George's County, Maryland: Department of Environmental Resources, Programs & Planning Division, 145 p.
- Department of Environmental Resources. 2002. *The Bioretention Manual*. Prince George's County, Maryland: Department of Environmental Resources, Programs & Planning Division, 145 p.
- Dietz, Michael E. 2007. « Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions ». *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 186, n° 1-4, p. 351-363.
- Dietz, Michael E., et John C. Clausen. 2005. « A field evaluation of rain garden flow and pollutant treatment ». *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 167, n° 1-4, p. 123-138.
- Dietz, Michael E., et John C. Clausen. 2006. « Saturation to improve pollutant retention in a rain garden ». *Environmental Science and Technology*, vol. 40, n° 4, p. 1335-1340.
- Echols, Stuart. 2007. « Artful rainwater desing in the urban landscape ». *Journal of Green Building*, vol. 2, n° 4, p. 1-19.
- Engineers, American Society of Civil. 1996. *Hydrology handbook*. New York, N.Y. : American Society of Civil Engineers 784 p.

- Environnement Canada. 2009. *Archives nationales d'information et de données climatologiques*. en ligne.
<http://climate.weatheroffice.gc.ca/climateData/canada_f.html>.
- États-Unis. 1977. *Clean Water Act*.
- Ghazavi, G., Z. Thomas, Y. Hamon, J.C. Marie, M. Corson et P. Merot. 2008. « Hedgerow impacts on soil-water transfer due to rainfall interception and root-water uptake ». *Hydrological Processes*.
- Grimmond, C. S. B., et T. R. Oke. 1999. « Evapotranspiration rates in urban areas ». *IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences)*, n° 259, p. 235-243.
- Hagishima, Aya, Ken-Ich Narita et Jun Tanimoto. 2007. « Field experiment on transpiration from isolated urban plants ». *Hydrological Processes*, vol. 21, n° 9, p. 1217-1222.
- Harris, W. Richard, Clark, James R., Matheny, Nelda P. 2002. *Arboriculture : Integrated Management of Landscape Trees, Shrubs and Vines*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall International.
- Horton, Robert E. 1919. « Rainfall Interception ». *Monthly Weather Review*, vol. 47, n° 9 (septembre), p. 608-623.
- Hunt, W. F., A. R. Jarrett, J. T. Smith et L. J. Sharkey. 2006. « Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina ». *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 132, n° 6, p. 600-608.
- Jensen, H. E., K. H. Jensen et D. Rosbjerg. 1991. « Plant water relationships and evapotranspiration ». In, 204. p. 295-307. Coll. « IAHS Publication (International Association of Hydrological Sciences) ». Vienna, Austria: Publ by IAHS, Wallingford, Engl.
- Kenney, W.A. 2008. « Potential Leaf Area Index Analyses for the City of Toronto's Urban Forest ». In *Ecology, Planning and Management of Urban Forests : International Perspectives*, sous la dir. de Carreiro, Margaret M., Song, Yong-Chang and Wu, Jianguo p. 336-345. Coll. « Springer Series on Environmental Management ». Springer.
- Lee, C.C. 2000. *Handbook of environmental engineering calculations*. McGraw-Hill.
- Lee, Sang-Hyun, et Soon-Ung Park. 2008. « A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling ». *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 126, n° 1, p. 73-102.

- Li, Houg, et Allen P. Davis. 2008. « Heavy metal capture and accumulation in bioretention media (Environmental Science and Technology (2008) 42, (5247-5253)) ». *Environmental Science and Technology*, vol. 42, n° 17, p. 6776.
- Llamas, José. 1993. *Hydrologie générale : Principes et applications*. Boucherville: Gaetan Morin Ltée.
- Macon, E. Scott, Qingfu Xiao, Simpson James R. et E. Gregory McPherson. 2004. *University of California Davis Campus Tree Resource Analysis*. PDF, disponible en ligne. CUFR-6. Davis (CA), 43 p.
- Mailhot, Alain, Sophie Duchesne, Caroline Larrivée, Geneviève Pelletier, Samuel Bolduc, Frédéric Rondeau, Ahmadi Kingumbi et Guillaume Talbot. 2008. *Conception et planification des intercession de renouvellement des infrastructures de drainage urbain dans un contexte d'adaptation aux changements climatiques*. PDF en ligne <http://www.ouranos.ca>. Coll. « Rapport de recherche/ INRS-Eau, Terre et Environnement », R-920. Québec: INRS-ETE, 158 p.
- Mailhot, Alain, Gilles Rivard, Sophie Duchesne et Jean-Pierre Villeneuve. 2007. *Impacts et adaptations liées aux changements climatiques (CC) en matière de drainage urbain au Québec*. PDF en ligne <http://www.ouranos.ca>. Coll. « Rapport de recherche / INRS-Eau, Terre et Environnement », R-874. Montréal: INRS-ETE, 144 p.
- Marsalek, Jiri, et Hans Schrieir. 2009. « Innovation in stormwater management in Canada : The way forward ». *water quality ressearch journal of Canada*, vol. 44, n° 1, p. v-x.
- McPherson, E. G. 2000. *Urban Forestry issues in North America and their global linkages*. Coll. « 20th Session of the North American Forestry Commission ».
- Minnesota Stormwater Steering Committee , MSSC. 2006. *Minnesota Stormwater Manual*. 643 p.
- Muthanna, T. M., Maria Viklander et Tone T. Thorolfsson. 2007. « An evaluation of applying existing bioretention sizing methods to cold climates with snow storage conditions ». *Water Science and Technology*, vol. 56, n° 10, p. 73-81.
- Muthanna, Tone M., Maria Viklander, Nina Gjesdahl et Sveinn T. Thorolfsson. 2007a. «Heavy metal removal in cold climate bioretention ». *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 183, n° 1-4, p. 391-402.
- Muthanna, Tone Merete, Maria Viklander, Godecke Blecken et Sveinn T. Thorolfsson. 2007b. « Snowmelt pollutant removal in bioretention areas ». *Water Research*, vol. 41, n° 18, p. 4061-4072.

- Muzylo, A., P. Llorens, F. Vlaente, J.J. Keizer, F. Domingo et J.H.C. Cash. 2009. « A review of rainfall interception modelling ». *Journal of Hydrologic*, vol. 370, n° 1-4, p. 191-206.
- Nowak, David J. 1996. « Estimating Leaf Area and Leaf Biomass of Open-Grown Deciduous Urban Trees ». *Forest Science*, vol. 42, n° 4, p. 504-507.
- Pellerin, Gervais. 2005. *Répertoire des arbres et arbustes ornementaux*. Hydro-Québec, 547 p.
- Pion, Caroline, Leconte, Robert, Rousselle, Jean, Gagnon, Sébastien. 2005. « Modélisation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle régionale pour des bassins versants situés dans la forêt boréale ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 32, n° 5, p. 839-852.
- Québec. 2002. *Politique nationale de l'eau : L'eau. La vie. L'avenir*. Québec (Québec), 103 p.
- Rahgozar, Manda, Nirjhar Shah et Mark Ross. 2007. « Estimation of Evapotranspiration and Water Budget Components Using Continuous Soil Moisture and Water Table Monitoring ». In *World Environmental and Water Resources Congress 2007*, 40927. Vol. 243, p. 335-335. Tampa, Florida, USA: ASCE. In *ASCE Research Library*. <<http://link.aip.org/link/?ASC/243/335/1>>.
- Ressources naturelles Canada. 2008. *Atlas hydrologique du Canada 1978*. En ligne. <<http://atlas.nrcan.gc.ca/auth/francais/maps/environnement>>.
- Ricklefs, Robert E., Miller, Gary L. 1999. *Ecology*. New York, 822 p.
- Rivard, Gilles. 2005. *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain : concepts et applications*. Laval, Québec: Alias communication design inc., 329 p.
- Roseen, Robert M., Thomas P. Ballestero, James J. Houle, Pedro Avelleneda, Robert Wildey et Joshua Briggs. 2006. « An examination of cold climate performance of low impact development stormwater bmps in a northern climate ». In., p. 20. Coll. « Proceedings of the International Conference on Cold Regions Engineering ». Orono, ME, United States: American Society of Civil Engineers, Reston, VA 20191-4400, United States. <[http://dx.doi.org/10.1061/40836\(210\)20](http://dx.doi.org/10.1061/40836(210)20)>.
- Rushton, K. R. 2002. *Groundwater Hydrology : Conceptual and computational models*. New York, 416 p.
- Schueler, Thomas R. 1987. *Controlling urban runoff : a practical manual for planning and designing urban BMPs*. Washington, D.C.: Metropolitan Washington Council of Governments.

- Scurlock, J. M. O, G. P. Asner et T. Gower. 2001. *Global Leaf Area Index from Field Measurements, 1932-2000. Data set.*: NASA.
- Sharkey, Lucas J., et William F. Hunt III. 2005. « Hydrologic and water quality performance of four bioretention cells in central North Carolina ». In., p. 833-842. Coll. «Proceedings of the 2005 Watershed Management Conference - Managing Watersheds for Human and Natural Impacts: Engineering, Ecological, and Economic Challenges». Williamsburg, VA, United States: American Society of Civil Engineers, Reston, VA 20191-4400, United States.
- Soltner, Dominique. 2005. *Les bases de la production végétale : Tome I - Le sol et son amélioration*. Coll. « Sciences et Techniques Agricoles », 1. France: Sciences et Techniques Agricoles, 472 p.
- Toronto and Region Conservation Authority, TRCA. 2006. *Performance Evaluation of Permeable Pavement and a Bioretention Swale : Seneca College, King City, Ontario*. 65 p.
- Urban, James. 2004. « Growing the urban forest ». In *Tree Symposium Healthy Trees for a Beautiful City* (Toronto). p. 20. Toronto.
- Vergriete, Yann, et Michel Labrecque. 2007. *Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : revue de littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais*. Institut de recherche en biologie végétale, 36 p.
- Vermont Agency of Natural Resources. 2002. *The Vermont stormwater management manual : Volume II - Technical Guidance*. 260 p.
- Wang, Anzhi, Yiwei Diao, Tiefan Pei, Changjie Jin et Jiaojun Zhu. 2007. « A semi-theoretical model of canopy rainfall interception for a broad-leaved tree ». *Hydrological Processes*, vol. 21, n° 18, p. 2458-2463.
- Wang, Jun, Theodore A. Endreny et David J. Nowak. 2008. « Mechanistic simulation of tree effects in an urban water balance model ». *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 44, n° 1, p. 75-85.
- Xiao, Qingfu, et E. G. McPherson. 2008. *Urban runoff pollutants removal of three engineering soils*. 33 p.
- Xiao, Qingfu, et E. G. McPherson. 2009. *Testing a bioswale to treat and reduce parking lot runoff*. 26 p.
- Xiao, Qingfu, E. G. McPherson, J. R. Simpson et S. L. Ustin. 1998. « Rainfall interception by Sacramento's urban forest ». *Journal of Arboriculture*, vol. 24, n° 4, p. 225-244.

- Xiao, Qingfu et E. G. McPherson. 2002. « Rainfall interception by Santa Monica's municipal urban forest ». *Urban Ecosystems*, vol. 6, p. 291-302.
- Xiao, Qingfu, E. G. McPherson, J. R. Simpson et S. L. Ustin. 2007. « Hydrologic processes at the urban residential scale ». *Hydrological Processes*, vol. 21, n° 16, p. 2174-2188.
- Xiao, Qingfu, E. G. McPherson, S. L. Ustin et M. E. Grismer. 2000a. « A new approach to modeling tree rainfall interception ». *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, n° D23, p. 29173-88.
- Xiao, Qingfu, E. Gregory McPherson, Susan L. Ustin, Mark E. Grismer et James R. Simpson. 2000b. « Winter rainfall interception by two mature open-grown trees in Davis, California ». *Hydrological Processes*, vol. 14, n° 4, p. 763-784.

