

MARIE PARÉ-BOURQUE

**GESTION DES EAUX PLUVIALES :
Qualité des eaux et contrôle en temps réel**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en Génie Civil
pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

GÉNIE CIVIL
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

MARS 2008

Résumé

L'objectif de ce projet est d'intégrer le concept de gestion des eaux pluviales avec le contrôle en temps réel afin de réduire l'impact de ces eaux sur les cours d'eau urbains. Il s'agit d'effectuer la gestion des eaux pluviales d'un bassin versant typiquement urbain, en fonction des prévisions météorologiques, au niveau d'un bassin d'orage, muni d'une vanne à son exutoire, afin d'augmenter le temps de rétention des eaux et ainsi augmenter la sédimentation. Après modélisation de la qualité et quantité des eaux et l'élaboration de règles de contrôle, le contrôle en temps réel s'est avéré être une solution efficace afin d'augmenter la sédimentation des matières en suspension dans le bassin de rétention. Dans tous les cas étudiés, le bassin contrôlé offrait une efficacité de sédimentation supérieure à celle du bassin traditionnel contrôlé par un ouvrage statique, tel un orifice. Le contrôle en temps réel a démontré qu'il augmentait la sédimentation des particules fines, sur lesquelles la majorité des polluants s'adsorbent. La modélisation des matières en suspension, à l'entrée et à la sortie du bassin de rétention, a permis de démontrer l'efficacité de cette solution en quantifiant les charges à ces endroits. Dans tous les cas, la quantité de MES sédimentées était au moins 2 fois plus importante que la quantité sédimentée dans un bassin non-contrôlé. Dans les meilleurs cas, la quantité sédimentée a été de 10 à 25 fois plus importante avec le bassin contrôlé. Sur une période mensuelle, le bassin contrôlé a rejeté au maximum 14,78 kg des 650 kg de MES qui ont été lessivés dans tous les scénarios étudiés. Dans le cas de simulations estivales, des 3 000 kg de MES lessivés en moyenne par saison, pour tous les scénarios, un maximum de 16,59 kg a été rejeté au milieu récepteur. La solution proposée permet donc de réduire considérablement les charges en polluants rejetés, ce qui permet de croire que son intégration, dans la gestion des eaux pluviales, permettrait d'améliorer significativement la qualité des eaux des cours d'eau urbains.

Abstract

The objective of this contribution is to integrate real-time control (RTC) in stormwater management to reduce the impact on local aquatic ecosystems. This is achieved by managing stormwater from a typical urban catchment by equipping existing stormwater ponds with a dynamic sluice gate. The goal is to increase the water retention time in the pond to increase sedimentation and thus removal of suspended solids and the pollutants attached to them. Based on modeling water quality and quantity and implementing dedicated control algorithms for the sluice gate, real-time control proved to be an effective solution for reducing the suspended solids discharge in the urban river. In all studied cases, the controlled ponds offered a sedimentation efficiency higher than a traditional pond controlled solely by a static device, as in an orifice. Simulation proved that it increased sedimentation of fine particles, on which the majority of contaminants are agglomerated. The modeling of suspended solids at the stormwater pond inlet and outlet helped demonstrating the efficiency of this solution by quantifying the pollutant load at these two points. The quantity of particles removed by sedimentation for the three studied summer periods was at least twice as large as in an uncontrolled pond. In the best of scenarios, the removal of particles reached 10 to 25 times that of a traditional pond. On a monthly basis, the controlled pond released 14,78 kg of the 650 kg of total solid washoff for all studied cases. For the three summer periods, only 16,59 kg of the 3000 kg of suspended solids entering the pond were released into the receiving waters. This simulation study showed that the proposed solution to integrate real-time control in stormwater ponds has the potential to considerably reduce the load of contaminants released into the receiving waters, improving water quality in urban rivers and lakes and improving aquatic ecosystems in typical residential catchments.

Avant-Propos

J'aimerais profiter de ce temps pour remercier tous les acteurs qui ont permis la réalisation de ce projet. Tout d'abord, j'aimerais remercier ma directrice, Mme Geneviève Pelletier, pour m'avoir permis de faire ce projet avec elle, pour m'avoir donné la passion de l'hydraulique urbaine et pour avoir tant donné de sa personne et de son temps pour ma formation professionnelle et personnelle. Ensuite, mon codirecteur M. Peter Vanrolleghem, pour son temps, sa supervision, ses conseils et sa grande expérience. Il a su m'ouvrir à d'autres aspects de l'hydraulique urbaine. Je voudrais remercier aussi le directeur du programme de 2^e cycle, M. Paul Lessard, pour son expertise scientifique dans le domaine de la sédimentation.

Étant financée par une bourse à incidence industrielle du CRSNG, je voudrais remercier le grand soutien de mon partenaire industriel : la firme de génie conseil BPR, chez qui j'ai eu autant de plaisir à travailler, durant mes stages, qu'à travailler sur mon projet de maîtrise. Je voudrais remercier particulièrement Mme Nathalie Jolicoeur pour avoir eu confiance en moi et pour son intérêt envers ce projet, ainsi qu'à toute l'équipe de BPR CSO, le département d'hydrologie urbaine de BPR, pour leur temps et leur expertise. Sans oublier M. Pierre Lavallée, président et chef de la direction de BPR, M. Hubert Colas, vice-président de BPR CSO et M. Marc Patry, directeur des opérations de BPR CSO que je remercie pour m'avoir permis d'effectuer ce projet au sein de leur compagnie.

Je voudrais aussi remercier ma famille, parents et grands-parents, mon conjoint ainsi que mes amis qui m'ont fortement soutenue et encouragée durant tout ce temps.

Grâce à vous tous, ce projet a pu naître et conclure, et ainsi apporter une nouvelle contribution au monde scientifique.

Science sans conscience n'est que ruine de l'âme
Pantagruel- François Rabelais (1494-1553)

Table des matières

1.	Introduction.....	1
1.1	Caractérisation des eaux pluviales.....	2
1.2	Polluants d'origine urbaine.....	3
1.2.1	Décharge des eaux à grandes vitesses.....	3
1.2.2	Sédiments.....	4
1.2.3	Nutriments.....	5
1.2.4	Matières organiques biodégradables.....	5
1.2.5	Éléments pathogènes.....	6
1.2.6	Polluants toxiques.....	6
1.2.7	Hydrocarbures.....	6
1.2.8	Sels.....	7
1.2.9	Autres paramètres.....	7
1.3	Concentrations typiques des polluants d'origine urbaine dans les eaux de ruissellement.....	8
1.4	Impact de la pollution des eaux de ruissellement urbain sur le milieu récepteur.....	10
1.5	Méthodes de gestion des eaux pluviales permettant d'améliorer sa qualité.....	10
1.6	Dépollution des eaux par la sédimentation.....	11
2.	Objectifs du projet.....	14
3.	Méthodologie.....	15
3.1	Bassin versant fictif à l'étude.....	15
3.2	Modélisation de la qualité des eaux.....	17
3.2.1	Accumulation.....	17
3.2.2	Lessivage.....	21
3.2.3	Sédimentation.....	24
3.3	Contrôle en temps réel.....	26
3.4	Scénarios.....	30
3.4.1	Scénario de référence.....	32
3.4.2	Scénarios de comparaison.....	34
3.5	Séries pluviométriques.....	35

Article scientifique

4.	Potentiel d'une gestion des eaux pluviales dans un bassin de rétention par le contrôle en temps réel en fonction des prévisions météorologiques.....	39
	Résumé.....	39
1.	Introduction.....	40
1.1	Dépollution des eaux pluviales par le bassin de rétention.....	41
1.2	Facteurs qui améliorent la sédimentation.....	42
1.3	Augmentation du temps de résidence des eaux.....	43
1.4	Problèmes liés à l'augmentation du volume.....	45
2.	Objectifs de l'étude.....	46
3.	Méthodologie.....	47
3.1	Bassin versant étudié.....	48
3.2	Modélisation de la qualité.....	49

3.3	Règles de contrôle.....	53
3.4	Scénarios.....	54
3.4.1	Scénario de référence.....	54
3.5	Séries pluviométriques.....	56
4.	Résultats.....	61
4.1	Scénario de référence.....	62
4.2	Scénario 2.....	67
4.3	Scénario 3.....	70
4.4	Scénario 4.....	73
4.5	Discussion sur l'efficacité du contrôle en temps réel.....	76
4.6	Bilans estivaux.....	80
5.	Conclusion.....	91
	Références.....	94
5.	Conclusion.....	97
6.	Bibliographie.....	99
 Annexes		
	Annexe 1 – Pluies SEA.....	103
	Annexe 2 – Séries pluviométriques des étés 2004 à 2006.....	105
	Annexe 3 – Statistiques des séries pluviométriques des étés 2004 à 2006.....	108

Liste des tableaux

Tableau 1 : Concentration moyenne des eaux de ruissellement en polluants urbains pour les secteurs résidentiels et commerciaux (adapté de ASCE et WEF, 1992; Rivard, 1998)	8
Tableau 2 : Concentrations typiques des divers polluants urbains en fonction du type d'eau qui les véhicule (adapté de Environmental Protection Agency, 1993; Rivard, 1998)	9
Tableau 3 : Diamètres, fraction typique de la masse totale et vitesse de sédimentation des sédiments contenus dans les eaux de ruissellement (adapté de OMOE, 2003)	13
Tableau 4 : Accumulation des polluants totaux en fonction de l'occupation du sol (APWA, 1969)	19
Tableau 5 : Accumulation des matières en suspension en fonction de l'occupation du sol (APWA, 1969; Environmental Protection Agency, 1976).....	20
Tableau 6 : Caractéristiques utilisées pour la conception des bassins de rétention.....	31
Tableau 7 : Caractéristiques du bassin de rétention du scénario de référence	34
Tableau 8 : Caractéristiques du bassin de rétention de récurrence 2 ans	35
Tableau 9 : Caractéristiques des divers scénarios étudiés dans ce projet.....	35
Tableau 10 : Statistiques des divers événements de pluie durant le mois de juillet 2006 au pluviomètre 901 de la Ville de Québec.....	37
Tableau 11 : Statistiques de la pluviométrie durant les saisons estivales 2004 à 2006 au pluviomètre 901 de la Ville de Québec.....	38

Article scientifique

Tableau 1 : Diamètres, fraction typique de la masse totale et vitesse de sédimentation des sédiments contenus dans les eaux de ruissellement (adapté de OMOE, 2003)	49
Tableau 2 : Caractéristiques des divers scénarios étudiés dans ce projet.....	56
Tableau 3 : Statistiques des divers événements de pluie durant le mois de juillet 2006.....	58
Tableau 4 : Statistiques de la pluviométrie durant les saisons estivales 2004 à 2006.....	61
Tableau 5 : Récapitulatif des quantités en MES sortant des bassins de rétention par l'orifice selon les différents scénarios	79

Annexes

Tableau A1 : Statistiques de la série pluviométrique de l'été 2004	108
Tableau A2 : Statistiques de la série pluviométrique de l'été 2005	112
Tableau A3 : Statistiques de la série pluviométrique de l'été 2006	117

Liste des figures

Figure 1 : Schéma de modélisation du site étudié et caractéristiques des sous-bassins	16
Figure 2 : Les trois équations disponibles pour simuler l'accumulation des polluants (Tiré du logiciel XP-SWMM version 10.6, 2007).....	18
Figure 3 : Occupation du sol et longueur de bordure des divers sous-bassins	21
Figure 4 : Méthode exponentielle de lessivage (Tiré du logiciel XP SWMM version 10.6, 2007)	22
Figure 5 : Quantité de sédiments accumulés sur le sol d'un bassin versant en fonction de la quantité lessivée par le ruissellement	23
Figure 6 : Schéma décrivant les étapes du contrôle en temps réel	28
Figure 7 : Schéma des caractéristiques du bassin de rétention.....	32
Figure 8 : Courbes IDF pour la Ville de Québec (Tiré du logiciel AquaIDF version 4.1.2, 2007)	33
Figure 9 : Série pluviométrique du mois de juillet 2006 du pluviomètre 901 de la Ville de Québec	36

Article scientifique

Figure 1 : Schéma de modélisation du site étudié et caractéristiques des sous-bassins	48
Figure 2 : Série pluviométrique du mois de juillet 2006	57
Figure 3 : Série pluviométrique de l'été 2004	60
Figure 4 : Série pluviométrique de l'été 2006	60
Figure 5 : Série pluviométrique de l'été 2005	60
Figure 6 : Débit à l'entrée du bassin de rétention pour le bassin versant présentant 22,1% de coefficient de ruissellement	62
Figure 7 : Concentration en MES à l'entrée du bassin de rétention pour le bassin versant présentant 22,1% de coefficient de ruissellement	62
Figure 8 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention sans contrôle pour le scénario de référence.....	63
Figure 9 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention avec contrôle pour le scénario de référence.....	64
Figure 10 : Débit sortant du bassin de rétention sans contrôle pour le scénario de référence.....	64
Figure 11 : Débit sortant du bassin de rétention avec contrôle pour le scénario de référence.....	65
Figure 12 : Concentration en MES à la sortie du bassin de rétention sans contrôle pour le scénario de référence.....	66
Figure 13 : Concentration en MES à la sortie du bassin de rétention avec contrôle pour le scénario de référence.....	67
Figure 14 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention sans contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 22,1% de coefficient de ruissellement ..	67
Figure 15 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention avec contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 22,1% de coefficient de ruissellement. .	68
Figure 16 : Concentration en MES à la sortie du bassin de rétention sans contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 22,1% de coefficient de ruissellement	69

Figure 17 : Concentration en MES à la sortie du bassin de rétention avec contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 22,1% de coefficient de ruissellement	69
Figure 18 : Débit à l'entrée du bassin de rétention pour le bassin versant de 50% de ruissellement	70
Figure 19 : Concentration en MES à l'entrée du bassin de rétention pour le bassin versant de 50% de ruissellement.....	70
Figure 20 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention sans contrôle pour le scénario du bassin 10 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement ..	71
Figure 21 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention avec contrôle pour le scénario du bassin 10 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement	71
Figure 22 : Concentrations en MES à la sortie du bassin de rétention sans contrôle pour le scénario du bassin 10 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement	72
Figure 23 : Concentrations en MES à la sortie du bassin de rétention avec contrôle pour le scénario du bassin 10 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement	72
Figure 24 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention pour le scénario du bassin sans contrôle 2 ans – 50 % de ruissellement.....	73
Figure 25 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention pour le scénario du bassin avec contrôle 2 ans – 50 % de ruissellement.....	74
Figure 26 : Concentrations en MES à la sortie du bassin de rétention sans contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement	75
Figure 27 : Concentrations en MES à la sortie du bassin de rétention avec contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement	75
Figure 28 : Quantité en MES sortant du bassin de rétention par l'orifice pour le scénario de référence.....	76
Figure 29 : Quantité en MES sortant du bassin de rétention par l'orifice pour le scénario du bassin avec contrôle 2 ans – 22,1 % de ruissellement	77
Figure 30 : Quantité en MES sortant du bassin de rétention par l'orifice pour le scénario du bassin avec contrôle 10 ans – 50 % de ruissellement	77
Figure 31 : Quantité en MES sortant du bassin de rétention par l'orifice pour le scénario du bassin avec contrôle 2 ans – 50 % de ruissellement	78
Figure 32 : Débit entrant dans le bassin de rétention durant l'été 2004	80
Figure 33 : Concentrations en MES à l'entrée du bassin de rétention durant l'été 2004	80
Figure 34 : Hauteur d'eau dans le bassin sans contrôle durant l'été 2004	81
Figure 35 : Hauteur d'eau dans le bassin avec contrôle durant l'été 2004	81
Figure 36 : Concentration en MES dans le bassin sans contrôle durant l'été 2004.....	82
Figure 37 : Concentration en MES dans le bassin sans contrôle durant l'été 2004.....	82
Figure 38 : Débit entrant dans le bassin de rétention durant l'été 2005	83
Figure 39 : Concentration en MES à l'entrée du bassin de rétention durant l'été 2005	83
Figure 40 : Hauteur d'eau dans le bassin sans contrôle durant l'été 2005	84
Figure 41 : Hauteur d'eau dans le bassin avec contrôle durant l'été 2005	84
Figure 42 : Concentration en MES à la sortie du bassin sans contrôle durant l'été 2005 ...	84
Figure 43 : Concentration en MES à la sortie du bassin avec contrôle durant l'été 2005 ...	85

Figure 44 : Débit entrant dans le bassin de rétention durant l'été 2006	86
Figure 45 : Concentration en MES à l'entrée du bassin de rétention durant l'été 2006.....	86
Figure 46 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention sans contrôle durant l'été 2006	87
Figure 47 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention avec contrôle durant l'été 2006	87
Figure 48 : Concentration en MES à la sortie du bassin sans contrôle durant l'été 2006 ...	87
Figure 49 : Concentration en MES à la sortie du bassin avec contrôle durant l'été 2006...	88
Figure 50 : Récapitulatif des quantités en MES sortant du bassin de rétention par l'orifice durant l'été 2004	89
Figure 51 : Récapitulatif des quantités en MES sortant du bassin de rétention par l'orifice durant l'été 2005	89
Figure 52 : Récapitulatif des quantités en MES sortant du bassin de rétention par l'orifice durant l'été 2006	90

Annexes

Figure A1 : Pluie SEA 10 ans – 1 heure	103
Figure A2 : Pluie SEA 2 ans – 1 heure	104
Figure A3 : Série pluviométrique de l'été 2004 du pluviomètre 901 de la Ville de Québec	105
Figure A5 : Série pluviométrique de l'été 2006 du pluviomètre 901 de la Ville de Québec	107

1. Introduction

Préserver les écosystèmes des rivières urbaines, tout en redonnant l'accès aux berges, est au cœur des priorités de plusieurs municipalités canadiennes pour améliorer la qualité de vie de leurs citoyens. Habitat de la faune et de la flore locales, les rivières urbaines et leurs berges offrent de grandes opportunités récréatives pour les citoyens. Il est facile d'oublier qu'elles constituent une partie importante du système de drainage urbain en évacuant les eaux de ruissellement d'une part, et en étant, d'autre part, des sites d'implantation de bassins de rétention et autres pratiques bénéfiques (*Best Management Practices* ou *BMP*).

Les eaux atteignent les rivières urbaines directement par le ruissellement de surface et indirectement par le réseau d'égout. Alors que la végétation joue un rôle important pour la diminution des vitesses de l'eau, le réseau d'égout est un grand accélérateur, déchargeant les eaux de ruissellement plus rapidement, à des débits supérieurs et sur des périodes de temps plus courtes comparées aux eaux de ruissellement en milieu naturel. Les égouts ont donc un impact direct sur le régime hydraulique des rivières aux points de rejet où les vitesses relativement élevées pendant les événements de pluie tendent à perturber les écosystèmes des rivières à proximité et en aval des émissaires.

De plus, les eaux de ruissellement entraînent, lors de leur écoulement en surface dans le paysage urbain, des contaminants qui peuvent causer des impacts négatifs sur les écosystèmes locaux; les plus communs sont les matières en suspension, les nutriments, le carbone organique, les hydrocarbures et les métaux lourds. Les matières en suspension qui atteignent les eaux réceptrices peuvent limiter la pénétration de la lumière, affecter la reproduction des espèces aquatiques et transporter des polluants adsorbés. Les nutriments, principalement le phosphore et l'azote, favorisent la prolifération des algues; à grande concentration, les algues perturbent l'équilibre de l'écosystème et leur décomposition épuise les réserves en oxygène, de même pour le carbone organique à partir de la matière décomposée. Les pathogènes d'origine humaine et animale sont aussi transportés par ces eaux, alors que les hydrocarbures et les métaux lourds sont souvent toxiques pour la vie

aquatique. Les eaux pluviales peuvent donc être polluées et ainsi affecter à court et à long termes les rivières et leurs écosystèmes dans lesquelles elles se déversent.

1.1 Caractérisation des eaux pluviales

Pendant longtemps, on a cru que les eaux de ruissellement urbain n'étaient pas si contaminées et que leur forte décharge ne causait pas d'impacts irréversibles sur l'environnement. Suite à des événements d'inondation, d'érosion, de sédimentation, de perte d'habitats et d'êtres vivants et de contamination des eaux et de la chaîne alimentaire, l'EPA (*U.S. Environment Protection Agency*) a démontré, en 1983, à l'aide d'un programme de mesures appelé *NURP (Nationwide Urban Runoff Program)*, que le ruissellement urbain était une source importante de pollution des cours d'eau, éveillant ainsi au problème de la pollution urbaine (Rivard, 1998; Environmental Protection Agency, 1983). Ce programme, effectué entre 1978 et 1983 sur 81 sites différents (39 résidentiels, 14 commerciaux, 20 commerciaux et résidentiels et 8 espaces verts en milieu urbain) a permis de caractériser les concentrations de polluants d'origine urbaine (Rivard, 1998; CNRC et FCM, 2003 et 2004). Malgré cette étude, la gestion de la qualité des eaux n'est pas soumise à des critères établis. Elle s'intègre tout de même peu à peu dans la gestion des eaux pluviales; l'étude de la quantité des eaux de ruissellement n'est plus le seul aspect important, la qualité doit aussi être prise en compte afin de réduire les impacts de la pollution de ces eaux sur les cours d'eau urbains (Rivard, 1998; ASCE et WEF, 1998; MDE, 2000; OMOE, 2003; CNRC et FCM, 2003 et 2004).

La caractérisation de la qualité des eaux pluviales dépend fortement de la durée des périodes de temps sec antérieures durant lesquelles les polluants s'accumulent sur les surfaces avant d'être entraînés par le ruissellement urbain dans les réseaux d'égouts pluviaux lors de la prochaine pluie. La quantité de contaminants présents dans les eaux de ruissellement a un impact majeur sur la qualité des eaux du milieu récepteur et engendre des problèmes au niveau de la gestion des eaux sur le bassin versant, soit pour l'approvisionnement en eau potable, pour la conservation des habitats aquatiques, des aspects esthétiques et des activités récréatives. Il n'est pas évident de juger de la qualité

d'une eau puisqu'elle a tendance à être jugée selon l'usage qu'on lui confère. Par exemple, les paramètres de qualité des eaux seront différents si on autorise la baignade, si on veut la consommer, s'il y a présence d'une prise d'eau ou s'il existe un écosystème fragile à protéger.

1.2 Polluants d'origine urbaine

Naturellement, l'eau de pluie contient plusieurs éléments dissous provenant de l'atmosphère, de la faune et de la flore, du sol et des eaux de ruissellement comme les bicarbonates, les sulfates, le sodium, le calcium, le magnésium, le potassium, l'azote et le phosphore (MDDEP, 2002). Le ruissellement peut aussi entraîner des éléments apportés par la présence humaine sur le bassin versant comme les nutriments, les matières organiques, les microorganismes pathogènes, les métaux lourds, les sédiments, les hydrocarbures et les sels. Ce sont principalement les éléments apportés par l'activité humaine qui engendrent la pollution des eaux de ruissellement urbain. De plus, il est fréquent de trouver des raccordements illicites sur le réseau d'égout pluvial, captant ainsi des eaux usées domestiques.

Les facteurs influençant la qualité de l'eau et les impacts sur les écosystèmes peuvent être d'ordre physique, chimique et biologique (Marsalek et al., 2003; Chambers et al., 1997). Parmi les facteurs physiques, on retrouve le débit et ses grandes vitesses de décharge. Les facteurs chimiques sont liés aux matières organiques biodégradables, aux nutriments, aux métaux et produits toxiques, aux hydrocarbures et aux sels et minéraux. Les facteurs biologiques incluent les éléments pathogènes, c'est-à-dire les bactéries et virus d'origines humaine et animale.

1.2.1 Décharge des eaux à grandes vitesses

Dans le milieu urbain, la surface des bassins versants et les sols sont différents des bassins naturels. L'homme, en y construisant des quartiers et des routes, a imperméabilisé la surface et diminué la capacité des eaux de s'infiltrer dans le sol. L'imperméabilisation d'un

bassin fait augmenter les volumes d'eau ruisselés et les pointes de débit, et diminuer le temps de réponse du bassin versant ainsi que la durée du ruissellement. On sait que le déchargement des eaux de ruissellement captées en conduite du réseau d'égouts se fait à de très grandes vitesses dans le milieu récepteur. Ces vitesses peuvent engendrer une destruction du milieu récepteur, ce qui peut entraîner une perte d'habitat pour les écosystèmes aquatiques et riverains par érosion. Ce sont les berges qui sont les plus touchées en général. De plus, les forts débits de décharge des eaux de ruissellement viennent augmenter le débit du cours d'eau récepteur. Les débits en rivière changent alors très brusquement dans le temps, causant du tort à la faune et à la flore aquatiques qui tolèrent souvent mal les grandes vitesses et les changements brusques de débit. De plus, les fortes vitesses engendrent du transport de sédiments du fond, augmentant ainsi la turbidité de l'eau et pouvant détruire par érosion ou par sédimentation des habitats aquatiques en aval du rejet.

1.2.2 Sédiments

Les sédiments accumulés sur les surfaces du bassin versant, une fois captés par les eaux de ruissellement, deviennent des matières en suspension (MES). Ils peuvent provenir des sites de construction ou bien des chaussées par exemple. Ces matières ont des effets néfastes sur le cours d'eau récepteur. En se sédimentant, les matières en suspension créent des dépôts pouvant détruire des habitats et réduisent la capacité des ouvrages hydrauliques. De plus, les MES diminuent la quantité de lumière pénétrant dans l'eau. Les organismes utilisant la photosynthèse pour vivre sont donc directement affectés. L'augmentation de la turbidité affecte aussi la capacité de certains organismes à capter l'oxygène dissous. Les matières en suspension sont aussi un très bon véhicule permettant aux produits chimiques et ions, comme les métaux et les nutriments, de s'adsorber à elles, et de se sédimenter au fond. Il ne faut pas non plus négliger un aspect économique, soit que les eaux fortement turbides sont beaucoup plus chères à traiter.

1.2.3 Nutriments

Les nutriments, soit l'azote, le phosphore, le potassium et leurs composés, sont la nourriture par excellence pour les algues. Ils proviennent des fertilisants utilisés pour enrichir les pelouses et jardins, de certains produits de nettoyage comme ceux que l'on utilise pour laver les voitures, de végétaux abandonnés tel le gazon coupé, les feuilles mortes et autres et des déjections animales. Les eaux chargées en nutriments peuvent engendrer une prolifération rapide des algues pouvant conduire à l'eutrophisation du milieu récepteur. La prolifération des algues fait chuter le taux d'oxygène dissous dans l'eau. Selon Schueler (1987) et l'*Environmental Protection Agency* (1993), les concentrations en nutriments généralement contenues dans les eaux de ruissellement sont suffisantes pour causer cette prolifération. L'eutrophisation est d'autant plus importante lorsque les eaux ont un mouvement lent, comme dans les lacs et les bassins d'orage où le temps de rétention est supérieur à 2 semaines, causant ainsi une présence massive d'algues à la surface, la décoloration de l'eau, la présence d'odeurs et la diminution en oxygène dissous (Environmental Protection Agency, 1993; Rivard, 1998).

1.2.4 Matières organiques biodégradables

Parmi les matières organiques biodégradables, formées de carbone organique, apportées par les eaux de ruissellement, on compte les feuilles mortes, le gazon fraîchement coupé, les résidus de jardinage entre autres et les déjections animales. Leur décomposition affecte directement la concentration en oxygène dissous, qui est importante pour les êtres vivants aquatiques. Les problèmes surviennent dans le milieu récepteur lorsqu'il y a un surplus en matières organiques décomposables, soit par apport dans les eaux de ruissellement, soit lorsque les algues meurent suite à une forte prolifération, causant ainsi une boucle à effet grandissant. Les bactéries qui décomposent la matière organique consomment de l'oxygène causant ainsi une diminution de la quantité disponible pour la faune aquatique. Donc, les organismes qui meurent créent davantage de matières organiques à décomposer, causant ainsi une baisse du taux d'oxygène dissous, engendrant la mort d'autres organismes et

encore plus de matières disponibles pour la décomposition. Parfois, la quantité d'oxygène est si basse que les gros poissons et les plantes peuvent en venir à suffoquer.

1.2.5 Éléments pathogènes

Les éléments pathogènes sont des bactéries et des virus provenant de débordements de réseaux unitaires, de fosses septiques mal étanchéifiées ou de déjections animales par exemple, et qui peuvent affecter la santé des humains, tels les coliformes et le *E.coli*. Selon Schueler (1987), la concentration de ces éléments est presque toujours plus grande dans les eaux de ruissellement urbain que celles des standards de qualité de pratique des activités récréatives impliquant le contact avec l'eau. Ces problèmes sont d'autant plus importants lorsque nous sommes en présence d'égouts unitaires, puisqu'une partie des eaux déversées est d'origine domestique. Appelés aussi coliformes fécaux, ces éléments sont souvent responsables de l'interdiction de baignade.

1.2.6 Polluants toxiques

Certains métaux lourds et produits chimiques sont très toxiques pour la vie aquatique. Ils proviennent de produits d'activités humaines comme la peinture, les teintures, les diluants, les produits nettoyants, les insecticides, les herbicides, les refroidisseurs d'air, les batteries et les toits des bâtiments (MDDEP, 2002; Rivard, 1998; EPASA, 2003). Le programme *NURP* (Environmental Protection Agency, 1983) a déterminé une grande variété de métaux lourds présents dans les eaux de ruissellement : le plomb, le cuivre et le zinc principalement sont souvent présents en quantité plus importante que le seuil déterminé pour le maintien de la vie aquatique.

1.2.7 Hydrocarbures

Les véhicules rejettent des hydrocarbures qui sont des produits composés d'huiles et de graisses. Ces composés à base de pétrole contiennent des hydrocarbures qui peuvent être

néfastes aux écosystèmes aquatiques (Schueler, 1987; Terrene Institute, 1994 ; CNRC et FCM, 2003). Lors d'une pluie, les eaux de ruissellement captent les hydrocarbures laissés sur le sol principalement par les véhicules, sur le sol des stations-services, garages ou autres et les acheminent jusqu'au cours d'eau. Ils modifient alors l'apparence de la surface de l'eau en y formant un film. Ce film peut empêcher certaines plantes ou animaux aquatiques de respirer convenablement (SA, 2003). Ces polluants peuvent aussi être adsorbés aux MES, pour ensuite être sédimentés, contaminant ainsi le fond du cours d'eau. Les organismes y vivant sont alors les premiers à être affectés contaminant par la suite la chaîne alimentaire (Rivard, 1998).

1.2.8 Sels

Les sels dans les eaux de ruissellement proviennent du déglacage des chaussées en période hivernale. Ils sont néfastes pour les écosystèmes aquatiques lorsqu'ils sont présents en quantité élevée puisqu'ils viennent affecter l'équilibre chimique en solution. De plus, les systèmes de refroidissement ou d'air conditionné rejettent des solides dissous responsables de la mort de certaines plantes ou animaux aquatiques en augmentant le degré de salinité du milieu récepteur (EPASA, 2003).

1.2.9 Autres paramètres

Outres les paramètres énumérés plus haut, ils existent d'autres paramètres affectant la qualité des eaux. La température a un impact sur la quantité d'oxygène dissous dans l'eau, le pH est important pour le maintien de la vie aquatique, l'alcalinité permet de protéger le milieu aquatique contre les attaques acides, la dureté est la quantité de carbonate de calcium présente en solution et détermine le degré de minéralisation de l'eau et la conductivité est un indicateur de l'activité ionique. Ces paramètres sont des indicateurs de la qualité des eaux. Par exemple, les ions métalliques sont plus solubles à pH acide et ils affectent alors davantage les organismes. Ils peuvent aussi grandement affecter le comportement des polluants présent dans l'eau et ils sont utilisés afin de pouvoir effectuer une analyse simple et rapide au moyen d'essais sur le terrain ou en laboratoire. Donc, selon la caractérisation

d'une eau en fonction de ces paramètres, le comportement des divers polluants urbains et les réactions chimiques possibles en solution peuvent être influencés selon le pH, la température, la dureté, l'alcalinité et la conductivité.

1.3 Concentrations typiques des polluants d'origine urbaine dans les eaux de ruissellement

Toutes les sources de pollution d'origine urbaine des eaux de ruissellement énumérées plus haut ne sont pas toujours présentes dans les mêmes proportions d'un bassin versant urbain à l'autre. En fait, tout dépend de l'occupation du territoire. L'*American Society of Civil Engineers* (ASCE), en collaboration avec la *Water Environment Federation* (WEF), a distingué quatre grands types d'occupation du territoire influençant la composition de la pollution des eaux de ruissellement urbaines : (1) les secteurs résidentiels et commerciaux, (2) les secteurs industriels, (3) les routes et autoroutes ainsi que (4) les sites de construction (ASCE et WEF, 1992). Dans ce projet, le type d'occupation du territoire qui nous intéresse est celui des secteurs résidentiels et commerciaux. À titre indicatif, le Tableau 1 présente les concentrations typiques de ces eaux.

Tableau 1 : Concentration moyenne des eaux de ruissellement en polluants urbains pour les secteurs résidentiels et commerciaux (adapté de ASCE et WEF, 1992; Rivard, 1998)

Paramètres	Concentration moyenne
MES totaux	239 mg/l
DBO	12 mg/l
DCO	94 mg/l
P total	0.5 mg/l
P soluble	0.15 mg/l
NTK	2.3 mg/l
NO ₂ + 3 – N	1,4 mg/l
Cu total	53 µg/l
Pb total	238 µg/l
Zn total	353 µg/l

Le Tableau 2, tiré d'une étude de l'EPA (1993), présente les concentrations typiques des divers polluants urbains en fonction du type d'eau qui les véhicule. On y remarque tout d'abord que la pluie est peu chargée en polluants. Par la suite, les eaux s'écoulant sur le sol entraînent les divers polluants qui s'y trouvent, leur concentration augmente donc. Quant à elles, les eaux des égouts unitaires sont beaucoup plus chargées puisque les eaux de ruissellement sont alors mélangées aux eaux domestiques. Enfin, à la station de traitement, les eaux traitées présentent des concentrations moins importantes que celles des eaux des égouts unitaires et sanitaires puisqu'elles sont soumises à un traitement de leurs polluants. On remarque aussi que la concentration de phosphore et d'azote des eaux des effluents traités est plus grande que celles des autres types d'eau. Ceci est dû au fait que les eaux à l'usine de traitement proviennent des égouts unitaires et sanitaires et que ces dernières sont largement plus chargées que toutes les autres types d'eaux.

Tableau 2 : Concentrations typiques des divers polluants urbains en fonction du type d'eau qui les véhicule (adapté de Environmental Protection Agency, 1993; Rivard, 1998)

Paramètres	Pluie	Eaux de ruissellement	Égout unitaire	Effluent traité (primaire)	Effluent traité (secondaire)
MES (mg/l)	----	141-224	270-550	40-120	10-30
DBO ₅ (mg/l)	1-13	10-13	60-220	70-200	15-45
DCO (mg/l)	9-16	73-92	260-480	165-600	25-80
Coliformes (MPN/100ml)	----	1000-21000	200000-1100000	----	----
P total (mg/l)	0.02-0.15	0.37-0.47	1.2-2.8	7.5*	6*
N total (mg/l)	----	3-24	4-17	35*	30*
NTK (mg/l)	----	1.68-2.12	----	----	----
Nitrate (mg/l)	0.05-1.0	0-4.2	----	----	----
Pb total (µg/l)	30-70	161-204	140-600	----	----

*Valeur moyenne

1.4 Impact de la pollution des eaux de ruissellement urbain sur le milieu récepteur

Les eaux de ruissellement polluées rejetées au cours d'eau peuvent produire une panoplie d'effets négatifs sur le milieu récepteur. Que ces effets soient physiques, chimiques ou biologiques, ils conduisent tous à une altération de la qualité de l'eau, limitant les usages qu'on lui confère. On note parmi les impacts de ces eaux, la nuisance aux écosystèmes riverains et aquatiques, le déséquilibre chimique de l'eau tel l'augmentation de la salinité ou la diminution du pH et du taux d'oxygène dissous, la mort d'organismes engendrant la baisse du nombre de poissons, la destruction d'habitats, la contamination de la chaîne alimentaire, l'eutrophisation du cours d'eau, etc. Il ne faut pas oublier non plus que les coûts de traitement pour rendre l'eau potable engendrés par la mauvaise qualité de l'eau peuvent être très élevés.

Les impacts de la pollution sur un cours d'eau récepteur ne sont pas faciles à prédire. Tout d'abord, on doit tenir compte de la nature du milieu récepteur. Certains milieux sont plus sensibles que d'autres à la pollution, comme les petits cours d'eau ou les lacs par exemple. De plus, l'éventail des contaminants, leur concentration et leur charge en polluants doivent être pris en compte puisque chaque polluant et sa concentration respective agit différemment sur les écosystèmes. Les impacts sur le milieu peuvent apparaître à court ou à long terme, au point de rejet ou beaucoup plus en aval, rendant ainsi le rejet coupable difficile à établir.

1.5 Méthodes de gestion des eaux pluviales permettant d'améliorer sa qualité

Même s'il existe peu de critères établis dans la gestion de la qualité des eaux pluviales, certaines règles se sont imposées avec le temps afin de réduire la charge en polluants urbains (ASCE et WEF, 1992; Heaney et al., 1999; CNRC et FCM, 2003; CNRC et FCM

2004). Afin de pallier au problème de la mauvaise qualité des eaux de ruissellement, des pratiques de gestion optimale (PGO), appelées *Best Management Practices (BMP)* au Canada anglais et aux États-Unis, ont été proposées (CNRC et FCM, 2003). Une de ces pratiques, qui est très efficace et qui est fréquemment utilisée en Amérique du Nord, est le bassin de rétention. En milieu urbain, l'augmentation de l'imperméabilité du sol augmente les volumes et les débits de pointe des eaux ruisselées. Les vitesses de rejet des eaux de ruissellement urbain sont alors beaucoup plus importantes qu'en milieu naturel engendrant ainsi une destruction du milieu récepteur par érosion. L'implantation d'un bassin de rétention en bout de réseau permet alors de réduire les débits de pointe acheminés au cours d'eau en emmagasinant une partie du volume d'eau ruisselé. De plus, un temps de séjour des eaux dans le bassin de rétention permet aussi à une partie des polluants de s'agglomérer et de décanter au lieu d'être rejetés dans le milieu récepteur. Divers guides de conception en drainage urbain suggèrent comme critère de conception que 80% des matières en suspension doivent sédimenter lors de leur séjour dans le bassin (OMOE, 2003).

1.6 Dépollution des eaux par la sédimentation

Les processus physiques et chimiques régissant la dépollution des eaux de ruissellement sont la sédimentation, la filtration, l'infiltration et divers processus biologiques (Rivard, 1998; Wright et McLaughlin, 2001). Le bassin de rétention élimine les contaminants par sédimentation et par processus biologiques. Les matières en suspension dont la taille est inférieure à 60 microns peuvent adsorber près de 80% des métaux et autres polluants (Rivard, 1998; Wright et McLaughlin, 2001). Le fait est simple : plus la surface spécifique de la particule est grande, plus elle peut adsorber de polluants. Sachant que les petites particules ont une surface spécifique plus grande que celles à grand diamètre, ces dernières transportent une moins grande quantité de polluants. Ce sont donc les particules de petit diamètre auxquelles on devra porter une attention particulière. Le problème est que, plus elles sont de petites tailles, plus elles ont une vitesse de sédimentation faible et demandent un long temps pour se sédimenter.

Depuis plusieurs années, des études décrivant les processus de dépollution des eaux dans un bassin de rétention ont été faites. Le modèle le plus souvent utilisé pour décrire ce processus est celui du modèle «k-c», un modèle dynamique de premier ordre de dégradation des polluants prenant en compte le taux d'élimination «k» et la concentration «c» (Wong et al., 2006; Li et al., 2007). Un autre, très bien connu est celui que Hazen a développé en 1904 (Li et al., 2007). C'est un modèle d'élimination selon la théorie de la sédimentation. Durant les dernière années, Chen et Adams ont dérivé un modèle de distribution des probabilités afin de modéliser la qualité des eaux sur le sol du bassin versant jusqu'à la sortie d'un bassin de rétention (Behera et al., 2006; Chen et Adams, 2006-a; Chen et Adams, 2006-b; Chen et Adams, 2007). Papa et Adams (1996) (Shammaa et al., 2002) ont quant à eux développé des modèles statistiques afin d'étudier l'enlèvement des sédiments en fonction du temps de rétention, de la profondeur du bassin ainsi que de la vitesse de sédimentation des particules. Plusieurs autres études ont aussi tenté de développer des méthodes afin d'identifier un temps de rétention moyen requis afin de sédimenter un certain pourcentage de particules (Shammaa et al., 2002). Ces dernières ont établi qu'un temps de rétention de plus de 24 heures permet une sédimentation d'au moins 60% de MES. Torres (2008) a fait une étude la décantation dans les bassins de retenue-décantation. Ce travail a proposé des contributions pour le suivi expérimental et la modélisation hydrodynamique dans un bassin de rétention des eaux pluviales. Durant les dernières années, la décantation des eaux dans ce type d'ouvrages a déjà fait l'objet d'études par des expérimentations *in situ*, par des expérimentations en laboratoire et des modélisations hydrodynamiques en conditions contrôlées pour des géométries simples. Dans cette étude, le protocole VICAS pour la décantation en laboratoire a été utilisé pour déterminer les vitesses de chute de sédiments décantés au fond, la caractérisation physico-chimique des sédiments décantés et l'exploitation des données en continu pour estimer les flux de sédiments à l'entrée et à la sortie de l'ouvrage. Le logiciel CFD Rubar 20 a été utilisé pour modéliser le comportement hydrodynamique 2D du bassin.

La sédimentation se produit sous deux conditions : les conditions dynamiques et les conditions de quiescence. Ces deux types de sédimentation sont dépendants de la vitesse de sédimentation des particules contenues dans les eaux pluviales et de l'aire du bassin. Les

conditions dynamiques se produisent en temps de pluie, soit lorsqu'il y a du débit entrant dans le bassin de rétention. La sédimentation est alors gênée par le mouvement horizontal des eaux, augmentant ainsi le temps qu'elles prennent pour sédimenter. Donc, plus le débit est important, moins la sédimentation sera efficace. Quant à elles, les conditions de quiescence se produisent en temps sec, lorsqu'il n'y a pas de débit dans le bassin. La sédimentation est donc plus efficace sous ces conditions. Le Tableau 3 présente les caractéristiques des sédiments contenus dans les eaux de ruissellement urbaines, en fonction de six classes de diamètres de particules avec leur fraction typique ainsi que leur vitesse de sédimentation critique respective. Il présente aussi le temps nécessaire aux diverses particules pour sédimenter d'une hauteur de 1 mètre en condition de quiescence. Cette dernière colonne représente un calcul effectué et ajouté au tableau adapté d'OMOE (2003).

Tableau 3 : Diamètres, fraction typique de la masse totale et vitesse de sédimentation des sédiments contenus dans les eaux de ruissellement (adapté de OMOE, 2003)

Diamètre (µm)	% masse totale	Vs (m/s)	Temps pour descendre de 1m
<20	20	2.54E-06	4j 13h 21min 41s
20-40	10	1.30E-05	21h 22min 3s
40-60	10	2.54E-05	10h 56min 10s
60-130	20	1.27E-04	2h 11min 14s
130-400	20	5.93E-04	28min 6s
400-4000	20	5.50E-03	3min 2s
Total	100		

Comme on peut le remarquer au Tableau 3, les particules de gros diamètre sédimenteront rapidement dans les minutes, alors que les petites, prennent des jours. En absence de mouvement horizontal des eaux, en moins de 24 heures, toutes les particules de diamètre supérieur à 20 µm auront eu le temps de sédimenter. Les bassins traditionnels ont par contre un temps de rétention d'environ 24h à 48h et ils sont soumis à un mouvement horizontal des eaux, rendant difficile la sédimentation complète des particules contenues dans les eaux de ruissellement. Ce temps est trop court pour permettre la sédimentation des particules fines et ce sont les particules de faibles diamètres qui mettent plus de temps à sédimenter. Ce sont sur ces particules que s'adsorbent la majorité des polluants, leur rejet

au milieu récepteur cause alors des torts aux écosystèmes riverains et aquatiques. Ainsi, afin d'être le plus efficace possible, un bassin doit offrir un plus long temps de rétention afin de permettre la sédimentation des particules fines qui transportent la majeure partie des polluants, tout en ayant un volume minimal afin de réduire les coûts de construction. Les sections suivantes présenteront les objectifs de ce projet, la méthodologie appliquée, la théorie scientifique, le bassin versant étudié et les divers scénarios évalués. Par la suite, les résultats et la discussion de cette étude seront présentés sous forme d'article scientifique.

2. Objectifs du projet

Ce projet présentera donc une solution afin d'augmenter le temps de rétention des eaux pluviales dans un bassin de rétention et ainsi augmenter la quantité de polluants d'origine urbaine sédimentés et diminuer la quantité rejetée au milieu récepteur. Un concept de contrôle en temps réel de gestion de la qualité des eaux pluviales sera élaboré. Il s'agit, en fait, de faire la gestion de la qualité des eaux de ruissellement, dans un bassin versant typiquement urbain, au moyen d'un bassin de rétention, muni d'une vanne à son exutoire, contrôlée en temps réel, en fonction des prévisions météorologiques. Dans notre cas, ces prévisions sont connues et elles sont parfaites puisque des séries historiques seront utilisées. Afin d'y arriver, diverses étapes sont à prévoir, soit la modélisation de l'hydrologie et de l'hydraulique, la modélisation de la qualité des eaux, (i.e. l'accumulation, le lessivage, le transport et la sédimentation des polluants), ainsi que le contrôle de la vanne à l'exutoire du bassin de rétention. Ces étapes ont été faites à l'aide du logiciel de gestion des eaux pluviales développé par l'EPA, SWMM 5.0. La modélisation des polluants à l'entrée et à la sortie du bassin de rétention permettra d'évaluer l'efficacité de la gestion des eaux pluviales par le contrôle en temps réel en fonction de prévisions météorologiques sur la quantité de polluants rejetés dans le milieu de récepteur.

3. Méthodologie

La section suivante présente la théorie et la méthodologie utilisées afin de démontrer l'efficacité du contrôle en temps réel intégré à la gestion des eaux pluviales dans un bassin de rétention. Cette section présentera le bassin étudié, la théorie derrière la modélisation de la qualité, les divers scénarios étudiés ainsi que les séries pluviométriques utilisées pour les simulations.

3.1 Bassin versant fictif à l'étude

Le bassin versant fictif à l'étude dans ce projet est un bassin de 75,7 hectares composé de trois bassins versants typiquement urbains, qui ont chacun un émissaire se jetant directement à la rivière (voir schéma à la Figure 1). Le bassin versant est occupé par un secteur résidentiel unifamilial de faible densité. La modélisation du ruissellement a été faite à l'aide du module *RUNOFF* de SWMM et la méthode de Horton a été utilisée pour modéliser l'infiltration (Huber et Dickinson, 1988). Le transport des eaux a ensuite été modélisé à l'aide du module *EXTRAN* de SWMM. Le bassin versant est composé de 17 sous-bassins urbains dont le nœud de modélisation d'entrée au réseau de conduites pluviales est représenté par un point rose. Le type de configuration présenté ici est très fréquent au Québec, c'est-à-dire de petits bassins versants urbains, de densité résidentielle faible et des émissaires très rapprochés en rivière. Les trois émissaires ont été combinés et leurs eaux ont été acheminées vers un seul et unique bassin de rétention (point rouge). En combinant plusieurs émissaires à un seul bassin de rétention, l'espace nécessaire ainsi que les coûts de construction sont ainsi diminués. Les émissaires des deux bassins amont (conduites pointillées) ont été supprimés et des conduites ont été ajoutées permettant aux eaux de ruissellement de ces derniers de se rencontrer au bassin de rétention. Le contrôle du temps de rétention des eaux se fera au moyen d'une vanne placée à l'exutoire du bassin. Le bassin versant présente un coefficient de ruissellement de 22,1%, ce qui représente un taux de développement résidentiel faible assez typique de la banlieue en réseau séparatif. Le

coefficient de ruissellement représente le pourcentage du volume d'eau de l'événement pluviométrique qui a ruisselé sur le sol du bassin versant. Ce coefficient est directement lié à l'imperméabilité du sol, c'est-à-dire que plus le sol est imperméable plus la portion d'eau qui ruissellera sera importante. La Figure 1 présente l'ossature du réseau du bassin versant étudié ainsi que les caractéristiques des sous-bassins, soit l'aire (A), le pourcentage d'imperméabilité de la surface (I), la largeur de drainage (L) qui représente la largeur de territoire perpendiculaire au ruissellement avant que celui-ci atteigne le canal principal et qui sera multiplié par le ruissellement par surface unitaire (Huber et Dickinson, 1988), et la pente moyenne du sol du bassin versant (P).

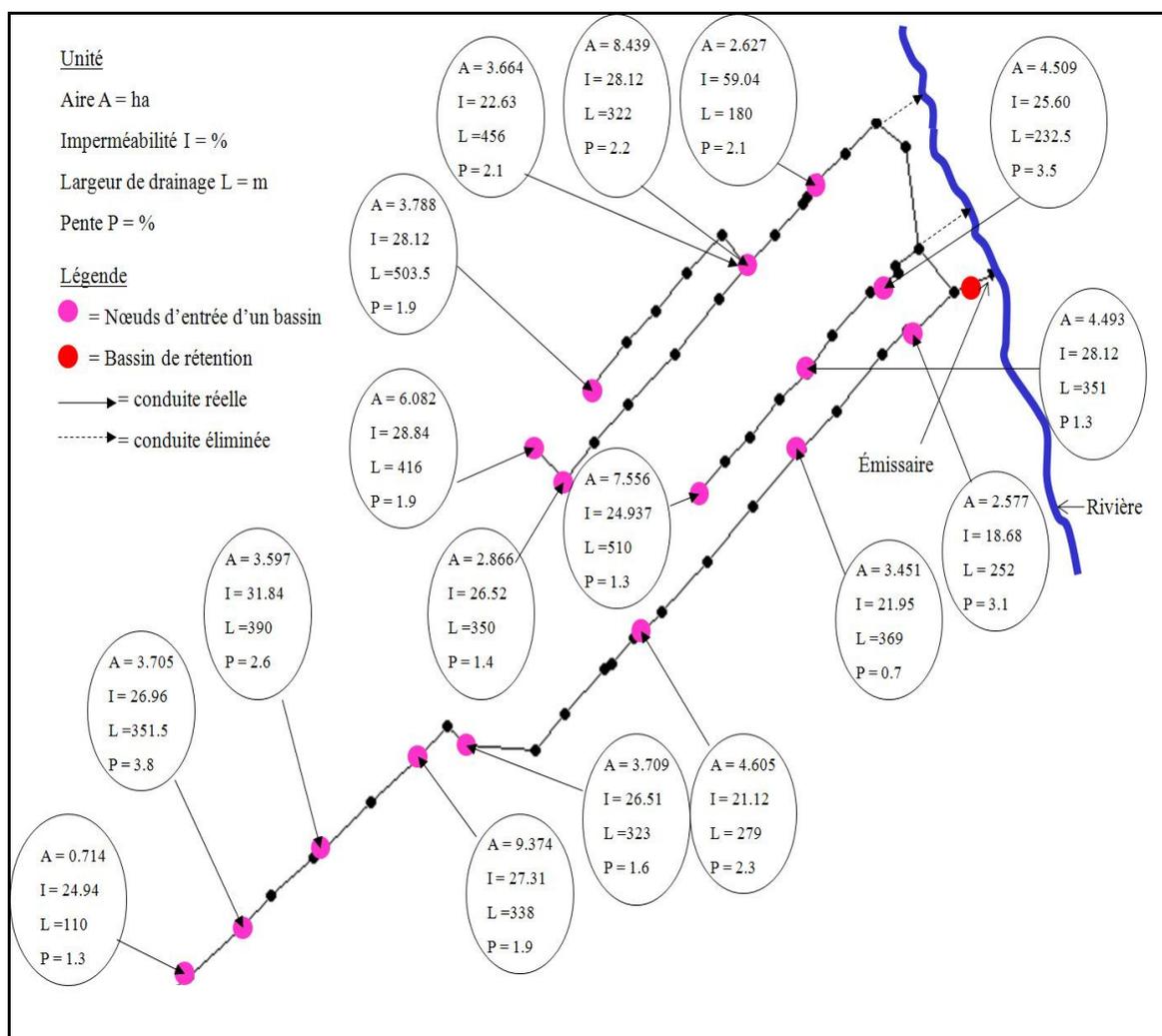


Figure 1 : Schéma de modélisation du site étudié et caractéristiques des sous-bassins

3.2 Modélisation de la qualité des eaux

La modélisation de la qualité des eaux est une étape importante dans ce projet. Elle permet de quantifier les polluants accumulés sur le sol du bassin versant, ceux lessivés, transportés, sédimentés et enfin ceux rejetés dans le milieu récepteur. Comme les divers polluants ont tendance à s'adsorber aux sédiments et que la qualité des eaux est ainsi reliée aux concentrations en MES, seules les MES seront étudiées dans ce projet. La représentation du phénomène de pollution des eaux de ruissellement en modélisation se fait selon divers processus : le premier est appelé le «*buildup*», qui est la phase d'accumulation des polluants sur le sol du bassin versant durant les périodes de temps sec; le deuxième est le «*washoff*», qui représente le lessivage des polluants par les eaux de ruissellement; une fois lessivés, les polluants sont mélangés aux eaux de ruissellement et sont alors transportés dans le réseau jusqu'à ce qu'ils atteignent le milieu récepteur; finalement, la sédimentation des polluants entre en compte dans le bassin de rétention, dépolluant ainsi les eaux.

3.2.1 Accumulation

Trois modèles d'accumulation des polluants peuvent être employés dans le logiciel EPA SWMM : le modèle de puissance linéaire, le modèle exponentiel et le modèle de Michaelis-Menton. Le modèle le plus souvent employé est le modèle exponentiel (Chen et Adams, 2006b).

La figure suivante présente les diverses équations qui permettent de simuler l'accumulation des polluants sur le bassin versant durant les périodes de temps sec dans EPA SWMM.

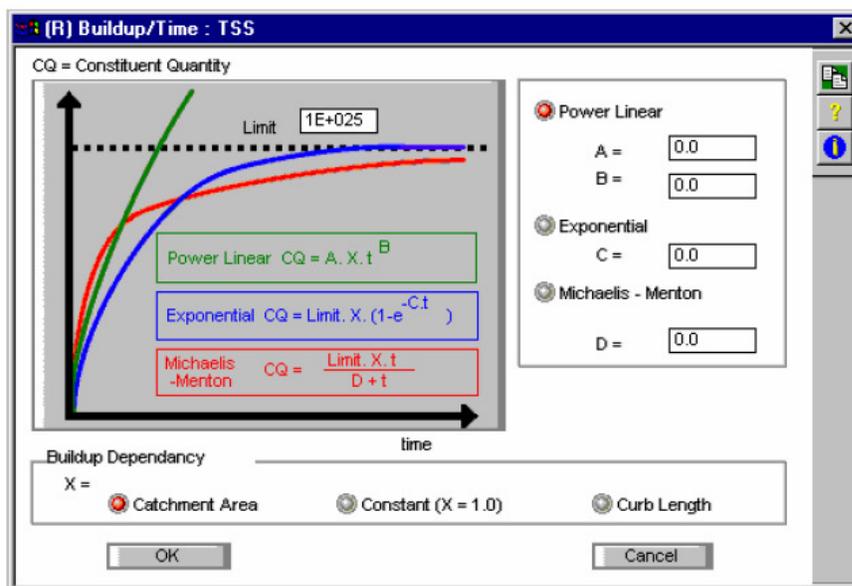


Figure 2 : Les trois équations disponibles pour simuler l'accumulation des polluants (Tiré du logiciel XP-SWMM version 10.6, 2007)

Afin de simuler l'accumulation des sédiments sur le sol du bassin versant, la méthode de la puissance linéaire a été utilisée. Étant donné que ce projet ne comprend pas de mesures de terrains qui pourraient servir à choisir la méthode la plus appropriée, la méthode de la puissance linéaire a été préférée aux deux autres puisque les paramètres exigés dans le calcul de l'accumulation (variable A de la Figure 2) étaient davantage documentés que les paramètres des deux autres méthodes (variables C et D de la Figure 2). De plus, ce projet ne contenait pas de campagne de mesures, qui aurait pu permettre le calage éventuel des paramètres moins documentés des équations exponentielle et de Michaelis-Menton. L'équation de la puissance linéaire fait appel à un taux d'accumulation linéaire de polluants, limitée par une valeur d'accumulation maximale. Il est possible de calculer l'accumulation des polluants en fonction de trois paramètres: d'une constante de valeur 1, de l'aire du bassin ou de la longueur de bordure de trottoir. Dans ce projet, l'accumulation a été calculée en fonction de la longueur de bordure. La longueur de bordure correspond en fait à la longueur de rue de chaque sous-bassin multipliée par deux pour tenir compte que chaque rue a deux côtés avec bordure. Voici l'équation de la puissance linéaire.

$$(1) DD = AXt$$

Où DD = accumulation de sédiments sur le sol du bassin versant (kg)

A = accumulation (kg/(km·bordure)(jour))

X = longueur de bordure (km·bordure)

T = temps sec précédant l'événement pluvieux (jour)

Le Tableau 4 présente les taux d'accumulation pour la pollution totale (DD) en fonction du taux d'accumulation selon le type d'occupation du sol (A), du temps entre deux événements (t) et de la longueur de bordure (X) de chaque sous-bassin. Ces valeurs ont été obtenues d'une étude datant de 1969 effectué par l'American Public Works Association (APWA, 1969).

Tableau 4 : Accumulation des polluants totaux en fonction de l'occupation du sol (APWA, 1969)

	Accumulation des polluants (DD=AXt) (kg)		
	Accumulation A	Longueur de bordure X	Temps sec t
Occupation du sol	kg/(km·bordure)(jour)	km·bordure	jour
Résidentielle unifamiliale	10.42	Selon les caractéristiques de chaque sous-bassin	Selon la durée entre deux événements de pluie
Résidentielle multifamiliale	34.23		
Commerciale	49.11		
Industrielle	68.46		
Naturelle/Parc	22.32		

Par la suite, le taux d'accumulation est multiplié par un facteur qui représente la proportion moyenne de chaque polluant dans l'accumulation totale des polluants sur le sol. Le Tableau 5 présente les valeurs utilisées dans le logiciel SWMM afin de simuler les matières en suspension.

Tableau 5 : Accumulation des matières en suspension en fonction de l'occupation du sol (APWA, 1969; Environmental Protection Agency, 1976)

Occupation du sol	Accumulation basée sur l'équation de la puissance linéaire		
	Accumulation de tous les polluants	MES	MES
	kg/km·bordure/jour	mg/g polluants totaux	kg/km·bordure/jour
Résidentielle unifamiliale	10.42	122	1.271
Résidentielle multifamiliale	34.23	88	3.012
Commerciale	49.11	187	9.184
Industrielle	68.46	74	5.066
Naturelle	22.32	122	2.723

La figure suivante présente les caractéristiques des sous-bassins pour la modélisation de l'accumulation des sédiments sur le sol, soit l'occupation du sol et la longueur de bordure (CL) pour chacun des sous-bassins simulés.

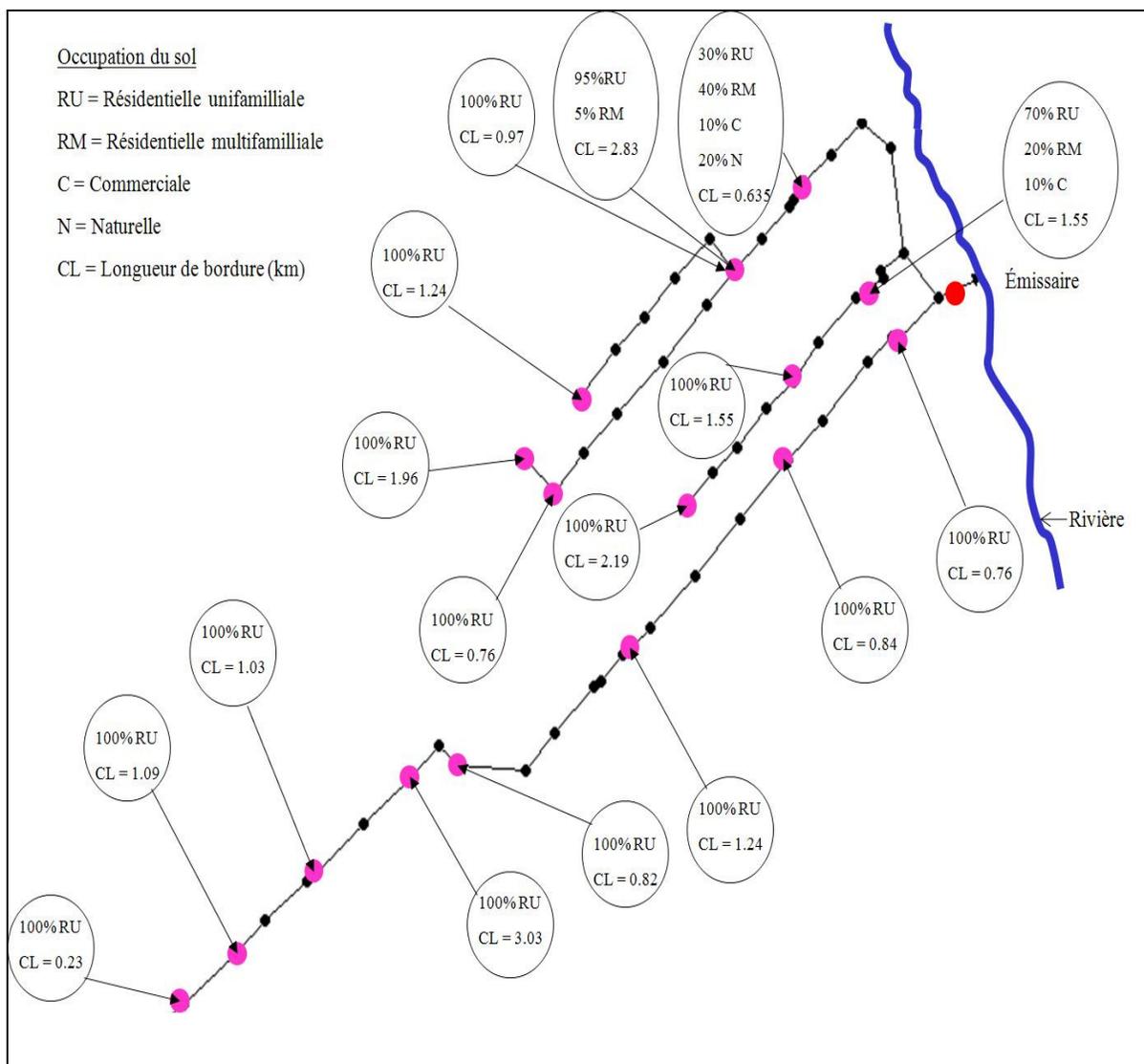


Figure 3 : Occupation du sol et longueur de bordure des divers sous-bassins

3.2.2 Lessivage

Le lessivage des polluants sur le bassin versant peut être simulé selon trois équations. La première est celle de l'EMC (*Event Mean Concentration*), qui fait appel à une concentration moyenne en polluants et à un écart-type. Cette méthode ne requiert aucune méthode d'accumulation. La deuxième équation est une équation exponentielle qui représente un taux de lessivage plus fort au début et qui diminue par la suite jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de polluants disponibles sur le sol, ou que la pluie cesse et que la phase d'accumulation recommence. La Figure 4 présente cette fonction cumulative. La troisième équation pouvant être utilisée dans la simulation du lessivage des polluants est celle du

Rating curve, présentant une courbe de tarage de lessivage instantané en fonction du ruissellement instantané.

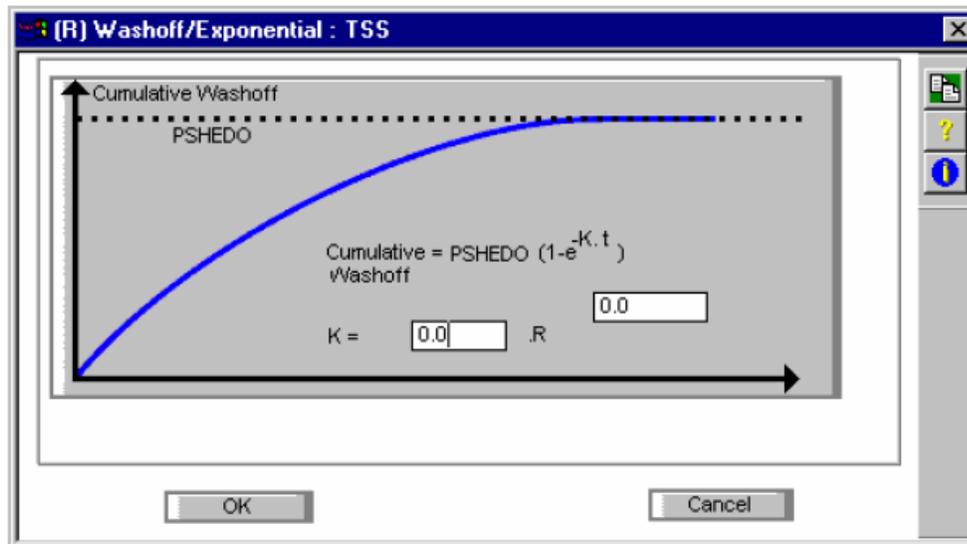


Figure 4 : Méthode exponentielle de lessivage (Tiré du logiciel XP SWMM version 10.6, 2007)

Pour le lessivage, c'est l'équation exponentielle qui a été retenue. Voici l'équation utilisée plus en détail.

$$(2) CW = PSHEDO (1 - e^{-Kt})$$

$$(3) K = COEF (R)^{EXP}$$

Où CW = lessivage cumulé (kg)

PSHEDO = lessivage maximal ou accumulation disponible pour le lessivage (kg)

K = coefficient (1/jour)

T = temps durant l'événement pluvieux (jour)

COEF = coefficient de lessivage (1/mm)

R = coefficient de ruissellement (mm/jour)

EXP = exposant du lessivage (-)

Pour la même raison que pour le choix de la méthode de calcul de l'accumulation, cette méthode a été préférée puisqu'elle était la mieux documentée au niveau des valeurs des paramètres d'entrée. Étant donné qu'aucune campagne de mesures pouvant le calage du modèle n'a été faite dans ce projet, les valeurs des paramètres de lessivage par défaut ont été utilisées. Huber et Dickinson (1988) établissent ces valeurs des valeurs moyennes de 116.84 mm^{-1} pour le coefficient de lessivage et à 2.0 pour l'exposant. Ces valeurs ont été utilisées pour tous les types d'occupation du sol.

La Figure 5 présente un exemple d'accumulation de sédiments sur le sol d'un bassin versant en fonction du lessivage, qui lui, est fonction du débit ruisselé. Le bassin de cet exemple est un bassin composé uniquement de résidences unifamiliales et sa longueur de bordure est de 1,24 km. On y remarque bien l'effet du lessivage lorsqu'il y a du ruissellement sur la quantité totale de sédiments accumulés sur le bassin versant.

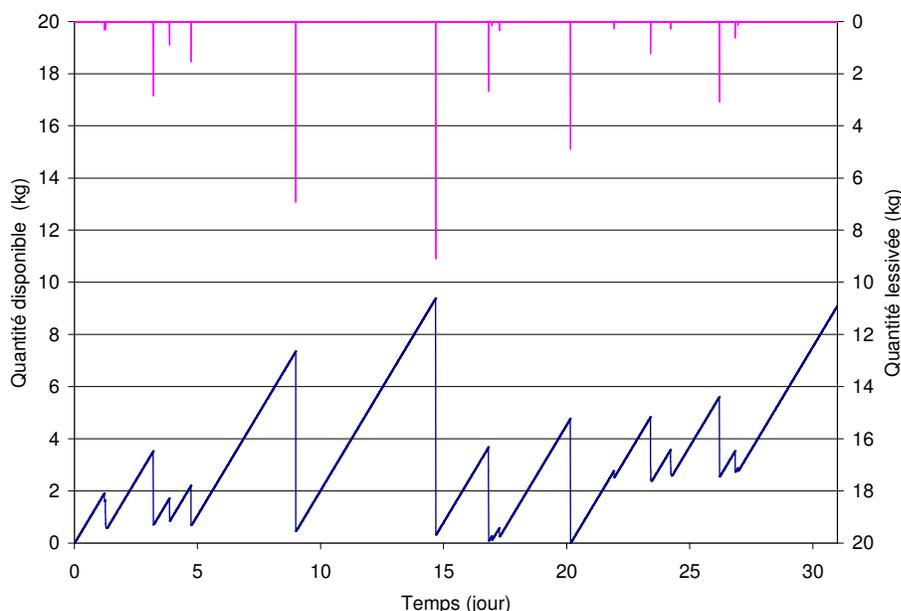


Figure 5 : Quantité de sédiments accumulés sur le sol d'un bassin versant en fonction de la quantité lessivée par le ruissellement

3.2.3 Sédimentation

Une fois que les sédiments accumulés sur le sol ont été lessivés par un événement de pluie, ils sont transportés dans le réseau d'égouts via les eaux de ruissellement. Dans ce projet, avant d'atteindre le milieu récepteur, les eaux sont emmagasinées dans un bassin de rétention afin de permettre la sédimentation des particules.

La sédimentation des polluants dans un bassin de rétention, dans le logiciel SWMM, peut être simulée à l'aide d'une équation qui peut être fonction de plusieurs paramètres tels le temps de rétention, le temps, la concentration ou le débit à l'entrée, une fraction d'enlèvement ou la concentration à l'entrée d'un autre polluant étudié. Seules les particules non-floculantes sont traitées ici. La fonction suivante est utilisée par SWMM afin de modéliser la sédimentation dans un bassin de rétention (Huber et al., 1975; James et al., 2005).

$$(3) R_{ss} = R_{max} (1 - e^{-kt_d})$$

Où R_{ss} = fraction enlevée de MES

R_{max} = fraction maximale de MES pouvant être enlevée

t_d = temps de rétention (s)

k = coefficient de premier ordre d'enlèvement du polluant (1/s)

En condition de quiescence, la sédimentation des particules est uniquement influencée par des forces verticales. Ces forces sont la force gravitationnelle et la force de trainée des particules. Lorsqu'elles sédimentent, les particules accélèrent d'une vitesse nulle jusqu'à une vitesse d'équilibre entre ces deux forces, que l'on appelle vitesse critique (Fair et al., 1968; James et al., 2005). Les particules sédimentent alors à cette vitesse finale jusqu'à ce qu'elles touchent le fond. Cette vitesse est décrite par l'équation suivante :

$$(4) v_s = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{gd}{c_D} (S_p - 1)}$$

Où v_s = vitesse de sédimentation critique (m/s)

d = diamètre de la particule (m)

c_D = coefficient de trainée (-)

S_p = densité spécifique de la particule (-)

Le Tableau 3, dans la section précédente, présente les diverses vitesses de sédimentation finales des particules en fonction de six classes de diamètres ainsi que leur proportion typique dans les eaux de ruissellement urbain. Afin de modéliser la sédimentation dans le logiciel SWMM, une fonction d'enlèvement du polluant doit être entrée. Le document *Methodology for Analysis of Detention Basins for Control of Urban Runoff Quality* (Environmental Protection Agency, 1986) présente des équations pouvant être utilisées. La sédimentation sous des conditions dynamiques est influencée non seulement par la gravité et la force de trainée mais aussi pas le mouvement horizontal des eaux. Elle est alors fonction du débit et peut être représentée par l'équation suivante :

$$(5) R = 1 - \left[1 + \frac{1}{n} \left(\frac{v_s}{Q/A} \right) \right]^{-n}$$

Où R = fraction de particules sédimentées (-)

n = paramètre d'efficacité de la sédimentation (-)

v_s = vitesse de sédimentation critique (m/s)

Q = débit (m³/s)

A = aire de la surface du bassin (m²)

Le paramètre « n » représente le degré de la turbulence ou du court-circuitage qui tend à réduire l'efficacité de la sédimentation. Ce paramètre est égal à 1 pour une performance vraiment mauvaise, à 3 pour une bonne performance et à 5 pour une très grande efficacité. De plus, une valeur qui tend vers l'infini peut être assignée dans le cas où on veut représenter la sédimentation dans un bassin dans des conditions idéales. L'équation qui en découle alors est la suivante :

$$(6) R = 1 - e^{\left(-\frac{v_s}{Q/A}\right)}$$

On peut alors poser que le taux de sédimentation «k» est égal à « $v_s / [t_d(Q/A)]$ ». Sachant que le débit est égal au volume divisé par le temps, l'équation devient alors :

$$(7) R = 1 - e^{(-kt_d)}$$

Où k = coefficient de sédimentation = $v_s / (Vol / A)$ (s^{-1})

Vol = volume du bassin (m^3)

t_d = temps de rétention = Vol / Q (s)

A = aire de la surface du bassin (m^2)

On revient alors à l'équation (1) présentée au début de la section, pour une fraction d'enlèvement maximale de 100%. C'est l'équation (4) qui a été utilisée afin de modéliser la sédimentation dans le bassin de rétention. Le paramètre «n» de l'équation (3) a donc été posé égal à l'infini, ce qui modélise un bassin en conditions idéales puisque le but de ce projet est de comparer divers scénarios entre eux afin de démontrer l'efficacité du contrôle en temps réel par rapport à un bassin traditionnel non-contrôlé. De plus, ce choix a peu d'impact sur la méthodologie.

3.3 Contrôle en temps réel

Le contrôle en temps réel est présentement utilisé dans le cas de la gestion de réseaux d'égouts et permet par exemple de prendre des décisions au niveau d'un ouvrage dynamique en fonction des prévisions météorologiques afin d'optimiser le fonctionnement d'un réseau unitaire, i.e. en minimisant les débordements et en maximisant les volumes vers la station d'épuration. La Figure 6 présente le principe du contrôle en temps réel à l'aide d'un schéma.

Les prévisions météorologiques sont introduites dans un logiciel de simulation hydraulique pour obtenir les débits dans les conduites en fonction des conditions actuelles. Selon un horizon de contrôle prédéterminé, c'est-à-dire une plage de temps sur laquelle le logiciel simule les conditions du réseau et détermine des consignes à appliquer aux ouvrages dynamiques, le logiciel de simulation hydraulique effectue des calculs à chaque pas de temps de calcul et ce pour toute la plage de prévisions de l'horizon. Cet horizon peut s'étaler d'une heure à trois jours par exemple, dépendant du temps de parcours des eaux dans le réseau. Cependant pour un réseau pluvial avec bassin de rétention, l'horizon augmente car le remplissage du bassin peut se faire sur plusieurs jours pour de petites pluies. Le temps d'écoulement dans le réseau reste significativement plus court que le temps de rétention dans le bassin. Étant donné que les prévisions du radar peuvent changer dans le temps, le logiciel doit recalculer à intervalle régulier afin de s'adapter aux nouvelles prévisions. Afin de s'attarder uniquement à l'analyse du comportement de la sédimentation dans le bassin de rétention et à la démonstration de l'efficacité de la gestion des eaux pluviales dans un bassin de rétention avec le contrôle en temps réel, les prévisions météorologiques ont été directement introduites sous formes de séries pluviométriques dans SWMM. Donc, contrairement à la réalité, il n'y a aucune incertitude associée aux prévisions. Une décision au niveau d'un ouvrage dynamique, dans notre cas la vanne située à l'exutoire du bassin de rétention, est prise afin de minimiser les charges en MES rejetées au cours d'eau. Les décisions au niveau de l'ouverture ou de la fermeture de la vanne seront prises en fonction de divers objectifs : on veut minimiser les surverses par le déversoir et maximiser le temps de rétention en condition de quiescence des eaux de ruissellement pour ainsi maximiser la sédimentation.

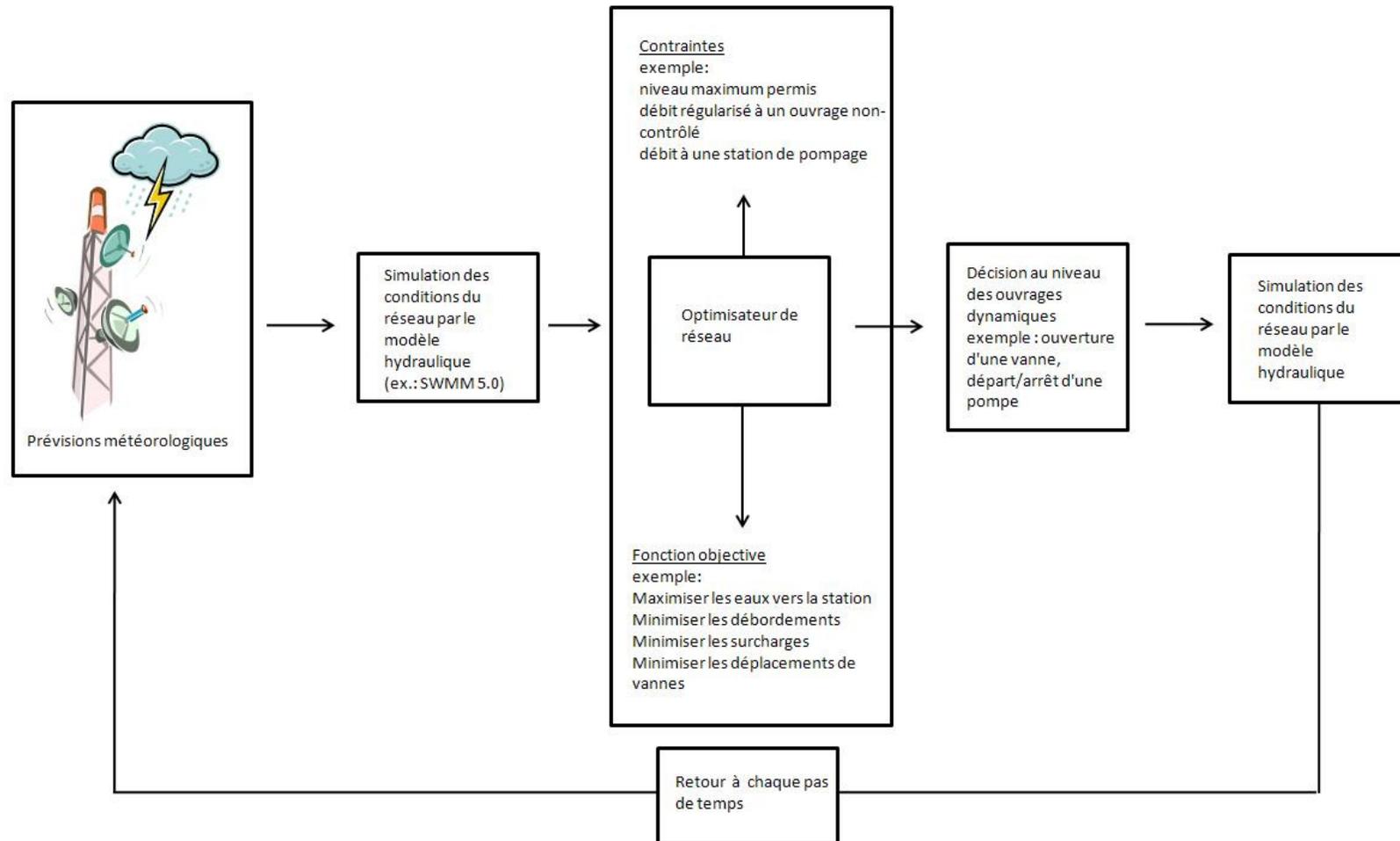


Figure 6 : Schéma décrivant les étapes du contrôle en temps réel

Le contrôle de la vanne située à l'exutoire du bassin de rétention a été fait au moyen des règles de contrôle dans le logiciel EPA SWMM 5.0. En fonction des séries pluviométriques déterminées, les règles sont établies comme ceci :

1. Retenir l'événement de pluie le plus longtemps possible dans le bassin de rétention en fermant la vanne ;
2. Lors de la prévision d'un prochain événement pluvieux :
 - 2.1 Si le volume disponible dans le bassin permet de retenir le volume d'eau de l'événement pluvieux : laisser la vanne fermée et retenir l'événement. Revenir au numéro 1 par la suite;
 - 2.2 Si le volume disponible dans le bassin ne permet pas de retenir le volume d'eau de l'événement pluvieux et qu'il y a possibilité de surverse :
 - 2.2.1 Évacuer de l'eau du bassin avant la venue de l'événement et refermer la vanne pour retenir l'événement. Revenir au numéro 1 par la suite;
 - 2.2.2 S'il est impossible de retenir tout l'événement avec la vanne fermée ou qu'il est impossible de vider le bassin : laisser la vanne ouverte. La rétention de l'événement se fera alors de façon traditionnelle. Fermer la vanne dès la fin de l'événement.

Avec ces règles, on procédera à la gestion de la vanne en fonction des prévisions afin de maximiser le temps de rétention et donc l'efficacité de la sédimentation dans le bassin de rétention, tout en évitant la surverse des eaux non-traitées. Ceci se produit lorsque survient un événement pluvieux et que le bassin est à son volume maximal.

Implanter une gestion des eaux d'un bassin de rétention à l'aide du contrôle en temps réel implique diverses technologies. Tout d'abord, le bassin de rétention doit être muni d'une vanne à son exutoire. Cette dernière doit être reliée à un actionneur qui est contrôlé par le système de gestion. Afin de connaître les niveaux d'eau dans le bassin de rétention, des

instruments de mesure devront être installés. De plus, afin de pouvoir prendre des décisions en fonction des prévisions météorologiques, des données de prévisions météorologiques provenant d'Environnement Canada devront être reliées au système de décision. Bien entendu, tout ceci nécessite que l'électricité soit acheminée au site du bassin de rétention. Avec le prix des technologies qui ne cessent de baisser, l'implantation du contrôle en temps réel est une solution abordable. De plus, lorsque l'on compare les investissements comparés aux bénéfices qu'offrent d'autres pratiques de gestions optimales traitant les eaux tel un marais filtrant ou un bassin de rétention traditionnel, on remarque que ces dernières nécessitent des superficies largement supérieures qui conduisent alors à un coût de construction plus important et présentent une efficacité de traitement de sédimentation inférieure à celui du bassin de rétention.

3.4 Scénarios

Toujours dans le but d'évaluer l'efficacité de la gestion des eaux pluviales dans un bassin de rétention par le contrôle en temps réel, divers scénarios ont été simulés. Ces scénarios ont été créés en changeant le coefficient de ruissellement du bassin versant et le volume du bassin de rétention.

Le bassin de rétention a été introduit, en ligne, sur le réseau pluvial afin de permettre la diminution des débits de pointe et la dépollution des eaux. Il se situe juste avant l'exutoire, comme indiqué à la Figure 1. Les bassins de rétention des divers scénarios ont été conçus suivants les règles de l'art. Selon le *Stormwater management practices planning and design manual* (OMOE, 2003), le bassin de rétention doit être conçu pour obtenir un temps de rétention d'au moins 24 heures. Pour les bassins conçus pour contrôler la qualité des eaux, ils doivent permettre l'enlèvement de 80% des matières en suspension. Ce manuel spécifie aussi un ratio longueur-largeur entre 4 :1 et 5 :1. Les pentes des berges doivent être d'un maximum de 3H : 1V. La partie permanente doit avoir entre 1 et 2 mètres de profondeur en moyenne. La partie non-permanente devrait varier entre 1 et 2 mètres de hauteur. L'orifice

de sortie doit avoir un diamètre supérieur à 450 mm. De plus, le volume du bassin sera tel qu'il puisse faire la rétention d'une pluie d'une récurrence de 1 fois en 100 ans.

Pour nos divers scénarios, seul le volume, donc l'aire par le fait même, changera d'un scénario à l'autre. L'exutoire du bassin de rétention a été conçu afin de relâcher au maximum un débit de 15 L/s·ha, pour tous les scénarios, permettant ainsi de réduire l'érosion des berges du cours d'eau récepteur. Cette consigne de vidange aux bassins de rétention est imposée par la Ville de Québec à tous les nouveaux développements afin de limiter l'impact de l'urbanisation sur le réseau hydrographique aval (Jolicoeur et al., 2008). En connaissant le débit maximum permis, et la charge maximale d'eau dans le bassin, on trouve un diamètre de 600 mm pour l'exutoire. Les caractéristiques choisies sont une profondeur maximale de 2 mètres, un ratio longueur/largeur de 4 :1 et des pentes de berges 3H :1V. Lorsque le niveau maximal de 2 mètres de rétention est atteint, il y a une partie permanente d'une hauteur de 1 mètre et une partie de rétention d'orage de 1 mètre de haut également. Le Tableau 6 et la Figure 7 présentent les caractéristiques de conception du bassin de rétention qui ont été retenues.

Tableau 6 : Caractéristiques utilisées pour la conception des bassins de rétention

Caractéristiques	Valeur
Profondeur maximale (m)	2
Niveau du fond (m)	0
Niveau de la rétention permanente (m)	1
Ratio longueur/largeur	4 :1
Pente des berges	3H : 1V
Diamètre de l'orifice de sortie (mm)	600

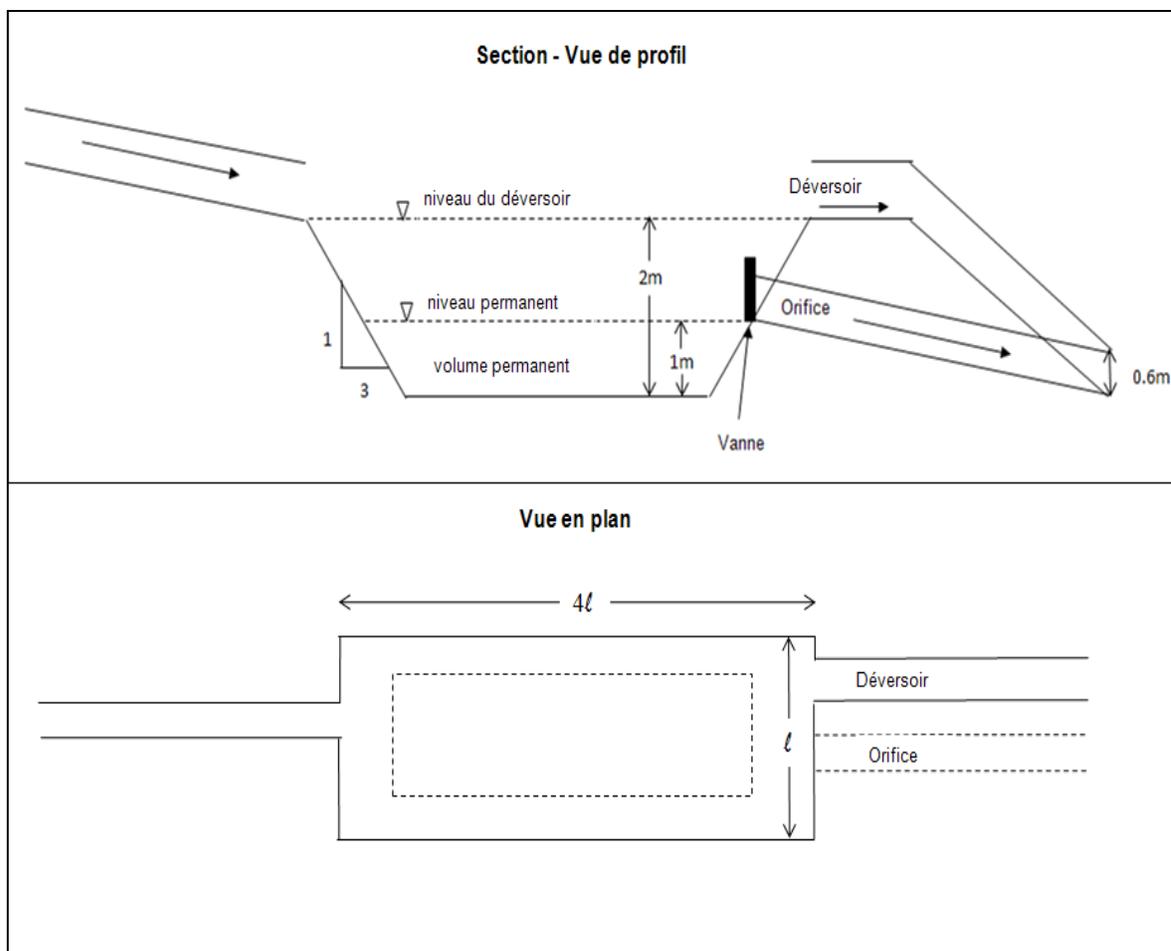


Figure 7 : Schéma des caractéristiques du bassin de rétention

3.4.1 Scénario de référence

Un scénario de référence a été conçu pour fin de comparaison. Comme il a été expliqué précédemment, le bassin de rétention a été conçu selon les règles de l'art. Seul son volume n'a pas été conçu afin de recevoir une pluie de récurrence 100 ans, ce dernier correspondant à la récurrence recommandée par Rivard (1998) pour concevoir des bassins de rétention. Un volume de bassin pouvant faire la rétention d'une pluie de récurrence 1 fois en 10 ans, niveau de service généralement accepté, a été choisi afin de contrôler les pluies de plus faibles récurrences, qui sont généralement plus polluées et qui ne sont pas contrôlées par les ouvrages contrôlant les grandes récurrences. La pluie de conception utilisée est une pluie du Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada (pluie SEA), une pluie de projet généralement utilisée dans la région de Québec, d'une durée d'une heure et

d'une récurrence de 1 fois en 10 ans et d'une hauteur d'eau totale associée aux données statistiques recueillies à l'Aéroport Jean-Lesage, sur le territoire de la ville de Québec (voir annexe 1). La répartition de la pluie sur une heure est spécifique à différentes régions du Canada. Celle utilisée est celle pour le sud-ouest du Québec. La hauteur totale des pluies ainsi que leurs récurrences sont établies par des analyses statistiques des séries pluviométriques sur plusieurs années. Les intensités et les durées, en fonction des fréquences, sont ensuite mises en graphique sur les courbes que l'on appelle «courbes IDF» (Intensité-Durée-Fréquence). Les données pour la région de Québec sont analysées à partir des séries pluviométriques enregistrées à l'Aéroport Jean-Lesage entre les années 1961 et 2005. La Figure 8 présente les courbes IDF pour la région de Québec.

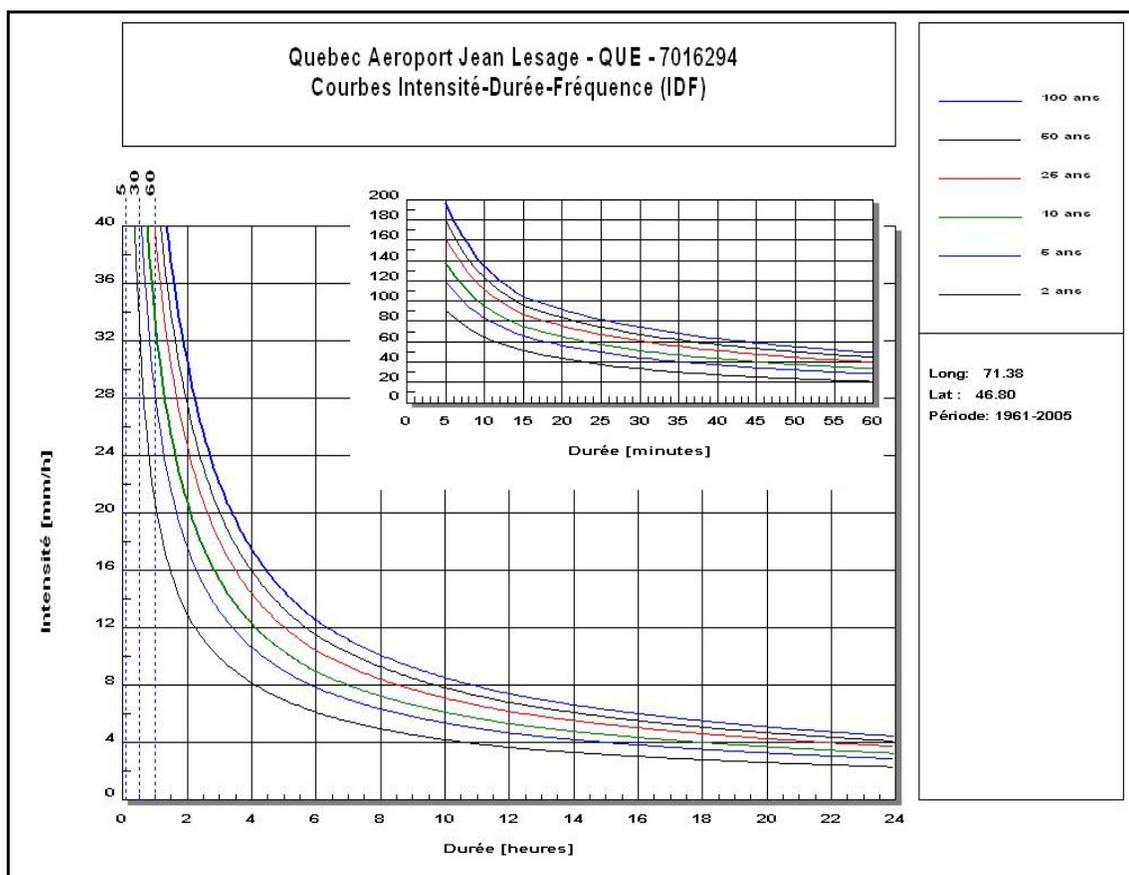


Figure 8 : Courbes IDF pour la Ville de Québec (Tiré du logiciel AquaIDF version 4.1.2, 2007)

On remarque sur la courbe IDF pour la Ville de Québec que plus la durée est courte, plus l'intensité est forte. Une pluie d'une durée de 1 heure a donc été choisie, puisqu'une pluie de forte intensité et de courte durée produit de plus gros débits sur un bassin versant urbain, qui réagit très vite et est très imperméable, qu'une pluie de longue durée, qui est critique dans le cas des bassins naturels, qui eux, réagissent plus lentement et qui sont plus perméables. Le Tableau 7 présente les diverses caractéristiques du bassin de rétention du scénario de référence, tels la fonction de l'aire, l'aire au niveau de la rétention maximale et le volume de rétention maximal. Cette aire représente en fait, la surface occupée par l'eau, au niveau maximal, en vue en plan. Le bassin étant de forme trapézoïdale, l'aire de la surface change selon le niveau d'eau présent dans le bassin (voir Figure 6).

Tableau 7 : Caractéristiques du bassin de rétention du scénario de référence

Caractéristiques	Valeur
Fonction de l'aire	$Aire = 987 * (Hauteur)^{1.05168416} + 3283$
Aire au niveau de la rétention maximale	5329 m ²
Volume de rétention maximale	4794 m ³

3.4.2 Scénarios de comparaison

Trois autres scénarios ont été conçus afin d'étudier le comportement des sédiments dans la gestion des eaux avec le contrôle en temps réel. Tous les scénarios ont été étudiés avec et sans contrôle en temps réel de la vanne à l'exutoire du bassin de rétention afin d'évaluer l'efficacité de cette solution. Le premier scénario testé consiste à diminuer le volume du bassin de rétention à une récurrence de 2 ans. Ce dernier accueillera les eaux de ruissellement du bassin versant qui a un coefficient de ruissellement de 22,1%. La pluie utilisée est une pluie SEA de récurrence 2 ans et de durée 1 heure. Elle est présentée également en annexe 1. Le Tableau 8 présente les caractéristiques du bassin de rétention conçu pour retenir le volume d'eau d'une pluie de récurrence 2 ans.

Tableau 8 : Caractéristiques du bassin de rétention de récurrence 2 ans

Caractéristiques	Valeur
Fonction de l'aire	Aire = $672 * (\text{Hauteur})^{1.07528813} + 1288$
Aire au niveau de la rétention maximale	2704 m ²
Volume de rétention maximale	2326 m ³

On remarque que le bassin conçu pour une récurrence 2 ans est près de la moitié en aire de surface et en volume du bassin de rétention 10 ans. Les deuxième et troisième scénarios testés sont des versions des deux premiers soumis à une augmentation du développement résidentiel, c'est-à-dire que le volume des bassins de rétention restent les mêmes mais le coefficient de ruissellement du bassin versant a été augmenté à 50%. Le Tableau 9 présente les différents scénarios. Il est à noter que tous ces scénarios ont été étudiés avec et sans contrôle, ce qui porte le nombre de simulations à huit.

Tableau 9 : Caractéristiques des divers scénarios étudiés dans ce projet

Scénarios étudiés avec et sans contrôle		
	Récurrence du volume du bassin	Coefficient de ruissellement du bassin versant (%)
1	10 ans	22.1
2	2 ans	22.1
3	10 ans	50
4	2 ans	50

3.5 Séries pluviométriques

Comme il a été expliqué dans la section sur le contrôle en temps réel, les prévisions météorologiques sont entrées directement dans le logiciel SWMM sous forme de séries pluviométriques donc elles ne comportent aucune incertitude. Tout d'abord, les quatre

scénarios ont été simulés avec une série pluviométrique réelle. Cette série provient du pluviomètre 901, qui se situe dans le nord de la Ville de Québec. Le mois de juillet 2006 a été choisi puisqu'il présentait des événements différents. La Figure 9 présente les intensités de précipitation (hauteur d'eau en pluie tombée durant 5 minutes) durant ce mois. On peut remarquer sur cette figure, que la série présente autant de faibles et fréquentes pluies avec peu de temps sec entre elles, que de fortes pluies et de longues périodes de temps sec entre elles.

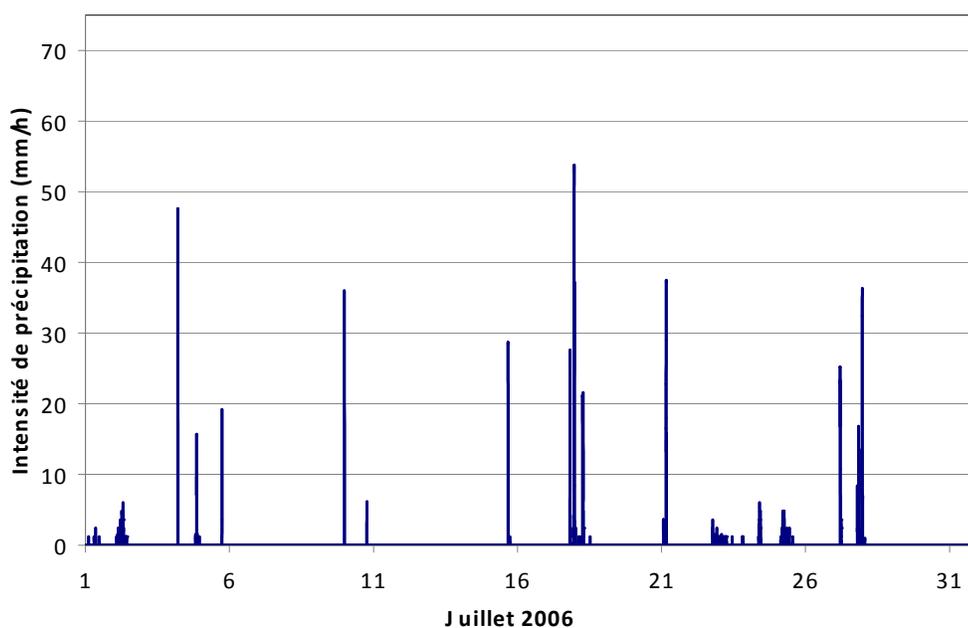


Figure 9 : Série pluviométrique du mois de juillet 2006 du pluviomètre 901 de la Ville de Québec

Le Tableau 10 présente les caractéristiques et statistiques des différents événements de pluie qui ont été enregistrés par le pluviomètre 901 en juillet 2006. Il est tombé au total 116,2 mm de pluie durant cette période. La pluie la plus importante est celle du 17 juillet, avec 23,5 mm de pluie durant 13 heures et 35 minutes précédée par plus de deux jours de temps sec pendant laquelle les polluants s'accablent sur la surface du bassin versant (*buildup*). Elle présente aussi l'intensité maximale sur 5 minutes, soit 52,8 mm/h. La pluie du 15 juillet est celle qui est précédée par le plus long temps sec, soit près de cinq jours. La pluie du 22 juillet est une longue pluie d'intensité plus faible. La majorité des autres pluies présentent de très faibles récurrences. En bref, toutes ces pluies sont différentes les unes des

autres et donnent un bon portrait des divers comportements de la pollution des eaux de ruissellement en milieu urbain.

Tableau 10 : Statistiques des divers événements de pluie durant le mois de juillet 2006 au pluviomètre 901 de la Ville de Québec

Pluies de juillet 2006					
Date et heure de début de l'événement	Hauteur totale	Intensité moyenne	Intensité max. sur 5 min.	Durée	Temps sec avant la pluie
	(mm)	(mm/h)	(mm/h)	(hh:mm)	(jj hh:mm)
2006-07-01 02:35	0.9	0.1	2.4	08:55	11:20
2006-07-02 02:00	9.6	1.1	6.0	08:30	14:30
2006-07-04 04:55	7.3	29.2	46.8	00:15	01 18:25
2006-07-04 19:40	4.8	1.4	15.6	03:25	14:30
2006-07-05 17:40	2.0	8.0	19.2	00:15	18:35
2006-07-09 23:45	3.0	36.0	36.0	00:05	04 05:50
2006-07-10 18:25	1.2	4.8	6.0	00:15	18:35
2006-07-15 16:15	3.7	2.3	28.5	01:35	04 21:35
2006-07-17 19:45	6.3	8.4	27.6	00:45	02 01:55
2006-07-17 23:00	23.5	1.7	52.8	13:35	02 05:10
2006-07-21 01:35	13.8	4.9	37.2	02:50	02 13:00
2006-07-22 18:30	5.8	0.5	3.6	11:45	01 14:05
2006-07-23 10:50	0.1	1.2	1.2	00:05	04:35
2006-07-23 19:30	0.3	0.5	1.2	00:35	08:35
2006-07-24 09:00	5.2	2.9	6.0	01:50	12:55
2006-07-25 03:25	6.7	0.6	4.8	10:05	16:35
2006-07-27 04:50	10.0	8.0	25.2	01:15	01 15:20
2006-07-27 19:10	12.0	1.9	36.0	06:25	13:05

Après avoir comparé et analysé les divers scénarios simulés avec la série pluviométrique du mois de juillet 2006, des bilans estivaux sont faits en simulant les séries pluviométriques des périodes estivales de 2004 à 2006 afin d'analyser le comportement du bassin de rétention et de la sédimentation avec le contrôle en temps réel. Ces séries s'étendent du 15 mai au 15 septembre pour chacune des années, période durant laquelle les orages peuvent provoquer des déversements importants au milieu récepteur. L'annexe 2 présente les séries pluviométriques utilisées pour simuler les bilans estivaux. Les statistiques de ces séries pluviométriques suivent dans l'annexe 3. Le Tableau 11 présente le résumé de ces

statistiques. Il est tombé 605,95 mm durant l'été 2004, 438,76 mm durant l'été 2005 et 363,31 mm durant l'été 2006.

Tableau 11 : Statistiques de la pluviométrie durant les saisons estivales 2004 à 2006 au pluviomètre 901 de la Ville de Québec

Saison	Hauteur totale	Intensité max. sur 5 min.	Durée moyenne	Durée max.	Temps sec moyen	Temps sec max.
	(mm)	(mm/h)	(hh:mm)	(jj hh:mm)	(jj hh:mm)	(jj hh:mm)
Été 2004	605.95	5.7	02:30	01 05:15	01 00:43	10 02:55
Été 2005	438.76	6.0	01:54	00 15:35	00 19:36	06 04:30
Été 2006	363.31	66.0	04:00	00 20:10	01 05:55	05 03:35

On remarque que ces trois saisons ont des hauteurs d'eau totales bien différentes; il est tombé deux fois plus d'eau durant la saison 2004 que durant la saison 2006. L'été 2006 présente une intensité maximale nettement supérieure à celle des étés 2004 et 2005. On peut facilement conclure que les étés 2004 et 2005 n'ont comporté que des faibles pluies. L'été 2004 présente l'événement de pluie le plus long. Les autres étés ne présentent que des événements très courts. L'été 2005 a connu aussi très peu de temps de pluie. L'été 2004 présente la période de temps sec entre deux événements la plus importante, ce qui devrait représenter l'accumulation la plus importante de polluants sur le sol.

Les résultats des simulations des divers scénarios et des bilans estivaux ainsi que la discussion qui en découle vont être présentés dans les sections suivantes sous forme d'un article scientifique.

4. Potentiel d'une gestion des eaux pluviales dans un bassin de rétention par le contrôle en temps réel en fonction des prévisions météorologiques

Résumé

Malgré les nombreux problèmes qu'engendrent la pollution urbaine, la qualité des eaux pluviales est peu tenue en compte par les gestionnaires car ils centrent surtout leur gestion sur les problématiques d'inondations et de refoulement. Même si l'utilisation d'un bassin de rétention dans la gestion des eaux pluviales permet de réduire les charges en polluants, les particules fines et les polluants adsorbés sont en majorité rejetés dans le milieu récepteur. L'objectif de ce projet sera alors d'intégrer un concept de contrôle en temps réel des eaux pluviales urbaines pour minimiser l'impact de ces rejets sur le cours d'eau récepteur. En effectuant la gestion des eaux pluviales d'un bassin versant urbain en fonction des prévisions météorologiques, avec un bassin de rétention muni d'une vanne à son exutoire, on permet d'augmenter le temps de rétention des eaux et ainsi d'augmenter la sédimentation dans le bassin de rétention. Les prévisions météorologiques ont été intégrées de façon parfaite afin de démontrer le plein potentiel du concept. La modélisation de la qualité et de la quantité des eaux dans un bassin versant typiquement urbain et l'élaboration de règles de contrôle a été faite à l'aide du logiciel EPA SWMM 5.0. Il s'est avéré que le contrôle en temps réel est une solution efficace pour augmenter la sédimentation des matières en suspension dans le bassin de rétention. Dans tous les scénarios étudiés et simulations effectuées, le bassin contrôlé offre une efficacité de sédimentation supérieure à celle du bassin traditionnel de l'ordre de 2 fois au moins, et jusqu'à 25 fois dans le meilleur des cas. La modélisation des matières en suspension a été choisie puisque ces dernières sont directement reliées aux charges en polluants urbains. La modélisation a permis de quantifier les charges en sédiments à l'entrée, dans le bassin et à la sortie de ce dernier afin d'évaluer l'efficacité du contrôle en temps réel dans la gestion d'un bassin de rétention. Le contrôle en temps réel a démontré qu'il augmentait davantage la sédimentation des particules fines, sur lesquelles la majorité des polluants s'adsorbent. La charge en polluants

rejetés peut donc être diminuée d'au moins 50% pour un bassin typiquement urbain en intégrant le contrôle en temps réel et ainsi améliorer la qualité du cours d'eau récepteur.

1. Introduction

De plus en plus, la qualité des eaux de surface en milieu urbain est une préoccupation non seulement pour le milieu scientifique, mais aussi pour les citoyens et les gestionnaires des eaux. Pendant longtemps, on a cru que les eaux de ruissellement en milieu urbain n'étaient pas contaminées et que leur forte décharge ne causait pas d'impacts négatifs permanents sur l'environnement. En 1983, la venue d'un programme de l'EPA (*U.S. Environment Protection Agency*), le programme de mesures *NURP (Nationwide Urban Runoff Program)* a éveillé le monde scientifique au problème de la pollution urbaine en démontrant que le ruissellement urbain était une source importante de pollution des cours d'eau (Rivard 1998; Environmental Protection Agency, 1983). Transportant avec elles divers polluants et pathogènes accumulés sur le sol et étant déchargées à de très fortes vitesses, les eaux de ruissellement causent pollution et érosion des milieux récepteurs. Les écosystèmes riverains et aquatiques sont alors affectés, l'eau connaît un déséquilibre chimique au niveau de la salinité, du pH et de l'oxygène dissous par exemple, des organismes meurent, des habitats sont détruits et les fonds ainsi que la chaîne alimentaire peuvent être contaminés. Il peut y avoir aussi eutrophisation du cours d'eau, limitation des usages et augmentation des coûts de traitement.

Les polluants urbains proviennent des chaussées et des sites de construction où s'accumulent sédiments, produits toxiques, produits à base de pétrole, résidus de jardinage, insecticides, herbicides et déjections animales; des égouts, lors de déversements, des branchements illicites aux réseaux d'égouts; des fosses septiques non-étanches; et des toits des bâtiments. Les principaux polluants provenant de ces sources et contaminant les eaux sont les matières en suspension (MES), les nutriments, les matières organiques, les hydrocarbures, les éléments pathogènes, les métaux lourds et les sels. Lors de leur transport dans les eaux de ruissellement, les divers polluants urbains ont tendance à s'adsorber aux

MES avant que ces dernières ne se sédimentent en cours d'eau. Les concentrations des eaux en MES peuvent donc être considérées comme un indicateur de la qualité de celles-ci.

Après plusieurs années d'impacts nuisibles dans les milieux récepteurs, la prise en compte de la qualité dans la gestion des eaux en milieu urbain devient une plus grande préoccupation, même si la quantité (inondations/refoulements) reste tout de même l'objectif principal des gestionnaires pour le moment. Le monde scientifique s'entend pour dire qu'il est désormais urgent pour la santé des cours d'eau et la survie des écosystèmes d'orienter davantage la gestion des eaux de ruissellement vers la qualité. En tentant de trouver des moyens afin de diminuer les charges en polluants rejetés dans les milieux récepteurs dans un esprit de développement durable, les impacts nuisibles dans les cours d'eau pourront être diminués, permettant ainsi un respect des écosystèmes et un maintien des aspects esthétiques et récréatifs, tout en diminuant les coûts de traitement pour les sources d'eau potable.

1.1 Dépollution des eaux pluviales par le bassin de rétention

Afin de contrôler les polluants arrivant des bassins versants urbains et s'en allant aux milieux récepteurs, des pratiques de gestion optimales (PGO) (*Best Management Practices-BMP*) ont été rapidement mises en place. Ces pratiques ont été créées dans le but de réduire les volumes et les débits de ruissellement ainsi que les charges en polluants rejetés qui se sont mis à augmenter avec l'accroissement du développement urbain. Parmi ces pratiques, la plus fréquemment utilisée est le bassin de rétention. Cette pratique est généralement intégrée en ligne ou hors ligne, à la fin d'un réseau ou d'une portion de réseau, afin de limiter les débits vers l'aval. Ce réservoir permet l'emmagasinement des eaux en créant une restriction à son exutoire. Les eaux de ruissellement se trouvent donc à être déchargées au cours d'eau récepteur sur une plus longue période de temps à un débit de pointe moins élevé, représentant en aval des conditions se rapprochant de celles avant développement.

Le bassin de rétention a plusieurs fonctionnalités en plus de réduire les débits de pointe et relâcher les eaux sur une plus longue période, le temps de séjour étendu permet

l'agglomération et la sédimentation des divers polluants urbains. Divers guides de conception en drainage urbain adoptent comme critère de conception que 80% des matières en suspension doivent sédimenter lors de leur séjour dans le bassin (OMOE, 2003). Sachant que les matières en suspension dont la taille est inférieure à 60 microns peuvent s'associer à près de 80% des métaux et autres polluants (Rivard, 1998; Wright et McLaughlin, 2001), il est clair que ce sont ces particules qui causeront le plus de torts aux écosystèmes. Ce sont donc ces dernières que l'on devrait prioriser pour la sédimentation. Le problème est que, plus les particules sont fines, plus elles mettent de temps à sédimenter. Il est alors primordial, pour le contrôle de la qualité, de concevoir un bassin dont le temps de rétention permettra la sédimentation des particules plus fines.

Pour le moment, les temps de rétention généralement observés dans des bassins conçus selon les règles de l'art sont entre 24 et 48 heures pour les pluies de fortes récurrences. Ce temps est trop court pour permettre la sédimentation des particules fines. Pire encore, ces bassins de rétention laissent passer librement les événements de faibles récurrences. Ces pluies ont donc un temps de rétention très faible, rendant moins efficace encore le processus de sédimentation. De plus, les premiers volumes (en début d'événement) sortent plus rapidement du bassin que ceux de la fin. Ces volumes contiennent généralement le premier lessivage des polluants, qui correspond aux premiers 20% du ruissellement d'une précipitation et transportant environ 80% ou plus des polluants totaux de l'événement (Shammaa et al., 2002). On appelle ce phénomène le premier lessivage, ou «*first-flush*». Avec la combinaison de ces effets, l'efficacité de la sédimentation dans les bassins de rétention conçus traditionnellement n'est pas optimale.

1.2 Facteurs qui améliorent la sédimentation

Depuis l'implantation des bassins de rétention dans la gestion des eaux pluviales, plusieurs études ont tenté de déterminer les facteurs qui permettent d'augmenter l'efficacité de la dépollution des eaux. Loganatha et al. (1994) ont démontré dans une étude que l'efficacité d'enlèvement des polluants dans un bassin de rétention est directement liée au temps de rétention dans le bassin. Elliot (1998) a démontré que l'enlèvement des polluants dans les

eaux en bassin de rétention augmentait en fonction du ratio entre l'aire du bassin de rétention et le pourcentage d'imperméabilité du bassin versant tributaire. De plus, en diminuant la profondeur du bassin, il a déterminé qu'on augmente légèrement son efficacité puisque les particules sédimentent en un temps plus court puisque la distance à parcourir avant d'atteindre le fond est moindre. Papa et al. (1999) en sont venus à la même conclusion que Loganatha et al. (1994). Ils ont aussi démontré que l'efficacité augmente avec le temps de rétention, mais jusqu'à un temps optimal. Au-delà de ce temps, l'efficacité de dépollution diminue. Ils ont démontré aussi que plus la profondeur du bassin était petite, plus l'efficacité était grande, bien qu'une profondeur minimale doit être gardée afin d'éviter les problèmes de resuspension, de formation de vagues, de profils de température et de brassage des eaux. Li et al. (2007) ont démontré que la sédimentation est plus importante en amont du bassin de rétention et diminue par la suite jusqu'à l'exutoire. Ils ont aussi démontré que plus le débit était important dans le bassin, plus la sédimentation était gênée. La performance maximale du bassin de rétention se produit lorsque toute la surface est utilisée, i.e. lorsqu'il n'y a pas de zones stagnantes, ni de court-circuitage et plus le bassin agira comme un réacteur à écoulement-piston, plus il sera efficace. En bref, l'efficacité de traitement dans un bassin de rétention dépend principalement du temps de résidence des eaux dans ce dernier (Walker, 1998). Il est alors primordial de trouver des moyens d'augmenter le temps de résidence des eaux dans le bassin de rétention afin d'augmenter la sédimentation et ainsi obtenir un meilleur impact sur le milieu récepteur.

1.3 Augmentation du temps de résidence des eaux

Le moyen le plus simple d'augmenter le temps de résidence des eaux est d'augmenter le volume du bassin de rétention. Par contre, il n'est pas toujours possible de l'augmenter pour des raisons d'espace ou des raisons économiques : c'est pour cela que la recherche s'est orientée vers d'autres méthodes afin d'augmenter le temps de rétention (Conn et Fiedler, 2006). Diverses configurations de bassins et marais en série, de géométries et combinaisons d'éléments structuraux ont été testées et ont démontré leur efficacité. Oberts et Osgood (1991) ont présenté une étude d'un système de traitement comprenant un bassin de rétention suivi de six marais. Le bassin sert principalement à sédimenter les MES et les

marais à terminer le processus de dépollution avant que les eaux soient rejetées dans le milieu récepteur. En fait, ce système devient intéressant dans le cas où le bassin serait dans l'impossibilité de traiter les eaux, soit lors d'une forte pluie ou d'une pluie survenant lorsque le bassin est rempli. Walker (1998) a utilisé un modèle à deux dimensions afin d'étudier l'effet du ratio longueur-largeur dans un bassin de rétention avec fond plat et l'effet des îles près de l'entrée afin de faire diverger le débit entrant dans un bassin sujet au court-circuitage. Il a déterminé que l'efficacité de traitement est augmentée avec l'utilisation d'un ratio 4 :1 et qu'au delà de ce ratio, l'efficacité diminue (Conn et Fiedler, 2006).

L'Alberta Environmental Protection (1999) a proposé un système de traitement à deux bassins. Le premier est plus petit, donc conçu pour des événements fréquents et ne sert qu'à sédimenter les particules. Le deuxième, plus grand, est conçu pour prévenir les inondations. Comings et al. (2000) ont aussi présenté une étude avec un système de bassins en série. Le premier bassin est conçu afin de dépolluer les eaux de ruissellement avec une atténuation limitée des débits. Il a été conçu en forme de fer à cheval afin de minimiser le court-circuitage et contient une partie permanente beaucoup plus grande que le deuxième bassin. Le deuxième bassin est conçu pour diminuer les débits et permet une certaine sédimentation et dépollution des eaux.

Un autre type de système très prometteur qui consiste à concevoir une sortie avec un système à paliers multiples a été testé par Shammaa et al. (2002). Il permet d'assurer une rétention suffisante pour les deux types d'événement de pluies visées; soit celle provoquant l'inondation et celle qui contient le premier lessivage. Un tuyau vertical sert de sortie pour les eaux du bassin. Au bas se trouve un orifice secondaire, de plus petite dimension que l'orifice principal, qui contrôle le débit de la pluie contenant le premier lessivage, permettant ainsi de le décharger sur une plus longue période vers le milieu récepteur. La partie du haut est une combinaison d'un orifice ou d'un seuil afin de contrôler les plus grands débits. Un système avec un seuil en «V» ou un système de barrière sur le fond du bassin couvrant partiellement la partie inférieure de l'aire d'écoulement peuvent reproduire le même comportement.

Dans le cas où l'on n'a pas l'espace disponible pour la construction d'un bassin ayant un ratio longueur-largeur adéquat, l'ajout d'îles ou de barrières transversales a été suggéré. Le modèle de Walker (1998) a été repris par Conn et Fiedler (2006) pour être utilisé dans le cas de marais. Ils ont étudié diverses combinaisons altérant la géométrie du bassin à l'aide d'îles et de chicanes transversales formant des méandres afin d'augmenter le temps de résidence des eaux. (Gharabaghi et al., 2006) ont étudié l'effet du ratio longueur-largeur et les surverses d'eau non-traitée sur l'efficacité de traitement des eaux dans un bassin de rétention. Ils ont démontré qu'en augmentant le ratio longueur-largeur, on augmente ainsi l'efficacité du traitement, tout en diminuant les débits de pointe et l'effet de court-circuitage.

1.4 Problèmes reliés à l'augmentation du volume

Afin d'augmenter la dépollution des eaux, il suffit de sédimenter les plus petites particules, car ce sont ces dernières qui transportent le plus de polluants agglomérés. Ces particules sédimentent sur un très long temps, obligeant le concepteur à augmenter le temps de rétention. L'augmentation du temps de rétention des eaux ne fait pas augmenter l'efficacité du traitement indéfiniment comme l'a démontré Papa et al. (1999). Il atteint un optimum et par la suite, lorsqu'on augmente le temps de rétention, l'efficacité diminue puisque que, plus le temps de rétention est long, plus le temps de vidange du bassin est long. Ceci peut alors conduire à une augmentation du déversement des eaux par dessus le seuil de sécurité et donc une augmentation du relâchement des eaux non-traitées dans le cas où une seconde pluie survenait lorsque le bassin est rempli. De plus, la sédimentation est plus efficace pour les petits débits selon la théorie de la sédimentation dynamique (Papa et al., 1999), i.e. que plus le débit est faible, plus la sédimentation sera facilité. Il suffit donc de trouver un temps de rétention optimal afin d'augmenter la sédimentation dans le bassin de rétention à un optimum.

2. Objectifs de l'étude

Les études présentées ci-haut ont démontré qu'il était possible d'augmenter le temps de rétention des eaux dans un bassin de rétention en augmentant le volume du bassin de rétention. Par contre, une fois le bassin construit et les configurations appliquées, le temps de vidange d'un événement à l'autre est simplement dépendant de l'hydrogramme d'entrée et du volume d'eau présent dans le bassin. La solution apportée dans ce projet, afin d'optimiser l'efficacité de traitement des eaux de ruissellement, est d'intégrer le contrôle en temps réel du débit de vidange dans la gestion du bassin de rétention. L'avantage est que cette solution peut être appliquée autant dans le cas de futurs bassins que dans le cas de bassins déjà construits. La gestion des eaux de ruissellement se fera dans un bassin versant typiquement résidentiel, à l'aide d'une vanne contrôlée en temps réel située à l'exutoire d'un bassin de rétention. Cette solution permettra de faire varier le temps de rétention des eaux, en fonction des prévisions météorologiques et du volume d'eau présent dans le bassin, afin d'augmenter l'efficacité de la sédimentation. La gestion de l'ouverture de la vanne se fera afin de retenir les eaux le plus longtemps possible dans le bassin de rétention, tout en minimisant la surverse des eaux non-traitées. En fermant la vanne, on empêche les eaux de sortir, ce qui lui impose un temps de rétention supplémentaire qui fera augmenter l'efficacité de la sédimentation. En ouvrant la vanne, on permettra la vidange du bassin pour accueillir un prochain événement, évitant ainsi la surverse des eaux non-traitées.

Dans la réalité, ce type de système de gestion implique l'implantation de diverses technologies. Une vanne, un actionneur et des instruments de contrôle doivent être installés à l'exutoire du bassin de rétention. Des données de prévisions météorologiques sont aussi nécessaires à la connaissance actuelle et future des conditions. L'hypothèse a été faite que les prévisions météorologiques intégrées sont parfaites afin de démontrer le plein potentiel du concept. De plus, tout ceci nécessite un système de communication permettant de tous les relier au système de gestion. En comparant les investissements aux bénéfices qu'offrent d'autres pratiques de gestions optimales traitant les eaux tel un marais filtrant ou un bassin de rétention traditionnel, on remarque que ces dernières nécessitent des superficies largement supérieures, donc un coût de construction plus important et présentent une efficacité de traitement de sédimentation inférieure à celui du bassin de rétention. De plus,

dans un contexte de changement climatique où les pluies deviendront plus intenses et plus fréquentes, ce type de gestion pourra s'adapter facilement aux conditions changeantes en ajustant le temps de rétention du bassin sans avoir à modifier son volume, contrairement aux ouvrages statiques existants qui ne peuvent modifier leur temps de rétention. Ce type d'ouvrage est peut s'adapter plus facilement aux conditions changeantes puisque sa gestion est flexible.

Ce projet consistera donc à faire la gestion de la qualité des eaux de ruissellement, dans un bassin versant typiquement urbain, au moyen d'un bassin de rétention, muni d'une vanne à son exutoire, contrôlée en temps réel, en fonction des prévisions météorologiques. Les prochaines sections présenteront les diverses étapes du projet, soient la modélisation de l'hydrologie et de l'hydraulique, la modélisation de la qualité des eaux, i.e. l'accumulation, le lessivage, le transport et la sédimentation des polluants, ainsi que le contrôle de la vanne à l'exutoire du bassin de rétention. Ces étapes ont été faites à l'aide du logiciel de gestion des eaux pluviales développé par l'EPA, SWMM 5.0. La modélisation des polluants à l'entrée et à la sortie du bassin de rétention permettra de démontrer l'efficacité de la gestion des eaux pluviales par le contrôle en temps réel en fonction de prévisions météorologiques sur la quantité de polluants rejetés dans le milieu de récepteur.

3. Méthodologie

Afin d'évaluer l'efficacité de la gestion des eaux pluviales par le contrôle en temps réel, une modélisation de la qualité et de la quantité des eaux est faite avec le logiciel EPA SWMM 5.0. Le bassin versant étudié est un bassin fictif typiquement résidentiel muni d'un bassin de rétention à l'exutoire et quatre scénarios ont été choisis afin d'évaluer les quantités en MES rejetés au milieu récepteur. Ces scénarios seront comparés, avec ou sans contrôle, afin d'évaluer la quantité de MES sédimentées. Dans cette section, le bassin versant étudié, les méthodes utilisées pour la modélisation de la qualité (i.e. l'accumulation, le lessivage et la sédimentation) et les divers scénarios seront présentés.

3.1 Bassin versant étudié

Le bassin étudié est un bassin typiquement résidentiel de 75.735 hectares. Le site est composé de 17 sous-bassins. Les eaux de ruissellement sont toutes orientées vers un seul et unique point : le bassin de rétention. L'occupation du sol du bassin versant présente un coefficient de ruissellement des eaux de 22.1%, représentant ainsi un faible taux de développement résidentiel. Le coefficient de ruissellement présente la portion du volume totale de la précipitation qui a ruisselé sur le sol. Il est directement relié à l'imperméabilité du sol. Afin de comparer des scénarios de gestion des eaux pluviales, il faut faire la modélisation de la qualité et de la quantité des eaux. La Figure 1 présente le schéma de modélisation du site étudié. On y présente les nœuds d'entrées des sous-bassins versant avec leurs caractéristiques respectives.

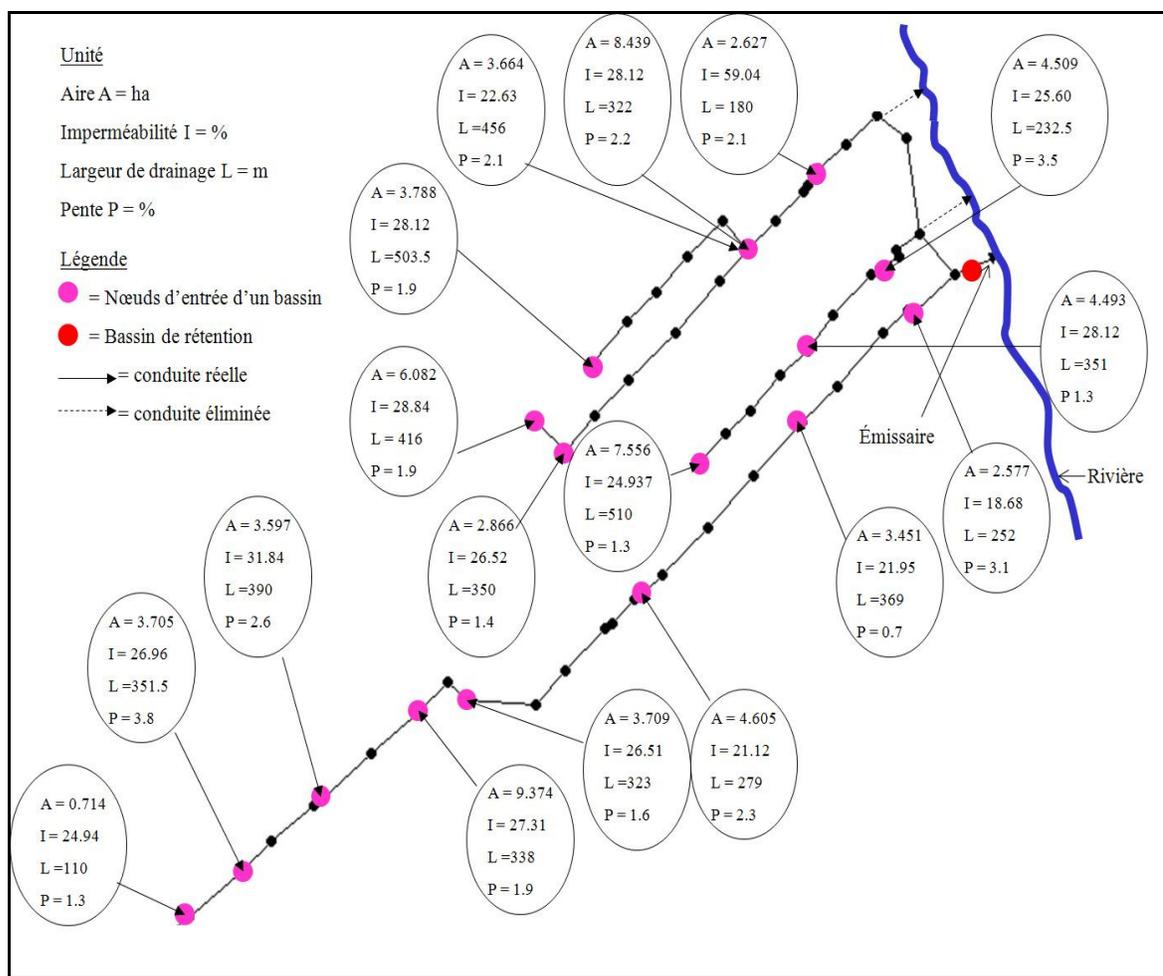


Figure 1 : Schéma de modélisation du site étudié et caractéristiques des sous-bassins

3.2 Modélisation de la qualité

La représentation du phénomène de pollution des eaux de ruissellement se fait selon divers processus. Le premier est appelé le «*buildup*», qui est la phase d'accumulation des polluants sur le sol du bassin versant durant les périodes de temps sec. Le deuxième est le «*washoff*», qui représente le lessivage des polluants par les eaux de ruissellement. Une fois lessivés, les polluants sont mélangés aux eaux de ruissellement et sont alors transportés dans le réseau jusqu'à ce qu'elles atteignent le milieu récepteur. Dans ce projet, les eaux pluviales, avant d'atteindre le milieu récepteur, passent par le bassin de rétention. C'est alors que le phénomène de sédimentation prend place, représentant ainsi l'effet de dépollution du bassin. Due à la relation proche entre les MES et les autres types de polluants, la concentration en matières en suspension est souvent utilisée comme un indicateur de la qualité des eaux (OMOE, 2003). Les MES seront donc l'indicateur à l'étude dans ce projet. De plus, plus les particules en suspension sont fines, plus de polluants s'y adsorbent. Il est donc important d'étudier ces dernières en fonction de leur taille. Le Tableau 1 présente les matières en suspension contenues dans les eaux de ruissellement séparées en différentes classes de diamètres, leur proportion typique, ainsi que leur vitesse de sédimentation respective. Il présente aussi, dans un calcul ajouté, le temps nécessaire aux diverses particules pour sédimenter d'une hauteur de 1 mètre en condition de quiescence.

Tableau 1 : Diamètres, fraction typique de la masse totale et vitesse de sédimentation des sédiments contenus dans les eaux de ruissellement (adapté de OMOE, 2003)

Diamètre (µm)	% masse totale	Vs (m/s)	Temps pour descendre de 1m
<20	20	2.54E-06	4j 13h 21min 41s
20-40	10	1.30E-05	21h 22min 3s
40-60	10	2.54E-05	10h 56min 10s
60-130	20	1.27E-04	2h 11min 14s
130-400	20	5.93E-04	28min 6s
400-4000	20	5.50E-03	3min 2s
Total	100		

3.2.1 Accumulation

Le premier processus de pollution des eaux de ruissellement est le «*buildup*» : les polluants s'accumulent sur le bassin versant durant les périodes de temps sec et sont lessivés en temps de pluie. En réalité, le taux d'accumulation est plus grand durant les jours suivant la dernière pluie et diminue par la suite (Sartor et Boyd, 1972 ; Akan et Houghtalen, 2003). Ce phénomène de réduction est dû à des facteurs physiques et chimiques qui réduisent l'accumulation de saleté sur la chaussée, soit le vent, le passage des véhicules, la dégradation biologique de certains polluants et l'enlèvement intentionnel par le lavage des rues. Ce phénomène étant difficile à quantifier, l'équation de la puissance linéaire proposée par le logiciel SWMM a été utilisée pour modéliser l'accumulation des sédiments sur le bassin versant (Huber et al., 1988). Elle est la plus couramment utilisée. Voici l'équation de l'accumulation utilisée.

$$DD = AXt$$

Où DD = accumulation de sédiments sur le sol du bassin versant (kg)

A = accumulation (kg/(km·bordure)(jour))

X = longueur de bordure (km·bordure)

T = temps sec précédent l'événement pluvieux (jour)

3.2.2 Lessivage

Une fois les polluants accumulés sur la surface du bassin durant une période de temps sec, le deuxième phénomène entre en compte lorsque survient un événement de pluie. Les polluants sont alors soumis au lessivage. La quantité de polluants lessivés est fonction de la quantité disponible sur les surfaces, de l'intensité et la durée de l'événement. Le taux de lessivage est plus important au début et diminue par la suite jusqu'à ce que la quantité disponible soit épuisée. La quantité de polluants disponible est dépendante de la quantité restante non-lessivée de l'événement précédent et de l'accumulation faite durant la période de temps sec. L'équation exponentielle proposé dans le logiciel SWMM a été utilisée pour modéliser le lessivage des polluants (Huber et al., 1988). Cette équation a été préférée

puisque'elle était la mieux documentée au niveau de la valeur des paramètres d'entrée. Voici cette équation.

$$CW = PSHEDO (1 - e^{-Kt})$$

$$K = COEF (R)^{EXP}$$

Où CW = lessivage cumulé (kg)

PSHEDO = lessivage maximal ou accumulation disponible pour le lessivage (kg)

K = coefficient (1/jour)

T = temps durant l'événement pluvieux (jour)

COEF = coefficient de lessivage (1/mm)

R = coefficient de ruissellement (mm/jour)

EXP = exposant du lessivage (-)

3.2.3 Sédimentation

Depuis plusieurs années, des méthodes décrivant les processus de dépollution des eaux dans un bassin de rétention ont été développées. La dégradation des polluants est le plus souvent modélisée à l'aide d'un modèle dynamique de premier ordre de dégradation, nommé le modèle «k-c», prenant en compte le taux de dégradation «k» et la concentration «c» (Wong et al., 2006; Li et al., 2007). Par contre, Kadlec (2000) a déterminé que cette méthode était plutôt inefficace. La dégradation peut aussi être modélisée selon la théorie de la sédimentation développée par Hazen en 1904 (Li et al., 2007) ou avec les vitesses de sédimentation des différentes particules. La vitesse de sédimentation est fonction de la taille, de la densité spécifique et de la forme des particules contenues dans les eaux de ruissellement.

La distribution de la taille des matières en suspension a un effet significatif sur la dépollution des eaux (Li et al., 2007); c'est-à-dire que plus la surface spécifique d'une particule est importante, plus elle pourra adsorber de polluants sur sa surface. Donc, les

particules de petit diamètre adsorberont plus de polluants que les particules à plus gros diamètre.

Récemment, Chen et Adams (2006) ont dérivé un modèle de distribution des probabilités des concentration en polluants afin de modéliser la qualité des eaux autant sur le bassin versant qu'à la sortie d'un bassin de rétention (Behera et al., 2006; Chen et Adams, 2006-a; Chen et Adams, 2006-b; Chen et Adams, 2007). Ils ont démontré que ce modèle, offrant une alternative aux modèles de simulation en continu afin de modéliser l'accumulation et le lessivage, présentait des résultats comparables à ceux fournis par le logiciel SWMM. Papa et Adams (1996) ont développé des modèles statistiques afin d'étudier l'enlèvement des sédiments en fonction du temps de rétention, de la profondeur du bassin ainsi que de la vitesse de sédimentation des particules. Ils ont démontré qu'avec un temps de rétention augmentant de 0 à 24 heures, la sédimentation augmente de 30 % à 60%. Ces modèles se font en ajustant des distributions de probabilité à des caractéristiques de précipitation (Chen et Adams, 2006-b). Plusieurs études ont aussi tenté de développer des méthodes afin d'identifier un temps de rétention moyen requis afin de sédimenter un certain pourcentage de particules (Shammaa et al., 2002). Ils ont établi qu'un temps de rétention de plus de 24 heures permet une sédimentation d'au moins 60% de MES. Torres (2008) a étudié la décantation des matières en suspension contenues dans les eaux pluviales dans un bassin de retenue-décantation. Il a fait état des études des dernières années, qui déterminait la décantation des eaux dans ce type d'ouvrage par des expérimentations *in situ*, par des expérimentations en laboratoire et par des modélisations hydrodynamiques en conditions contrôlées pour des géométries simples. Il a proposé des contributions pour le suivi expérimental, à l'aide du protocole VICAS, afin de déterminer les vitesses de chute de sédiments, la caractérisation physico-chimique des sédiments décantés et l'exploitation des données en continu pour estimer les flux de sédiments à l'entrée et à la sortie de l'ouvrage. Il a aussi proposé la modélisation hydrodynamique 2D du bassin à l'aide du logiciel CFD Rubar 20 afin de d'évaluer la décantation des matières en suspension dans les bassins de rétention d'eaux pluviales.

En réalité, le processus de sédimentation se produit sous deux conditions : en état dynamique et en état de quiescence. Ces deux types de sédimentation influencent la vitesse de sédimentation des particules contenues dans les eaux pluviales. La sédimentation dynamique se produit durant l'événement de pluie et dépend des débits dans le bassin et du facteur d'efficacité de ce dernier face au court-circuitage. La sédimentation quiescente se produit lorsqu'il n'y a pas de débit dans le bassin, soit durant les périodes sèches et dépend de l'aire du bassin (Sear et Rayborn, 1993). C'est-à-dire que pour un même volume, plus l'aire du bassin est grande, plus la distance à parcourir pour une particule afin d'atteindre le fond est petite. Cette dernière est beaucoup plus efficace que la sédimentation en condition dynamique. L'équation utilisée afin de modéliser la sédimentation dans le bassin de rétention est tirée du document *Methodology for Analysis of Detention Basins for Control of Urban Runoff Quality* de l'EPA (Environmental Protection Agency, 1986), soit :

$$R = 1 - e^{-\left(\frac{v_s}{Q/A}\right)}$$

Où R = ratio d'enlèvement des MES (-)

V_s = vitesse de sédimentation (m/s)

Q = débit (m³/s)

A = aire de surface du bassin (m²)

La sédimentation est plus importante en condition de quiescence car le débit étant nul, la sédimentation est simplement fonction des forces verticales, soient la force de gravité et la force de traînée, et n'est pas gênée par le débit dans le bassin. C'est donc cette condition que l'on veut recréer avec la gestion des eaux du bassin par le contrôle en temps réel.

3.3 Règles de contrôle

Le contrôle de la vanne située à l'exutoire du bassin de rétention a été fait au moyen des règles de contrôle dans le logiciel EPA SWMM 5.0. Voici les diverses règles auxquelles la vanne obéit.

1. Retenir l'événement de pluie le plus longtemps possible dans le bassin de rétention en fermant la vanne
2. Lors de la prévision d'un prochain événement pluvieux :
 - 2.1 Si le volume disponible dans le bassin permet de retenir le volume d'eau prévu de l'événement pluvieux : laisser la vanne fermée et retenir l'événement. Revenir au numéro 1 par la suite.
 - 2.2 Si le volume disponible dans le bassin ne permet pas de retenir le volume d'eau de l'événement pluvieux et qu'il y a possibilité de surverse :
 - 2.2.1 Évacuer l'eau du bassin avant la venue de l'événement et refermer la vanne pour retenir l'événement. Revenir au numéro 1 par la suite.
 - 2.2.2 S'il est impossible de retenir tout l'événement avec la vanne fermée ou qu'il est impossible de vider le bassin : laisser la vanne ouverte. La rétention de l'événement se fera alors de façon traditionnelle. Fermer la vanne dès la fin de l'événement.

3.4 Scénarios

Afin de démontrer l'efficacité de la gestion des eaux par le contrôle en temps réel, quatre scénarios ont été comparés à un scénario de référence. Tous ces scénarios ont été soumis à une gestion avec et sans contrôle des eaux ruissellement, ce qui génère 8 groupes de résultats.

3.4.1 Scénario de référence

Le scénario de référence est composé du bassin versant muni d'un bassin de rétention à son exutoire conçu afin de retenir une pluie de récurrence 1 fois en 10 ans, qui est généralement le niveau de service des réseaux d'égouts pluviaux. La période de récurrence a été choisie

en fonction du fait que le bassin a été intégré au réseau pour contrôler la qualité des eaux et non les inondations. Le bassin présente une partie permanente et une partie de rétention, chacune d'une hauteur de 1 mètre : le niveau d'eau maximal est donc de 2 mètres. Lorsque le niveau d'eau atteint plus de 2 mètres, les eaux sont déversées directement au milieu récepteur par un déversoir. Au niveau maximal, l'aire du bassin est de 5329 m² et le volume de rétention de la partie non-permanente est de 4794 m³. Suivant les règles de conception suggérées par plusieurs guides de conception et de gestion des eaux pluviales (OMOE, 2003; AEP, 1999) le ratio longueur/largeur est de 4 :1 et les berges ont des pentes de 3H : 1V. L'exutoire du bassin de rétention, un orifice d'un diamètre de 600 mm, a été conçu afin de relâcher au maximum un débit de 15 L/s·ha, un faible débit permettant de réduire les possibilités d'érosion des berges et se rapprochant des conditions avant développement du bassin versant tributaire. Cette norme de rejet des eaux pluviales aux bassins de rétention est imposée par la Ville de Québec à tout nouveau développement afin de réduire l'impact de l'urbanisation sur le réseau hydrographique aval (Jolicoeur et al., 2008). Le bassin versant présente un coefficient de ruissellement des eaux de 22,1 %.

3.4.2 Scénarios de comparaison

Trois autres scénarios ont été conçus afin d'évaluer l'efficacité du contrôle en temps réel des eaux de ruissellement dans un bassin de rétention. Le premier scénario de comparaison testé consiste à réduire le volume du bassin de rétention pour contenir une pluie de récurrence de 1 fois en 2 ans tout en captant les eaux de ruissellement d'un bassin versant présentant un coefficient de ruissellement de 22,1%. Ce bassin est conçu selon les mêmes règles de l'art que le bassin 10 ans, à l'exception de son volume. L'aire à la hauteur maximale est de 2704 m² et le volume de rétention est alors de 2326 m³, soit près de la moitié de celui du bassin 10 ans. Les deuxième et troisième scénarios testés comprennent respectivement des bassins de rétention de récurrence 10 ans et 2 ans mais, cette fois, le coefficient de ruissellement a été augmenté à 50% afin de représenter des conditions de développement urbain plus dense. Le Tableau 2 présente un résumé des divers scénarios étudiés. Il est à noter que tous ces scénarios ont été étudiés avec et sans contrôle, ce qui porte le nombre de simulations à huit.

Tableau 2 : Caractéristiques des divers scénarios étudiés dans ce projet

Scénarios étudiés		
	Réccurrence du volume du bassin	Coefficient de ruissellement du bassin versant (%)
1	10 ans	22.1
2	2 ans	22.1
3	10 ans	50
4	2 ans	50

3.5 Séries pluviométriques

Les divers scénarios ont été simulés tout d'abord avec une série pluviométrique mensuelle : celle du mois de juillet 2006. Par la suite, le meilleur scénario sera soumis à trois séries pluviométriques estivales, celles des étés 2004, 2005 et 2006, afin d'évaluer le potentiel du concept durant différentes saisons estivales.

3.5.1 Série pluviométrique mensuelle

La série pluviométrique mensuelle utilisée est celle du mois de juillet 2006 qui compte 18 événements pluvieux. La Figure 2 présente cette série de pluies et le Tableau 3 présente les statistiques qui y sont reliées.

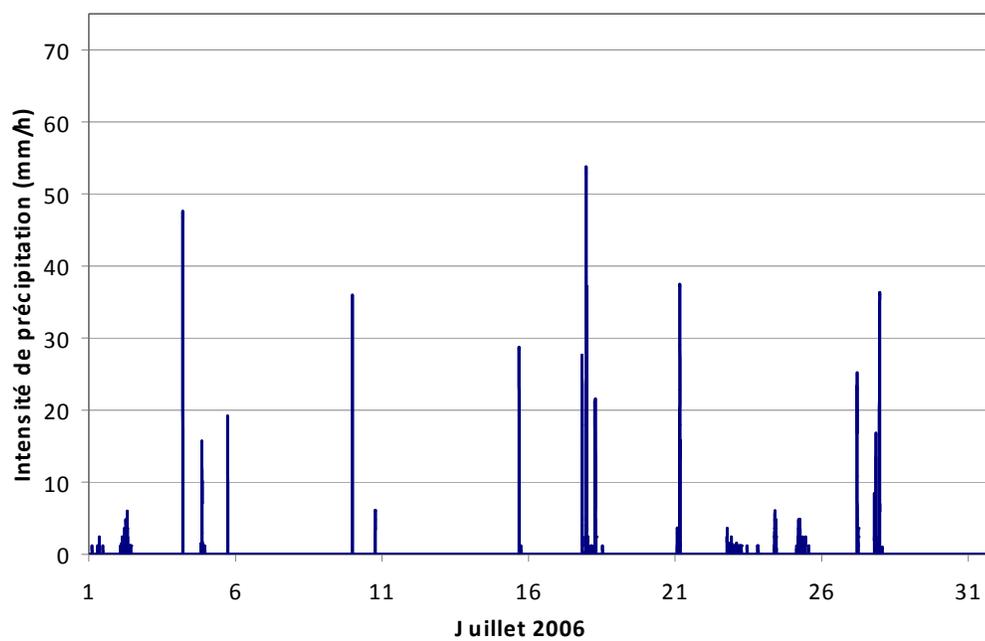


Figure 2 : Série pluviométrique du mois de juillet 2006

Tableau 3 : Statistiques des divers événements de pluie durant le mois de juillet 2006

Pluies de juillet 2006					
Date et heure de début de l'événement	Hauteur totale	Intensité moyenne	Intensité max. sur 5 min.	Durée	Temps sec avant la pluie
	(mm)	(mm/h)	(mm/h)	(jj hh:mm)	(jj hh:mm)
2006-07-01 02:35	0.9	0.1	2.4	08:55	11:20
2006-07-02 02:00	9.6	1.1	6.0	08:30	14:30
2006-07-04 04:55	7.3	29.2	46.8	00:15	01 18:25
2006-07-04 19:40	4.8	1.4	15.6	03:25	14:30
2006-07-05 17:40	2.0	8.0	19.2	00:15	18:35
2006-07-09 23:45	3.0	36.0	36.0	00:05	04 05:50
2006-07-10 18:25	1.2	4.8	6.0	00:15	18:35
2006-07-15 16:15	3.7	2.3	28.5	01:35	04 21:35
2006-07-17 19:45	6.3	8.4	27.6	00:45	02 01:55
2006-07-17 23:00	23.5	1.7	52.8	13:35	02 05:10
2006-07-21 01:35	13.8	4.9	37.2	02:50	02 13:00
2006-07-22 18:30	5.8	0.5	3.6	11:45	01 14:05
2006-07-23 10:50	0.1	1.2	1.2	00:05	04:35
2006-07-23 19:30	0.3	0.5	1.2	00:35	08:35
2006-07-24 09:00	5.2	2.9	6.0	01:50	12:55
2006-07-25 03:25	6.7	0.6	4.8	10:05	16:35
2006-07-27 04:50	10.0	8.0	25.2	01:15	01 15:20
2006-07-27 19:10	12.0	1.9	36.0	06:25	13:05
Total	116.22	---	---	03 00:25	26 12:35
Moyenne	---	---	---	05:07	01 11:21
Max	23.5	---	52.80	13:55	04 21:35

Il est tombé au total 116,22 mm de pluie durant le mois de juillet 2006. La pluie la plus longue est celle du 17 juillet, d'une durée de 13h35min, soit près de 9h de plus que la moyenne de ce mois. Cet événement est aussi le plus intense et compte la plus importante hauteur d'eau tombée. La majorité des autres pluies présentent de faibles récurrences, d'une durée moyenne de 5 heures. L'événement du 15 juillet présente la période de temps sec précédent l'événement la plus importante, soit plus de 3 jours de plus que la moyenne enregistrée durant ce mois. Toutes ces pluies étant différentes, cette série donnera un bon portrait du comportement de la pollution des eaux de ruissellement en milieu urbain.

3.5.2 Séries pluviométriques estivales

Une fois les divers scénarios simulés avec la série pluviométrique du mois de juillet 2006, des bilans estivaux des masses en sédiments dans le bassin seront faits à partir des séries pluviométriques des étés 2004 à 2006. Ces séries s'étendent du 15 mai au 15 septembre de chaque année, période critique pour le contrôle des débordements au Québec puisque c'est durant ces périodes que les orages peuvent provoquer des déversements importants au milieu récepteur. Ces bilans serviront à analyser le comportement de la sédimentation du bassin géré avec le contrôle en temps réel et à quantifier les masses sédimentées et rejetées lors de la période estivale. Les Figures 3 à 5 présentent les séries pluviométriques utilisées pour simuler les bilans estivaux des années 2004 à 2006 respectivement. Le Tableau 4 présente le résumé des statistiques de ces séries.

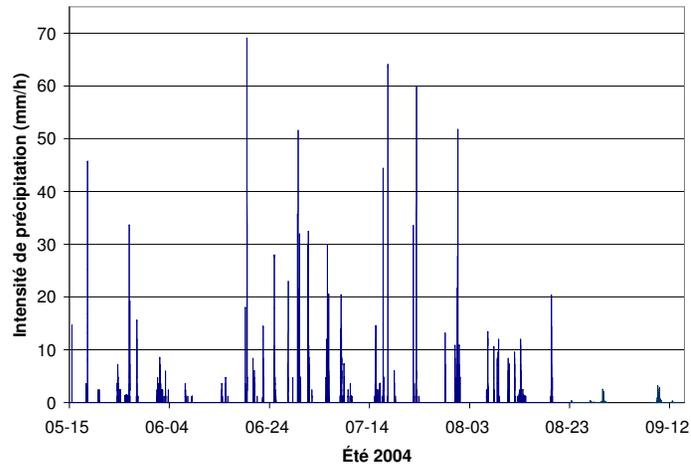


Figure 3 : Série pluviométrique de l'été 2004

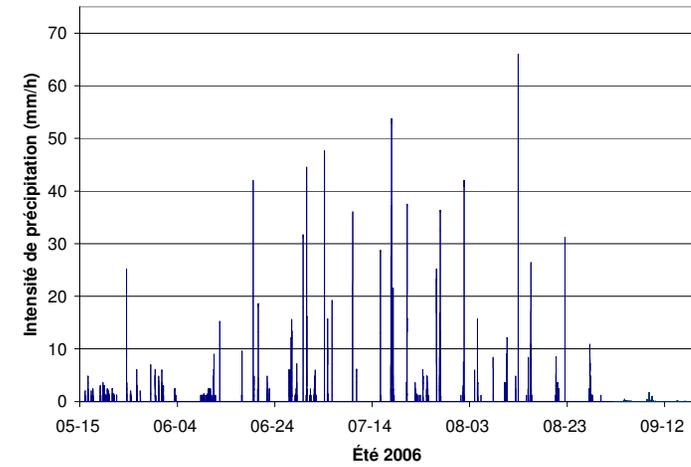


Figure 4 : Série pluviométrique de l'été 2006

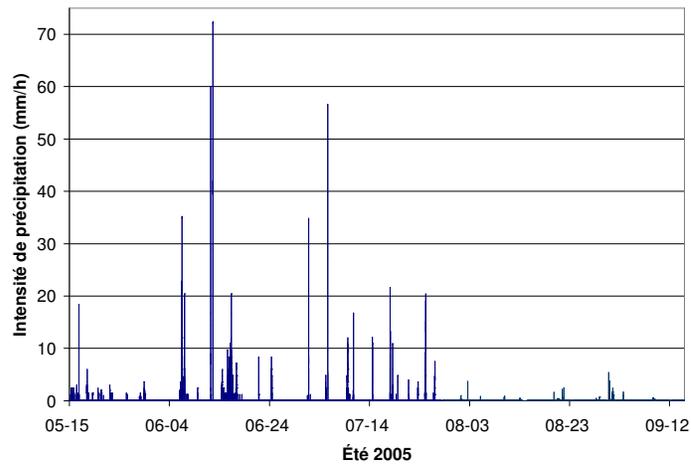


Figure 5 : Série pluviométrique de l'été 2005

Tableau 4 : Statistiques de la pluviométrie durant les saisons estivales 2004 à 2006

Saison	Hauteur totale	Intensité max. sur 5 min.	Durée moyenne	Durée max.	Temps sec moyen	Temps sec max.
	(mm)	(mm/h)	(hh:mm)	(jj hh:mm)	(jj hh:mm)	(jj hh:mm)
Été 2004	605.95	5.7	02:30	01 05:15	01 00:43	10 02:55
Été 2005	438.76	6.0	01:54	00 15:35	00 19:36	06 04:30
Été 2006	363.31	66.0	04:00	00 20:10	01 05:55	05 03:35

Ces trois saisons sont bien différentes. L'été 2004 a enregistré deux fois plus d'eau que l'été 2006, qui est la plus sèche. Les étés 2004 et 2005 ont des intensités maximales très faibles, tandis que l'été 2006 présente une intensité maximale beaucoup plus importante. L'été 2004 présente l'événement de pluie le plus long, soit 1 journée 5 heures et 15 minutes, qui est nettement plus long que les autres. L'été 2004 présente le temps sec entre deux événements le plus important, soit 10 jours 2 heures et 55 minutes, ce qui est nettement supérieure à la moyenne des autres saisons.

4. Résultats

Les résultats des simulations du mois de juillet 2006 pour le scénario de référence et les scénarios testés seront présentés afin d'étudier l'effet des diverses configurations sur l'efficacité de la sédimentation. Par la suite, des bilans estivaux des étés 2004 à 2006 seront présentés afin d'étudier les quantités rejetées et emmagasinées durant ces périodes. Le potentiel du concept est démontré durant la période estivale puisque c'est durant cette période qu'il y a des périodes d'étiage en cours d'eau, que les écosystèmes sont actifs et que leur protection doit être accrue.

4.1 Scénario de référence

Le bassin versant présentant 22,1% de ruissellement soumis à la série pluviométrique de juillet 2006 a généré, à l'entrée du bassin de rétention conçu pour une récurrence 10 ans, l'hydrogramme et le pollutogramme présentés aux Figures 6 et 7.

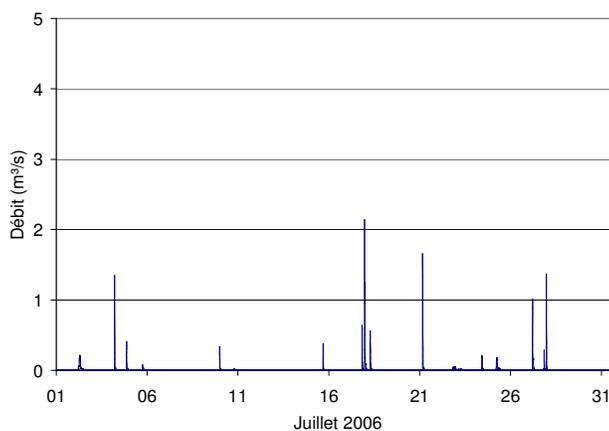


Figure 6 : Débit à l'entrée du bassin de rétention pour le bassin versant présentant 22,1% de coefficient de ruissellement

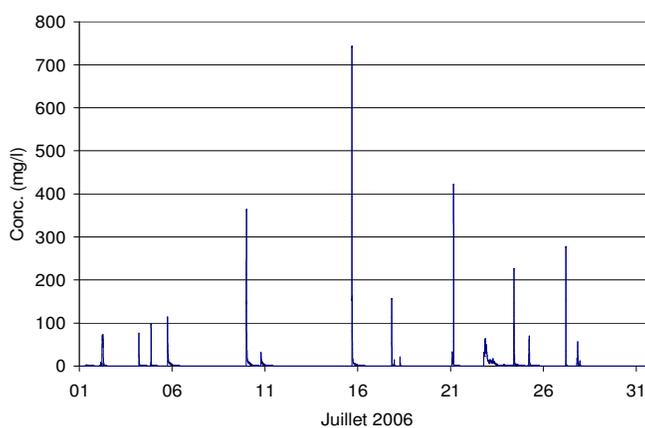


Figure 7 : Concentration en MES à l'entrée du bassin de rétention pour le bassin versant présentant 22,1% de coefficient de ruissellement

La série pluviométrique du mois de juillet 2006 a généré 19 500 m³ de ruissellement sur le bassin versant. Le débit maximal, observé durant l'événement du 17 juillet, a été de 2,14 m³/s. Pour les concentrations en MES à l'entrée du bassin de rétention, elles sont très

différentes, dues à la diversité des événements pluviométriques. La concentration maximale, observée durant l'événement du 15 juillet, a été de 765 mg/l. Cette pluie a eu une hauteur d'eau totale faible (3,7 mm) précédée d'une période de temps sec le plus long de tout le mois (4 jours 21 heures 35 minutes), ce qui explique la forte concentration en MES. Il est entré au total 642 kg de sédiments dans le bassin de rétention durant cet été.

Selon les règles de contrôle établies précédemment, la vanne située à l'exutoire du bassin de rétention a été gérée de manière à maximiser le temps de rétention des eaux. Les Figures 8 à 10 présentent les hauteurs d'eau dans le bassin de rétention pour une gestion avec le contrôle de la vanne et une gestion sans contrôle de la vanne et les Figures 10 et 11, les débits sortant du bassin de rétention. Il est à noter que le bassin comporte une partie permanente d'une hauteur de 1 mètre.

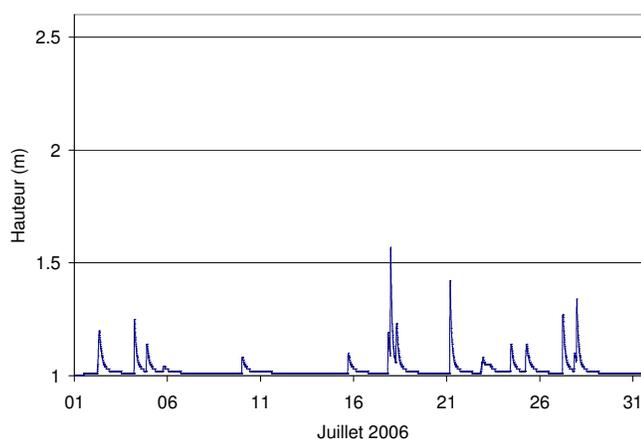


Figure 8 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention sans contrôle pour le scénario de référence

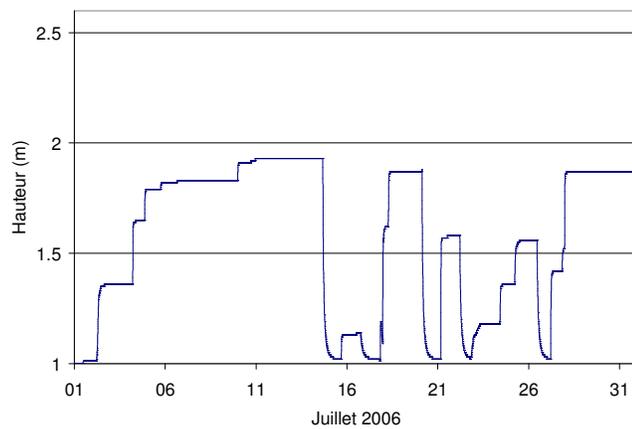


Figure 9 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention avec contrôle pour le scénario de référence

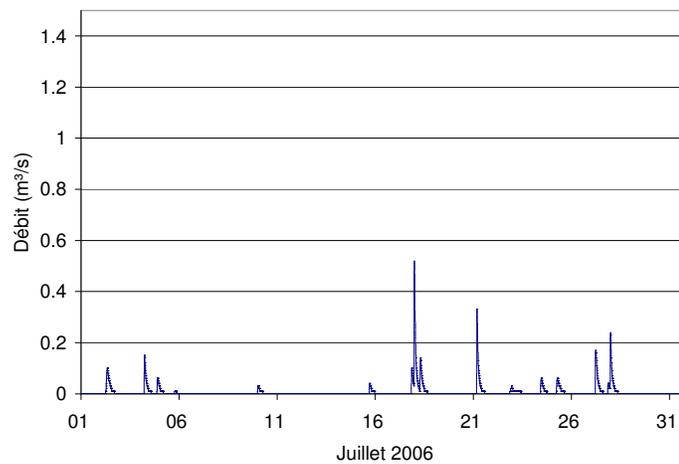


Figure 10 : Débit sortant du bassin de rétention sans contrôle pour le scénario de référence

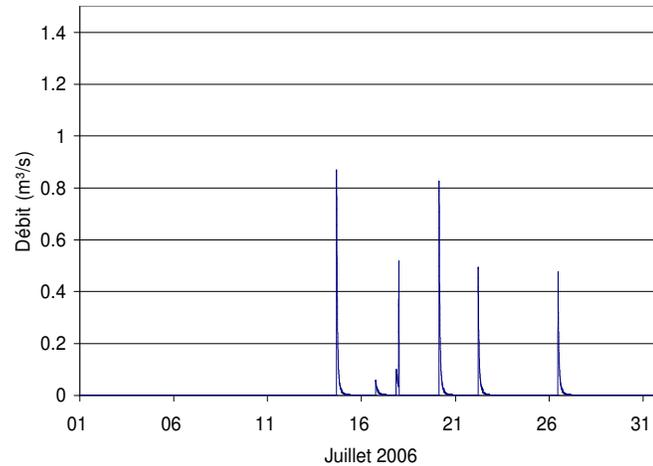


Figure 11 : Débit sortant du bassin de rétention avec contrôle pour le scénario de référence

On remarque facilement qu'avec le contrôle de la vanne, les niveaux sont beaucoup plus hauts et la majeure partie du volume du bassin est utilisée. Dans les deux cas, il n'y a eu aucune surverse des eaux vers le cours d'eau récepteur. On remarque sur la Figure 11 que la vanne est restée fermée durant la première moitié du mois, permettant d'accumuler les eaux pendant plusieurs jours, jusqu'à ce que le niveau maximal soit presque atteint. En connaissant les prévisions, il a été évalué que le bassin déborderait au prochain événement. Ce dernier a donc été vidé afin de recueillir le prochain événement. Il a été de même pour le reste du mois; le bassin a été rempli jusqu'à ce qu'il soit évalué que le prochain événement le ferait déborder. Il a ensuite été vidé afin de recevoir le prochain événement. Il faut toute de fois mentionner qu'il est possible que les eaux du bassin de rétention avec contrôle développent certains problèmes liés aux eaux stagnantes, telles des mauvaises odeurs. En comparant cette figure avec celle du bassin sans contrôle, on remarque que le temps de rétention est nettement augmenté. En fait, tous les événements ont vu leur temps de rétention augmenter sauf une petite portion des événements du 17 juillet qu'il n'aurait pas été possible de retenir sans faire déverser les eaux. Le volume total de ruissellement était plus important que le volume du bassin, voici pourquoi il n'a pas pu être retenu avec la vanne fermée. Pour ce qui est des débits sortants, on remarque que ceux du bassin de rétention avec contrôle sont beaucoup plus importants que ceux du bassin de rétention sans contrôle. Ceci est dû au fait que les niveaux d'eau dans le bassin contrôlé sont beaucoup

plus hauts que ceux dans le bassin non-contrôlé, ce qui vient créer une charge d'eau plus importante sur l'orifice, provoquant ainsi un débit plus grand. Ceci pourrait être problématique sur les écosystèmes en aval en créant de l'érosion. Par contre, l'orifice du bassin de rétention a été conçu afin de relâcher un débit d'une valeur maximale de 15 L/s-ha, qui a été jugé comme limitant l'effet de l'urbanisation sur le réseau hydrographique (Jolicoeur et al., 2008). Une étude plus approfondie sur les effets des rejets d'un bassin contrôlé sur le cours d'eau devrait être faite ultérieurement.

Les Figures 12 et 13 présentent les concentrations en matières en suspension qui ont été rejetées du bassin de rétention. On peut remarquer l'effet du contrôle sur le rejet des matières en suspension dans le milieu récepteur. En emmagasinant les eaux durant de longues périodes, le contrôle de la vanne du bassin de rétention a réduit le nombre de rejets de façon significative et ainsi la quantité rejetée au milieu récepteur. On remarque que le rejet du 17 juillet est identique pour le bassin contrôlé et non-contrôlé. Ce rejet correspond à la portion de l'événement du 17 juillet qui n'a pas pu voir son temps de rétention augmenter afin d'éviter la surverse. Au total, 7,48 kg ont été rejetés du bassin sans contrôle et 0,77 kg du bassin contrôlé, réduisant ainsi la charge d'un facteur de presque 10 fois.

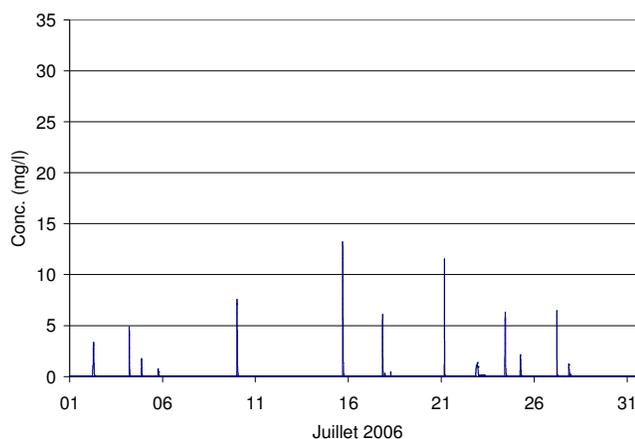


Figure 12 : Concentration en MES à la sortie du bassin de rétention sans contrôle pour le scénario de référence

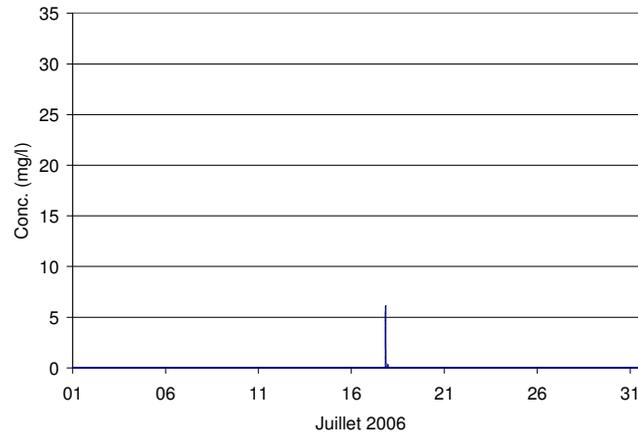


Figure 13 : Concentration en MES à la sortie du bassin de rétention avec contrôle pour le scénario de référence

4.2 Scénario 2

Ce premier scénario est celui du bassin de rétention conçu pour une récurrence de 2 ans, au lieu d'une récurrence de 10 ans, recevant les eaux du bassin versant de 22,1% de ruissellement. Les données d'entrée de débits et de concentrations en matières en suspension sont les mêmes que pour le scénario de référence. Les Figures 14 et 15 présentent les hauteurs d'eau dans ce bassin de rétention qui a été géré avec et sans contrôle.

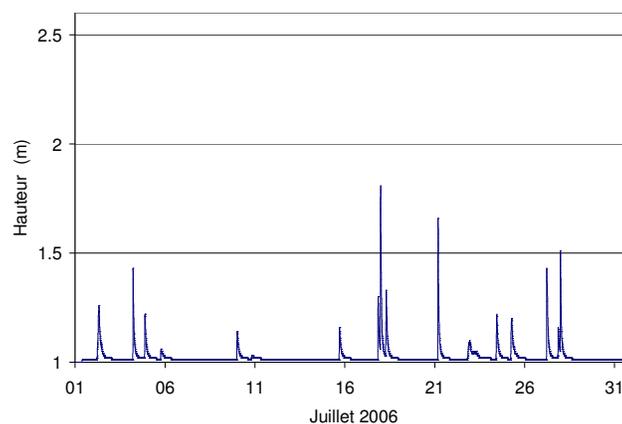


Figure 14 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention sans contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 22,1% de coefficient de ruissellement

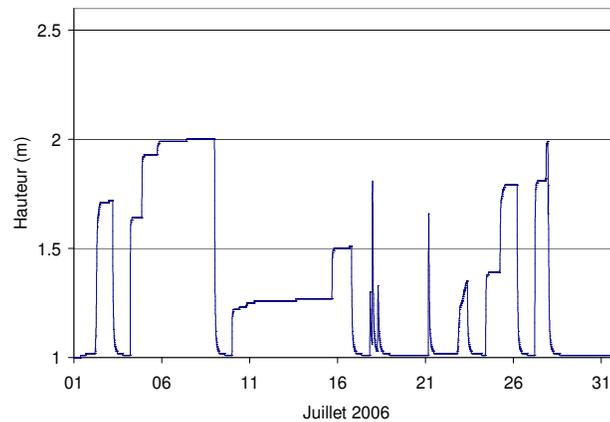


Figure 15 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention avec contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 22,1% de coefficient de ruissellement.

Sur ces figures, on remarque que le contrôle a le même effet qu'avec le scénario précédent : il permet de retenir les événements de pluies plus longtemps dans le bassin de rétention. Par contre, on remarque que le bassin de rétention ne permet pas de retenir plus longtemps tous les événements avec les règles simples de contrôle utilisées ici. Les événements du 17 et du 21 juillet n'ont pu être retenus avec la vanne fermée sans déverser, la vanne a donc été ouverte puisque le volume disponible était inférieur au volume d'eau ruisselé durant l'événement. Seuls ces deux événements n'ont pas vu leur temps de rétention augmenter. Tel qu'attendu, on remarque qu'il retient les eaux, en moyenne, moins longtemps que le bassin du scénario précédent, dû au volume du nouveau bassin qui est près de la moitié de celui du scénario précédent. Les Figures 16 et 17 présentent les concentrations en MES rejetées du bassin de rétention vers le milieu récepteur.

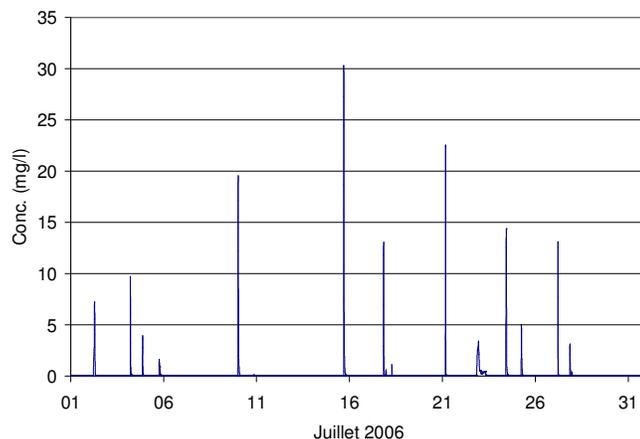


Figure 16 : Concentration en MES à la sortie du bassin de rétention sans contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 22,1% de coefficient de ruissellement

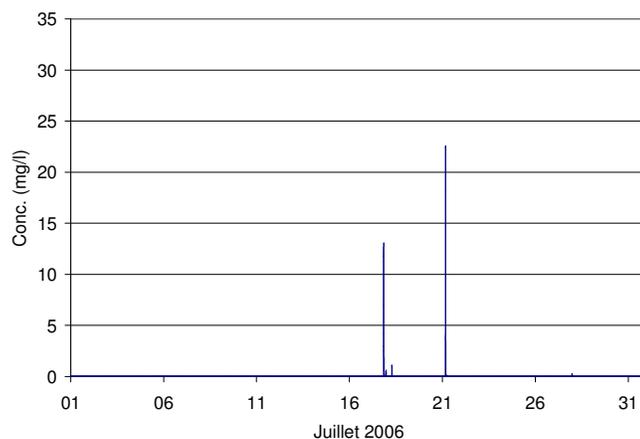


Figure 17 : Concentration en MES à la sortie du bassin de rétention avec contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 22,1% de coefficient de ruissellement

Encore dans ce cas, le bassin contrôlé permet de réduire la fréquence des rejets et, par le fait même, la quantité de matières en suspension rejetées dans le milieu récepteur. Le bassin non contrôlé a rejeté 26,63 kg de MES et le bassin contrôlé 7,10 kg, réduisant la charge totale d'un facteur de 3,75. On remarque aussi que les deux événements où il y a un rejet de MES sont les événements qui n'ont pas pu être contrôlés.

4.3 Scénario 3

Le prochain scénario est celui du bassin de rétention conçu pour une récurrence de 10 ans recevant les eaux de ruissellement du bassin versant de 50% de coefficient de ruissellement. Les Figures 18 et 19 présentent l'hydrogramme et le pollutogramme d'entrée dans le bassin de rétention.

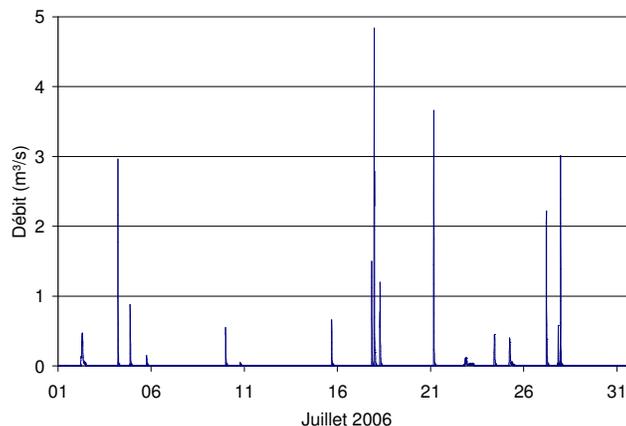


Figure 18 : Débit à l'entrée du bassin de rétention pour le bassin versant de 50% de ruissellement

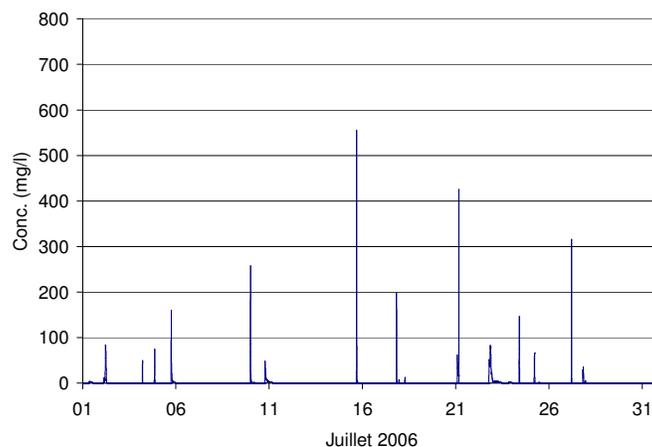


Figure 19 : Concentration en MES à l'entrée du bassin de rétention pour le bassin versant de 50% de ruissellement

Le pourcentage d'imperméabilité ayant augmenté afin de reproduire des conditions de développement résidentiel plus importantes que celles du scénario de référence, la quantité d'eau ruisselée est alors plus importante. Elle est de 43 980 m³, soit plus du double du

volume du scénario de référence. Quant aux matières en suspension, les concentrations sont inférieures puisque les MES sont diluées dans un volume d'eau plus grand pour une même quantité. Les Figures 20 et 21 présentent les hauteurs d'eau dans le bassin de rétention contrôlé et non-contrôlé.

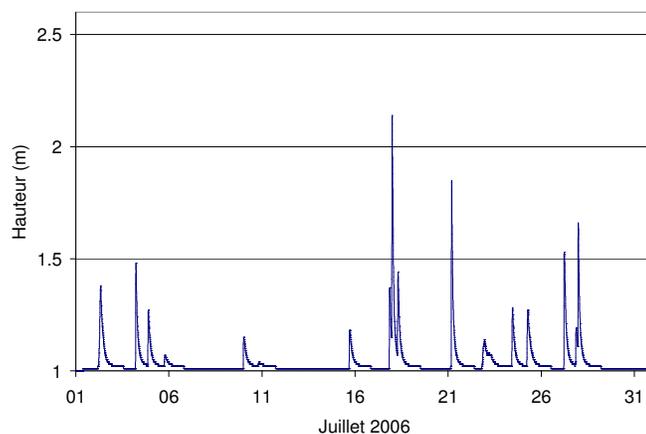


Figure 20 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention sans contrôle pour le scénario du bassin 10 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement

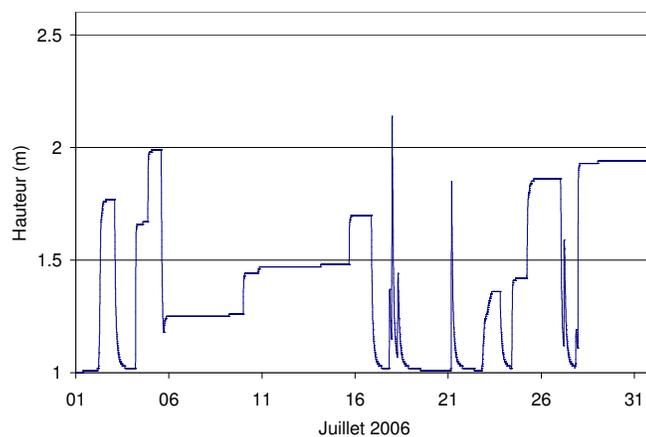


Figure 21 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention avec contrôle pour le scénario du bassin 10 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement

Pour ce scénario, le volume d'eau arrivant au bassin de rétention est plus important, donc le bassin de rétention se remplit plus rapidement. Il est donc plus difficile de retenir plus longtemps les eaux que dans le cas du scénario de référence : l'événement du 17 juillet a

causé une surverse des eaux dans le bassin non-contrôlé. Le volume total de cet événement est supérieur au volume de rétention maximal du bassin, donc le surplus déverse inévitablement. Tout de même, la majorité des événements ont été contrôlés, seuls les événements du 17 et du 21 juillet ne l'ont pas été. De plus, une partie des événements du 27 juillet n'a pas été contrôlée afin d'empêcher la surverse des eaux. On remarque que, durant la période du 6 au 16 juillet, la vanne est toujours restée fermée permettant aux événements de s'accumuler et aux particules de se sédimer durant plusieurs jours. Les Figures 22 et 23 présentent les concentrations en MES rejetés au cours d'eau récepteur.

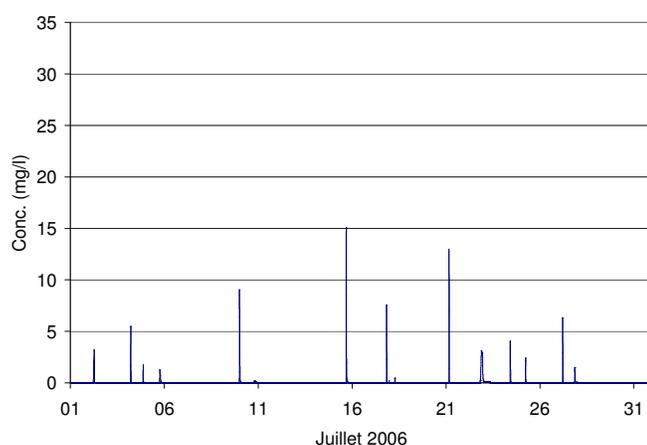


Figure 22 : Concentrations en MES à la sortie du bassin de rétention sans contrôle pour le scénario du bassin 10 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement

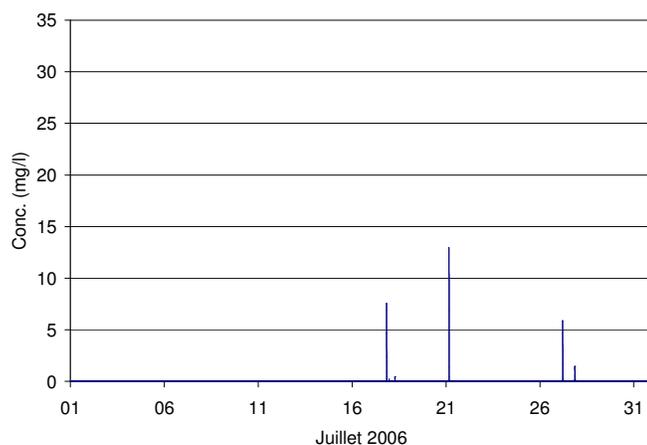


Figure 23 : Concentrations en MES à la sortie du bassin de rétention avec contrôle pour le scénario du bassin 10 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement

Encore une fois, le bassin contrôlé permet de rejeter des matières en suspension moins fréquemment et en moins grande quantité. Les rejets en MES correspondent aux événements qui n'ont pas pu voir leur temps de rétention augmenter par la fermeture de la vanne. Le bassin contrôlé a rejeté 9,40 kg et le bassin contrôlé, 4,08 kg, réduisant la charge d'un facteur de 2,3.

4.4 Scénario 4

Le dernier scénario est celui du bassin de rétention de récurrence 2 ans recevant les eaux de ruissellement du bassin versant de 50% de ruissellement. Les données d'entrée sont les mêmes que pour le scénario précédent. Les Figures 24 et 25 présentent les hauteurs d'eau dans le bassin de rétention pour ce scénario.

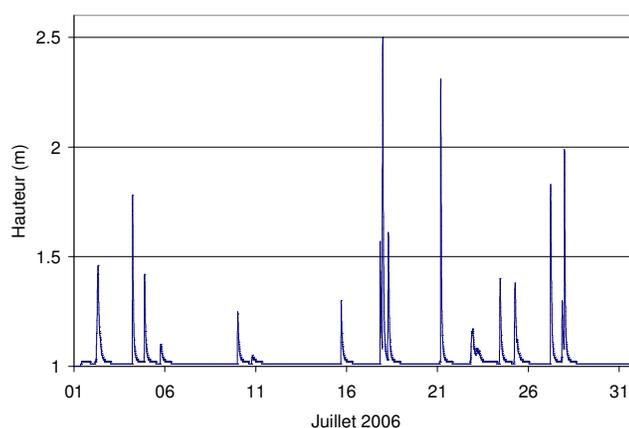


Figure 24 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention pour le scénario du bassin sans contrôle 2 ans – 50 % de ruissellement

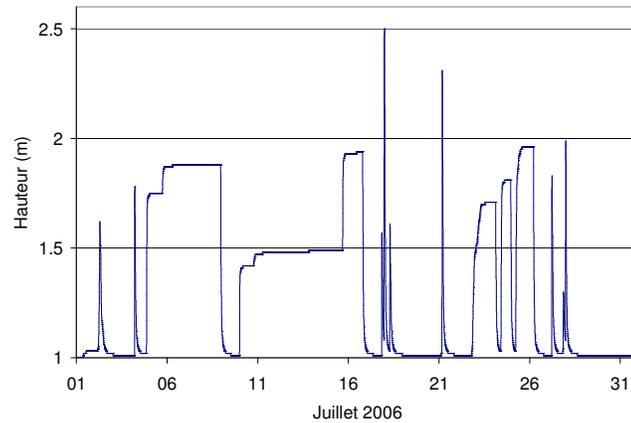


Figure 25 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention pour le scénario du bassin avec contrôle 2 ans – 50 % de ruissellement

Ce scénario est le plus difficile à gérer sans surverse puisque le ratio entre le volume d'eau ruisselé et le volume de rétention est le plus grand. Tout de même, la gestion de la vanne augmente le temps de rétention des eaux dans le bassin. Pour ce scénario, il y a eu deux surverses. Les événements qui ont causé des surverses sont ceux du 17 et du 21 juillet. Dans le cas du bassin de rétention contrôlé, on remarque ici encore que les temps de rétention sont augmentés pour la majorité des événements. Par contre, il y a beaucoup plus d'événements dont le temps de rétention n'a pas été augmenté à comparer aux autres scénarios. Les Figures 26 et 27 présentent les résultats des concentrations en MES à la sortie du bassin de rétention pour ce scénario.

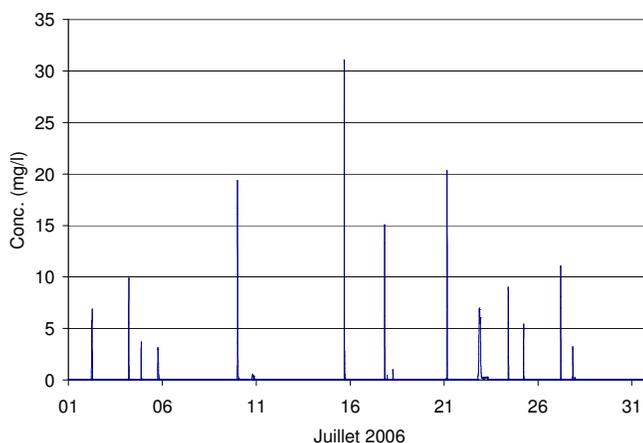


Figure 26 : Concentrations en MES à la sortie du bassin de rétention sans contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement

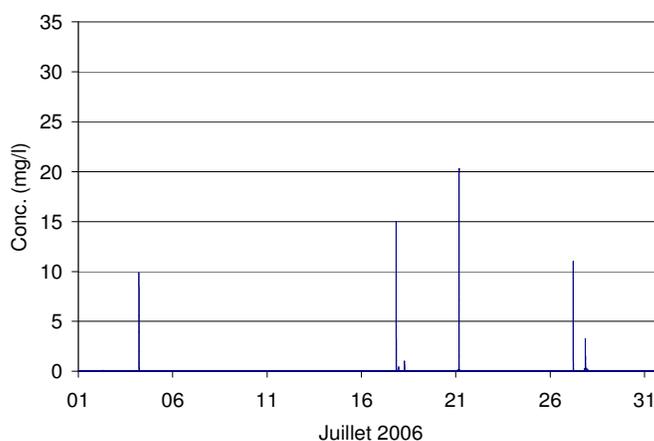


Figure 27 : Concentrations en MES à la sortie du bassin de rétention avec contrôle pour le scénario du bassin 2 ans – Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement

Comme dans tous les scénarios, le contrôle de la vanne a permis de réduire la fréquence et les charges totales de rejet en MES. Le bassin non-contrôlé a rejeté 32,21 kg et le bassin contrôlé 14,78 kg réduisant les charges totales d'un facteur de 2,18.

Dans tous les scénarios présentés, le contrôle des eaux a permis d'augmenter la sédimentation dans le bassin de rétention, donc de diminuer les rejets de MES et des polluants qui y sont adsorbés dans le cours d'eau récepteur. Les charges totales rejetées sont réduites d'un facteur 2,18 pour le 4^e scénario.

4.5 Discussion sur l'efficacité du contrôle en temps réel

Les résultats présentés précédemment ont démontré l'efficacité de la gestion du bassin de rétention par le contrôle en temps réel, pour réduire les charges rejetées dans le milieu récepteur. Les figures 28 à 31 présentent un récapitulatif des quantités totales en MES qui sont sorties des bassins de rétention pour les différents scénarios, avec ou sans contrôle et en fonction des 6 classes de diamètres des MES dans les eaux de ruissellement, ainsi que le pourcentage supplémentaire de particules sédimentées.

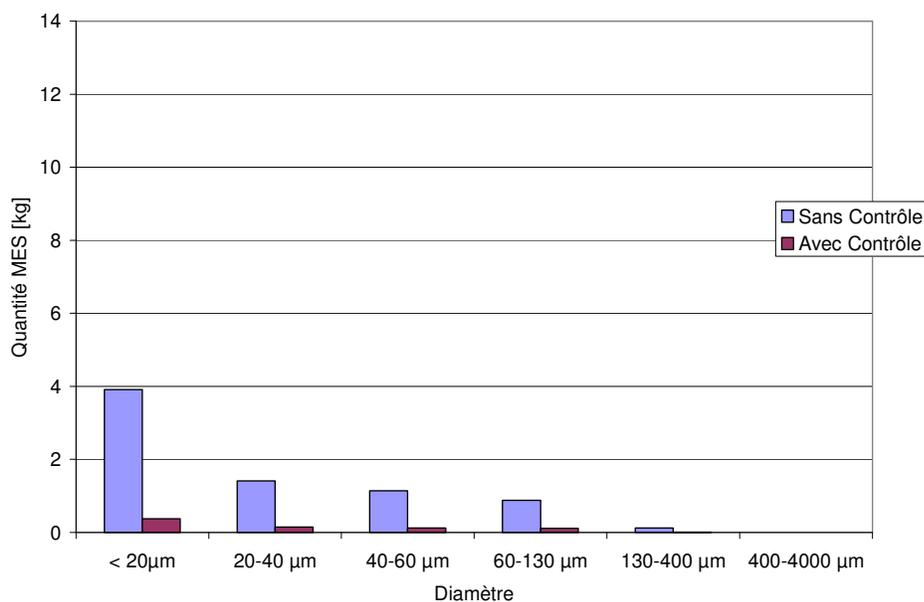


Figure 28 : Quantité en MES sortant du bassin de rétention par l'orifice pour le scénario de référence

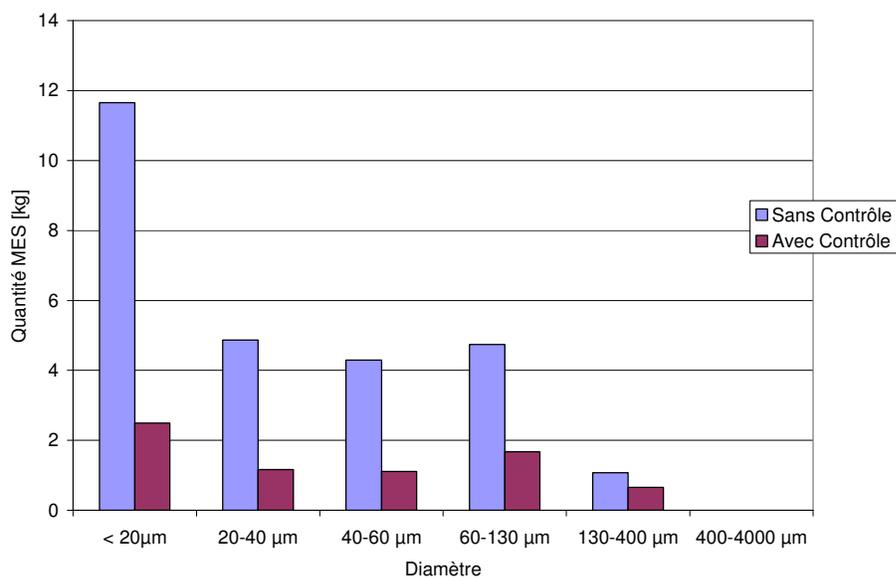


Figure 29 : Quantité en MES sortant du bassin de rétention par l’orifice pour le scénario du bassin avec contrôle 2 ans – 22,1 % de ruissellement

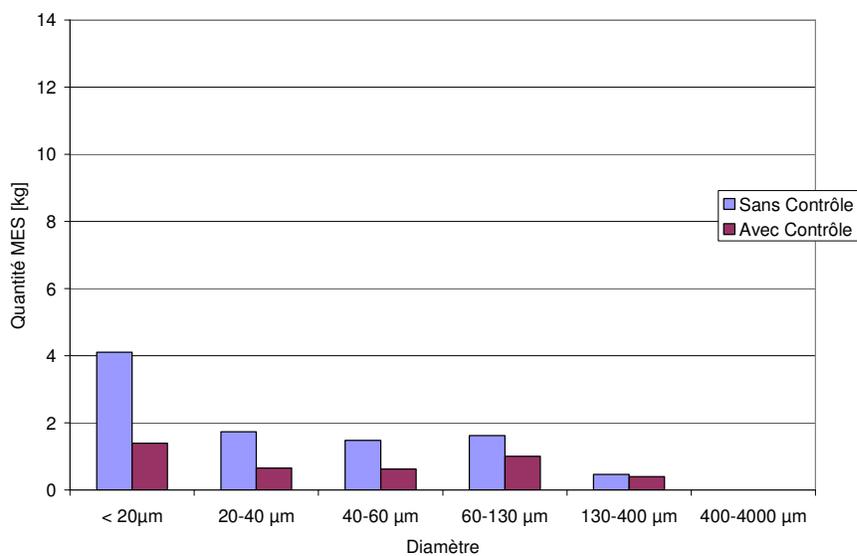


Figure 30 : Quantité en MES sortant du bassin de rétention par l’orifice pour le scénario du bassin avec contrôle 10 ans – 50 % de ruissellement

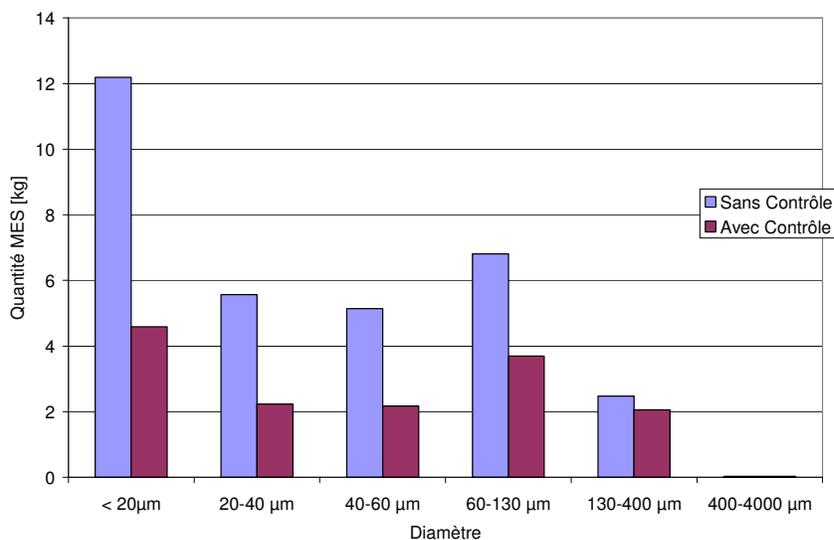


Figure 31 : Quantité en MES sortant du bassin de rétention par l’orifice pour le scénario du bassin avec contrôle 2 ans – 50 % de ruissellement

On remarque, à partir de ces figures, que le contrôle en temps réel augmente l’efficacité de la sédimentation dans le bassin de rétention. En regardant les résultats en fonction des diamètres des particules, on remarque que les résultats avec ou sans contrôle ne sont pas différents pour les particules de diamètre supérieur à 400 µm. Ces particules sédimentent très rapidement : l’augmentation du temps de résidence des eaux n’a donc pas d’effet significatif sur elles. Plus le diamètre des particules est petit, plus elles peuvent être en quantité importante dans les rejets puisqu’elles prennent un plus long temps à sédimer. L’effet du contrôle du bassin de rétention permet alors de diminuer la quantité rejetée, et ce, pour tous les scénarios. Il est à noter que ce sont les particules de diamètres inférieurs à 60µm sur lesquels s’adsorbent près de 80% des sédiments (Rivard, 1998; Wright et McLaughlin, 2001). Le Tableau 5 présente les résultats des scénarios en fonction de leur performance pour les deux types de coefficient de ruissellement.

Tableau 5 : Récapitulatif des quantités en MES sortant des bassins de rétention par l'orifice selon les différents scénarios

MES à la sortie du bassin de rétention par l'orifice		
	Quantité (kg)	(%) MES totales
Bassin versant avec 22,1% de coefficient de ruissellement		
Sans bassin	642.00	100.00
Bassin 2 ans sans contrôle	26.63	4.32
Bassin 10 ans sans contrôle	7.48	1.17
Bassin 2 ans avec contrôle	7.10	1.15
Bassin 10 ans avec contrôle	0.77	0.12
Bassin versant avec 50% de coefficient de ruissellement		
Sans bassin	686.54	100.00
Bassin 2 ans sans contrôle	32.21	4.69
Bassin 10 ans sans contrôle	9.40	1.37
Bassin 2 ans avec contrôle	14.78	2.15
Bassin 10 ans avec contrôle	4.08	0.59

On remarque avec ce tableau que le bassin de rétention sans contrôle fait déjà diminuer d'une bonne quantité les matières en suspension. En y ajoutant le contrôle en temps réel de la vanne, les quantités totales de MES sont diminuées davantage, permettant plus particulièrement aux particules plus fines de sédimenter. La charge en polluants rejetés est donc diminuée puisque c'est sur celles-ci qu'ils s'adsorbent. On remarque aussi que pour un même bassin, l'augmentation de l'imperméabilité fait augmenter la quantité de MES rejetées. De plus, le bassin avec le plus grand volume permet une plus grande sédimentation que le bassin de plus petit volume. Même si le bassin 2 ans offre des performances toujours inférieures au bassin de récurrence 10 ans, tous les scénarios avec contrôle sont meilleurs que leur équivalent sans contrôle pour sédimenter les matières en suspension, donc ils apportent tous un effet de traitement des polluants supérieur au bassin de rétention traditionnel non-contrôlé. Tel qu'attendu, pour chacun des niveaux d'imperméabilité, le bassin de récurrence 10 ans avec contrôle offre la meilleure efficacité de sédimentation.

4.6 Bilans estivaux

Des bilans estivaux seront présentés dans cette section. Ces bilans ont été faits à partir du scénario de référence en simulant les séries pluviométriques des étés 2004 à 2006.

4.6.1 Été 2004

Les Figures 32 et 33 présentent les données d'entrée dans le bassin de rétention, soient les débits et les concentrations en matières en suspension. À l'été 2004, il a ruisselé 108 160 m³ et il est entré 3021 kg de sédiments dans le bassin de rétention.

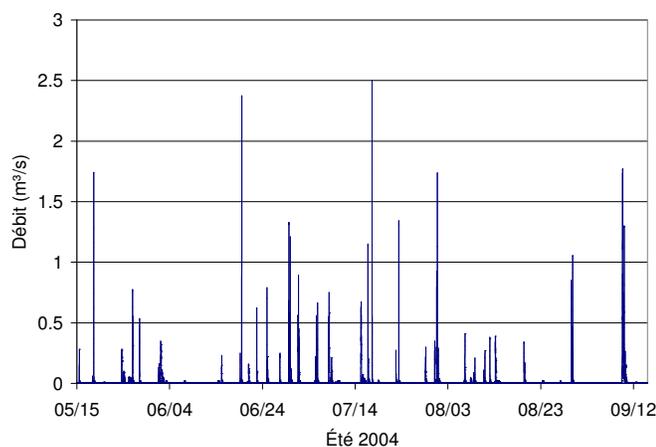


Figure 32 : Débit entrant dans le bassin de rétention durant l'été 2004

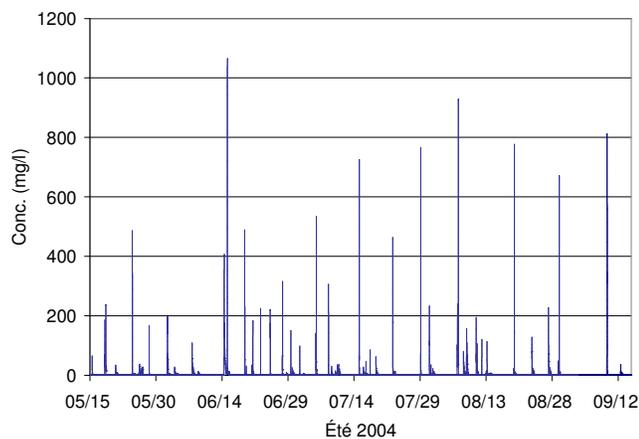


Figure 33 : Concentrations en MES à l'entrée du bassin de rétention durant l'été 2004

Comme précédemment, le scénario de référence a été soumis au contrôle de la vanne en fonction des prévisions météorologiques dans le but d'augmenter le temps de rétention des eaux. Les Figures 34 à 37 présentent les hauteurs d'eau dans le bassin et les concentrations rejetées pour le bassin contrôlé et non-contrôlé.

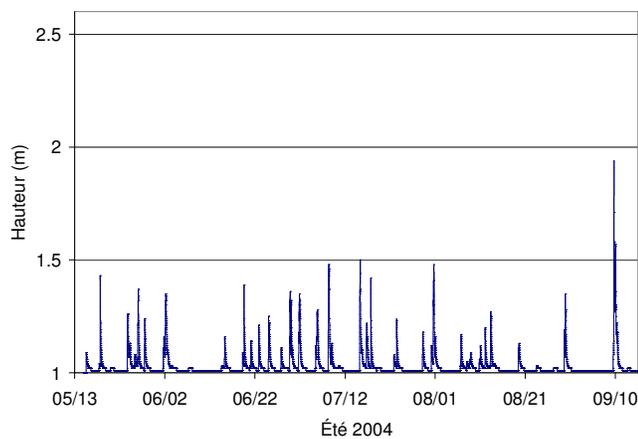


Figure 34 : Hauteur d'eau dans le bassin sans contrôle durant l'été 2004

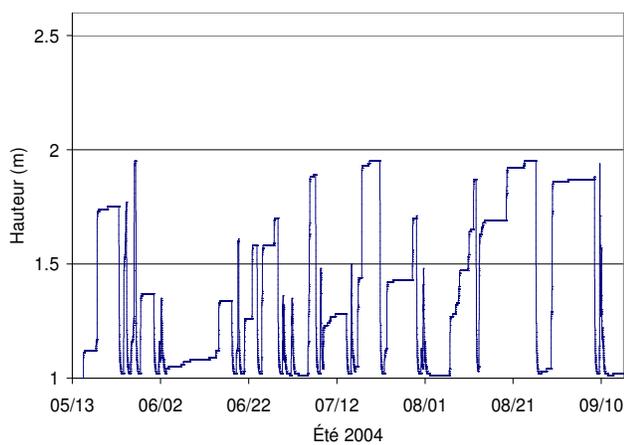


Figure 35 : Hauteur d'eau dans le bassin avec contrôle durant l'été 2004

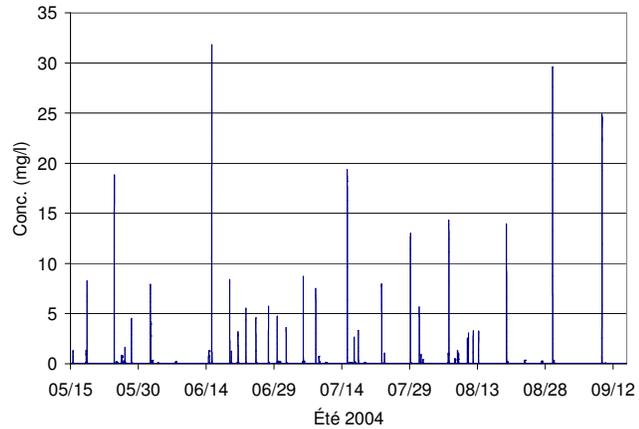


Figure 36 : Concentration en MES dans le bassin sans contrôle durant l'été 2004

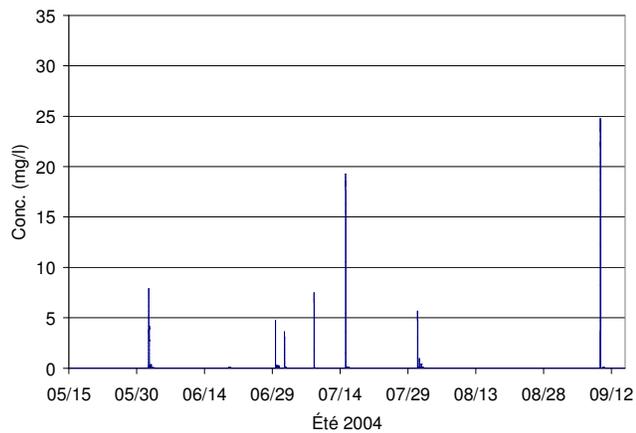


Figure 37 : Concentration en MES dans le bassin sans contrôle durant l'été 2004

L'été 2004 a connu la quantité de précipitations la plus élevée des trois séries estivales et les événements de pluie étaient de récurrences faibles, apportant ainsi des débits plus faibles, mais plus fréquents. Il n'y a eu aucune surverse et le temps de rétention des eaux a été augmenté pour presque tous les événements. Les charges en MES rejetées ont donc été diminuées. Quelques événements seulement n'ont pas vu leur temps de résidence augmenter. Le bassin non-contrôlé a rejeté 42,93 kg et le bassin contrôlé 16,59 kg, diminuant la charge totale rejetée au cours d'eau d'un facteur de 2,59.

4.6.2 Été 2005

La série pluviométrique de l'été 2005 a été simulée avec contrôle de la vanne du bassin de rétention de la même manière que l'été 2004. La quantité de précipitations totale tombée était entre celles des étés 2004 et 2006 et les événements de pluie étaient de faibles récurrences. Les Figures 38 et 39 présentent les données d'entrée au bassin de rétention.

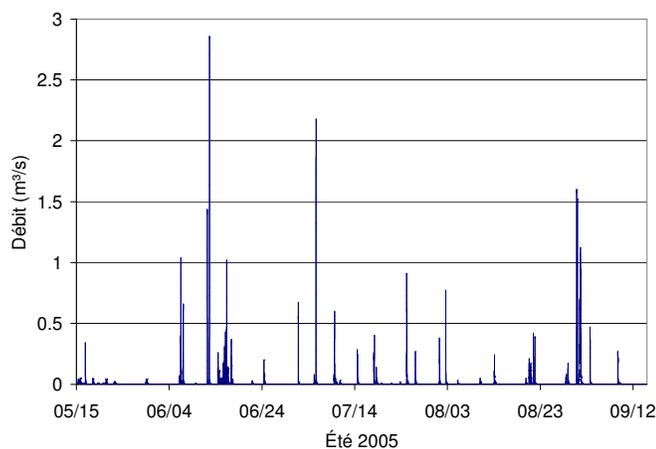


Figure 38 : Débit entrant dans le bassin de rétention durant l'été 2005

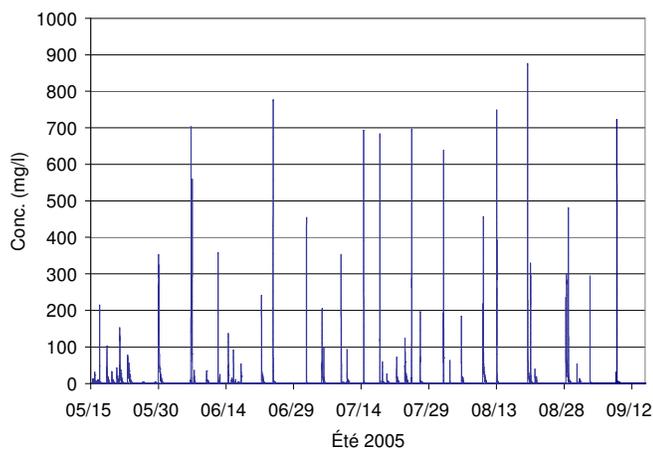


Figure 39 : Concentration en MES à l'entrée du bassin de rétention durant l'été 2005

Il a ruisselé 75 810 m³ sur le bassin versant durant l'été 2005 et il est entré 3 004 kg dans le bassin de rétention. Les Figures 40 à 43 présentent les hauteurs d'eau dans le bassin de rétention et les concentrations rejetées au cours d'eau récepteur pour le bassin contrôlé et non contrôlé.

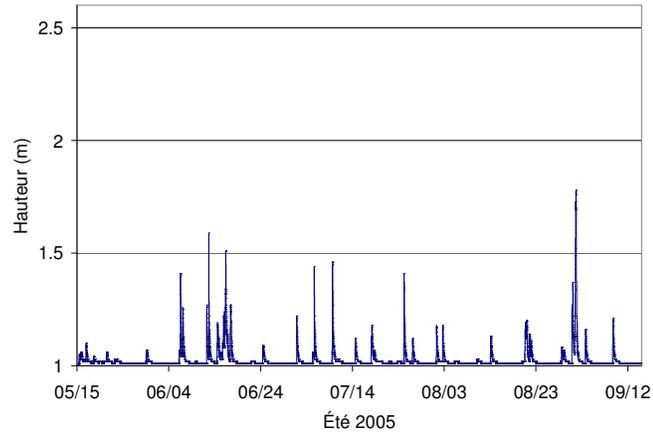


Figure 40 : Hauteur d'eau dans le bassin sans contrôle durant l'été 2005

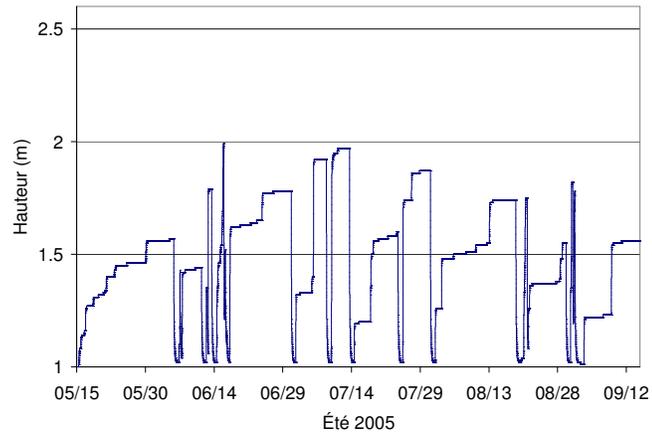


Figure 41 : Hauteur d'eau dans le bassin avec contrôle durant l'été 2005

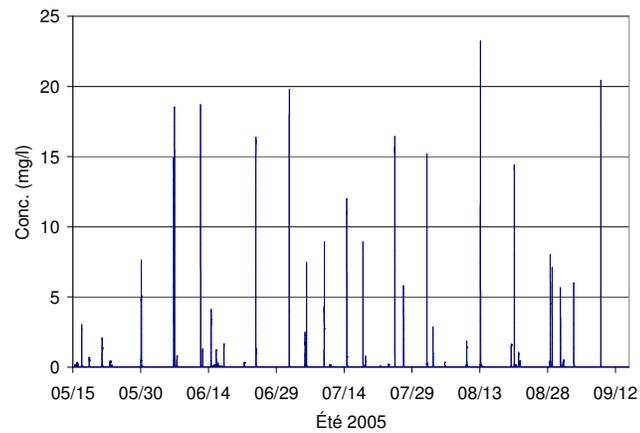


Figure 42 : Concentration en MES à la sortie du bassin sans contrôle durant l'été 2005

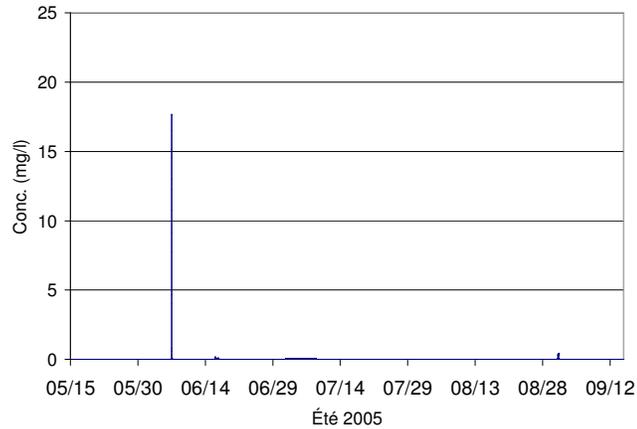


Figure 43 : Concentration en MES à la sortie du bassin avec contrôle durant l'été 2005

Le contrôle de la vanne durant l'été 2005 a été plus efficace. À la simple vue des graphiques des hauteurs d'eau, on remarque que les eaux ont été retenues plus longtemps. Tous les événements ont vu leur temps de rétention augmenter, ce qui explique la diminution significative des rejets en MES. La quantité totale de pluie tombée sur le bassin versant étant inférieure à celle de l'été 2004, le bassin est plus facile à gérer. La charge rejetée par le bassin non-contrôlé a été de 35,33 kg et de 3,97 kg pour le bassin contrôlé : la quantité en MES rejetée au cours d'eau récepteur a été diminuée d'un facteur de 8,89.

4.6.3 Été 2006

L'été 2006 a connu la quantité de précipitations tombée la plus faible des trois séries pluviométriques présentées. Il est tombé 363,3 mm, ce qui a généré un ruissellement de 56 500 m³. Cette quantité représente près de la moitié du volume ruisselé durant l'été 2004. Les Figures 44 et 45 présentent les données d'entrée au bassin de rétention.

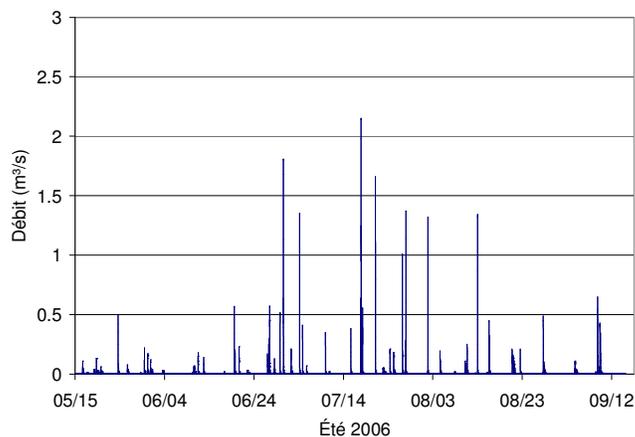


Figure 44 : Débit entrant dans le bassin de rétention durant l'été 2006

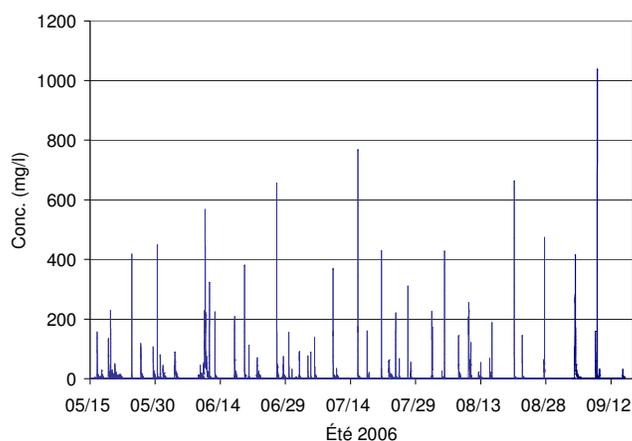


Figure 45 : Concentration en MES à l'entrée du bassin de rétention durant l'été 2006

La quantité de MES qui est entrée dans le bassin de rétention est de 2 913 kg. Malgré que le volume de ruissellement soit différent d'un été à l'autre, on remarque que la quantité de MES apportée au bassin reste sensiblement la même puisque le nombre de jours d'accumulation sont semblables. Les Figures 46 à 49 présentent les hauteurs d'eau et les concentrations en MES rejetées du bassin de rétention durant l'été 2006, pour le bassin avec et sans contrôle.

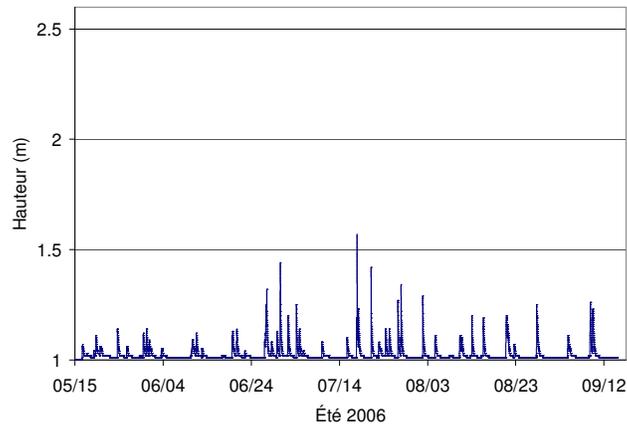


Figure 46 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention sans contrôle durant l'été 2006

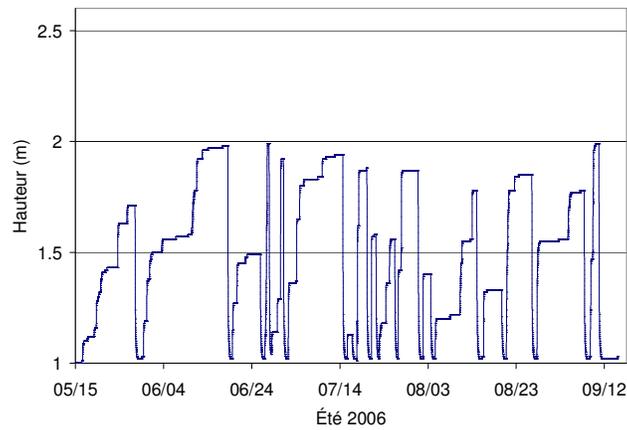


Figure 47 : Hauteur d'eau dans le bassin de rétention avec contrôle durant l'été 2006

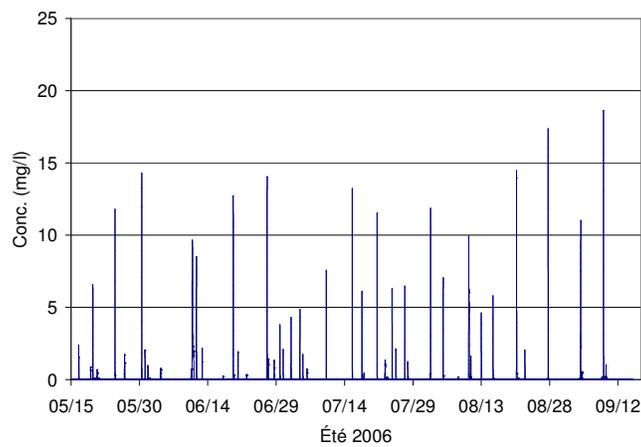


Figure 48 : Concentration en MES à la sortie du bassin sans contrôle durant l'été 2006

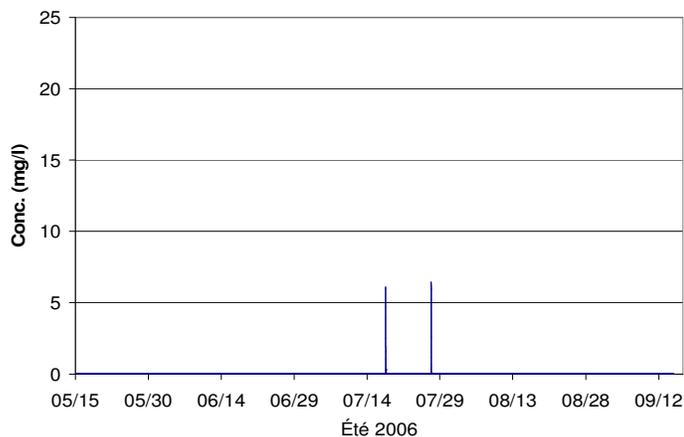


Figure 49 : Concentration en MES à la sortie du bassin avec contrôle durant l'été 2006

Comme précédemment, le contrôle de la vanne a permis d'augmenter davantage les temps de rétention des événements de pluie. Due à la quantité de précipitations reçue inférieure aux années précédentes, la gestion de l'eau dans le bassin de rétention a été plus facile. Tous les événements ont vu leur temps de rétention augmenter. De ce fait, il n'y a eu que deux rejets de MES, dus au temps de rétention trop faible pour sédimenter toutes les particules. Le volume d'eau alors retenu dans le bassin était trop important pour recevoir le prochain événement, il a donc été vidé avant la sédimentation de toutes les particules. Les événements étaient trop fréquents. Par contre, la charge totale et la fréquence des rejets a grandement diminué. Elle est passée de 37,96 kg pour le bassin sans contrôle à 1,43 kg une fois contrôlé. Les rejets en MES ont donc été réduits d'un facteur de 26,55.

4.6.4 Bilan des simulations estivales

Après la simulation du scénario de référence avec les séries pluviométriques des étés 2004 à 2006, on remarque que le contrôle de la vanne permet toujours de réduire les charges rejetées en MES de façon importante. Les Figures 50 à 52 présentent les résultats des charges en MES rejetées dans le cours d'eau récepteur en fonction des différentes classes de diamètres ainsi que le pourcentage supplémentaire de particules sédimentées. Les simulations des étés 2004 à 2006 ont permis de conclure que le contrôle du bassin avec une vanne permettait une réduction significative du rejet des particules de faibles diamètres. Près de 60% et plus de ces particules ont été enlevées grâce à cette gestion.

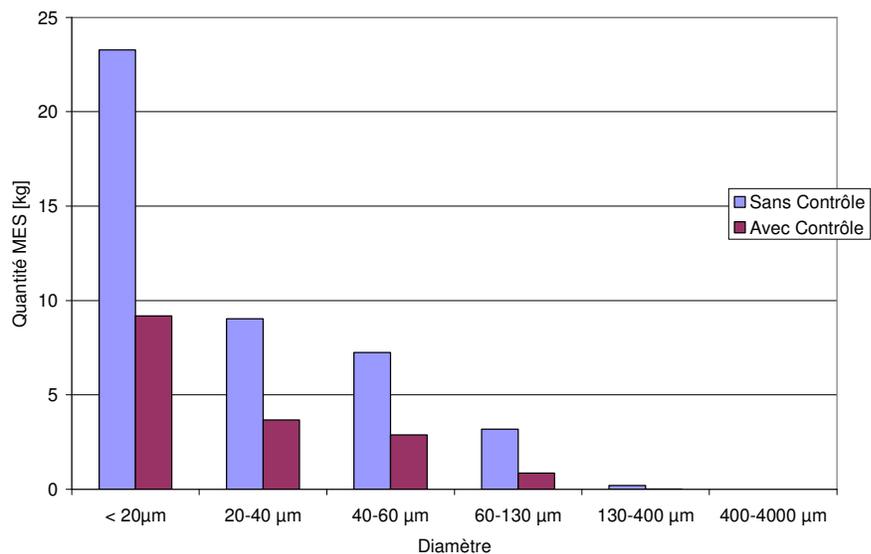


Figure 50 : Récapitulatif des quantités en MES sortant du bassin de rétention par l'orifice durant l'été 2004

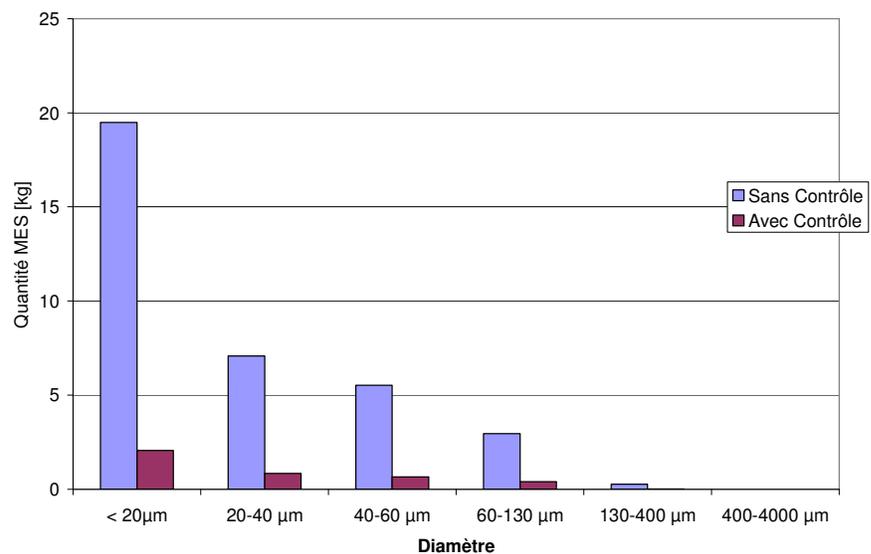


Figure 51 : Récapitulatif des quantités en MES sortant du bassin de rétention par l'orifice durant l'été 2005

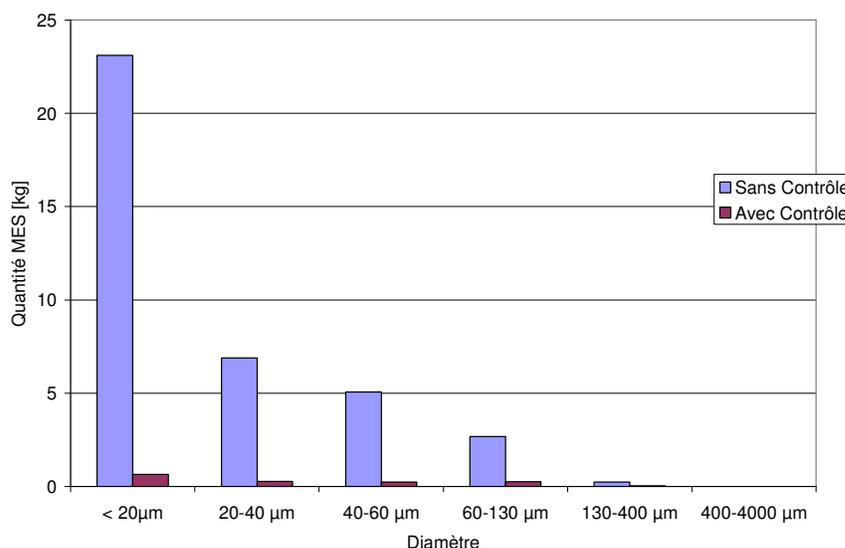


Figure 52 : Récapitulatif des quantités en MES sortant du bassin de rétention par l’orifice durant l’été 2006

On remarque sur ces figures que les particules de forts diamètres sédimentent très rapidement. Les particules de diamètre supérieure à 400 µm sont toutes sédimentées dans le cas des scénarios avec et sans contrôle. Le contrôle a donc peu d’effet sur eux. Pour ce qui est des autres classes de diamètres, on remarque plus le diamètre est petit, plus le bassin de rétention sans contrôle en rejette. Ces particules ont un temps de sédimentation beaucoup plus important que le temps de résidence des eaux du bassin sans contrôle. Le contrôle en temps permet alors de diminuer davantage la quantité de rejet de ces particules en augmentant le temps de résidence des eaux. Pour ce qui est de la différence entre les MES sédimentées d’une année à l’autre, ceci est dû à la quantité d’eau tombé durant la saison. Moins il est tombé d’eau durant une saison, plus il a été facile d’augmenter le temps de résidence des eaux, donc de diminuer la quantité de MES rejetées.

Les trois séries pluviométriques des étés 2004 à 2006 ont permis d’étudier le comportement de la sédimentation lorsque le bassin de rétention est soumis à un contrôle en temps réel. La simulation de ces séries, différentes en hauteur d’eau tombée totale et en récurrence des événements, a permis de constater que la hauteur d’eau totale influait sur la quantité de MES rejetées. Plus la quantité de précipitations est faible, plus la gestion est efficace et le rejet en MES est faible. Pour ce qui est de la quantité de MES lessivées, on remarque

qu'elle était constante d'un été à l'autre, aux alentours de 3000 kg. En fait, moins il y a de précipitations durant une saison, plus il y a de temps sec et plus il y a d'accumulation de sédiments sur le sol. De plus, moins il y a de précipitations, moins il y a de lessivage de ces matières. Dans un autre ordre d'idée, plus il y a de précipitations, moins il y a de temps sec et moins il y a d'accumulation de polluants. Il ne faut pas perdre de vue que la très grande majorité de ce qui est accumulé sur le sol est lessivé par la suite. On peut donc déduire qu'il se produit un certain équilibre permettant de conserver un apport constant de MES au bassin de rétention d'un été à l'autre.

5. Conclusion

Après avoir effectué diverses simulations, la gestion des eaux pluviales par le contrôle d'un bassin de rétention au niveau d'une vanne a démontré qu'elle permettait d'augmenter la sédimentation dans le bassin. Il a été démontré que plus le coefficient de ruissellement du bassin est faible, plus il était facile de faire la gestion des eaux, permettant ainsi de réduire davantage les rejets en MES. Dans le même ordre d'idée, plus le volume du bassin est grand, plus la gestion est efficace et le rejet en MES est faible. En fait, tous les rejets enregistrés lors des simulations avec contrôle correspondent aux événements qui n'ont pu être contrôlés, afin d'éviter la surverse des eaux. De plus, plus l'aire de surface du bassin est importante, plus la sédimentation est efficace. Tous les scénarios prenant en compte les effets de l'imperméabilité du bassin versant et du volume du bassin de rétention ont démontré qu'il était possible de réduire de plus de la moitié les quantités totales de MES rejetées à comparer aux scénarios sans contrôle. Dans le scénario de référence, la quantité en MES rejetées a été diminuée de près de 10 fois. Le bassin contrôlé a rejeté au maximum 14,78 kg des 650 kg de MES lessivés en moyenne dans le meilleur des cas.

Les particules de diamètre supérieur à 400 μm ne sont pas influencées par le contrôle car elles sédimentent rapidement. Ce sont les particules de plus petits diamètres qui sont influencées par le contrôle, grâce au temps de rétention augmenté. Rappelons que ce sont ces particules sur lesquelles s'adsorbent plus de 80% des polluants.

Les simulations des trois séries pluviométriques estivales ont démontré que la quantité d'eau totale tombée influait peu sur la quantité de sédiments lessivés, puisque la quantité accumulée est proportionnelle au temps sec et que la quantité lessivée l'est au temps de pluie, ce qui résulte en une certaine quantité de MES apportées au bassin de rétention. La quantité d'eau totale tombée influe sur la gestion du bassin de rétention : moins il y a de quantité d'eau totale tombée, plus il y avait de sédimentation. Durant l'été où il est tombé la moins grande quantité de précipitations, la quantité totale en MES a été diminuée de près de 25 fois, ce qui représente un rejet de seulement 16,59 kg sur les 3000 kg lessivés. La solution proposée permet donc de réduire considérablement les charges en polluants rejetés, ce qui permet de croire que son intégration, dans la gestion des eaux pluviales, permettrait d'améliorer significativement la qualité des eaux des cours d'eau urbains.

Il a donc été démontré qu'il était possible d'augmenter le temps de rétention des eaux dans un bassin de rétention en intégrant le contrôle en temps réel dans la gestion des eaux pluviales. En appliquant des règles de contrôle au niveau de la vanne, cette solution a permis d'augmenter le temps de rétention des eaux en fonction des prévisions météorologiques et du volume d'eau présent dans le bassin. La sédimentation des particules de diamètres inférieurs à 400 μm a donc pu être augmentée, diminuant ainsi les quantités totales en MES rejetées dans le cours d'eau récepteur. Ce sont d'ailleurs ces particules, celles de faibles diamètres, qu'il faut tenter de retenir davantage puisque ce sont sur ces dernières que la majorité des polluants urbains s'adsorbent. Les simulations ont démontré aussi que le bassin contrôlé était toujours plus efficace que le traditionnel. Deux points n'ont toutefois pas été assez approfondis. Dans de prochaines études, il faudrait donc étudier de plus près l'effet des eaux stagnantes, des débits relâchés qui sont plus grand dans le cas des bassins contrôlés, de simuler avec l'intégration de prévisions météorologiques non parfaites et en intégrant des règles de contrôle plus complexes.

En réduisant la quantité rejetée de MES au cours d'eau récepteur par le contrôle en temps réel dans un bassin de rétention, les polluants urbains agglomérés se retrouvent à sédimenter dans le bassin, réduisant ainsi les impacts négatifs du rejet sur les écosystèmes riverains et aquatiques. Le contrôle en temps réel des eaux pluviales dans un bassin de rétention peut être appliqué autant dans le cas de futurs bassins que dans le cas de bassins

déjà construits. Ce type de système nécessite moins d'espace qu'un système traditionnel et son coût en est donc réduit. En appliquant cette gestion au niveau de plusieurs exutoires d'eaux pluviales tout au long d'un cours d'eau urbain, les rejets en polluants urbains pourraient être diminués de façon importante, augmentant ainsi la qualité des eaux des cours d'eau et diminuant les impacts négatifs sur les écosystèmes riverains et aquatiques.

Références

Alberta Environment Protection (AEP). 1999. *Stormwater Management Guidelines for the Province of Alberta*. Alberta Environmental Protection, Province of Alberta, Edmonton.

Behera, P.K., Adams, B.J., et Li, J.Y. 2006. *Runoff Quality Analysis of Urban Catchments with Analytical Probabilistic Models*. Journal of Water Resources Planning and Management: 4-14.

Chen, J. et Adams, B.J. 2006-a. *Urban stormwater quality control analysis with detention ponds*. Water Environment Research, 78 (7): 744-753.

Chen, J. et Adams, B.J. 2006-b. *Analytical urban storm water quality models based on pollutant buildup and washoff processes*. Journal of Environmental Engineering, 132 (10): 1314-1330.

Chen, J. et Adams, B.J. 2007. *A derived probability distribution approach to stormwater quality modeling*. Advances in Water Resources, 30: 80-100.

Comings, K.J., Booth, D.B. et Horner, R. 2000. *Storm water pollutant removal by two wet ponds in Bellevue, Washington*. Journal of Environmental Engineering: 321-330.

Conn, R.M. et Fiedler, F.R. 2006. *Increasing hydraulic residence time in constructed stormwater treatment wetlands with designed bottom topography*. Water Environment Research, 78 (13): 2514-2523.

Elliot, A.H. 1998. *Model for preliminary catchment-scale planning of urban stormwater quality controls*. Journal of Environmental Management, 52: 273-288.

Environmental Protection Agency (EPA). 1983. *Results of the Nationwide Urban Runoff Program, Vol.1, Final Report*. Water Planning Division, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.

Environmental Protection Agency (EPA). 1986. *Methodology for Analysis of Detention Basins for Control of Urban Runoff Quality*. EPA 440/5-87-001. Office of Water Nonpoint Source Branch, Washington D.C.

Gharabaghi, B., Fata, A., Van Seters, T., Rudra, R.P., MacMillan, G., Smith, D., Li, J.Y., Bradford, A., et Tesa, G. 2006. *Evaluation of sediment control pond performance at construction sites in the Greater Toronto Area*. Canadian Journal of Civil Engineering, 33: 1335-1344.

Huber, W.C., et Dickinson, R.E. 1988. *Storm Water Management Model User's Manual, Version 4*. EPA-600/3-88/001a (NTIS PB88-236641/AS). Environmental Protection Agency, Athens.

Jolicoeur, N., Pugin, S. et Fortier, V. 2008. *Ville de Québec : Méthodologie et critères de conception de bassins de retention*. Note technique, BPR Infrastructures inc., Québec.

Kadlec, R.H. 2000. *The inadequacy of the first-order treatment wetland models*, Ecological Engineering, 15: 105-119.

Li, Y., Deletic, A., et Fletcher, T.D. 2007. *Modelling wet weather sediment removal by stormwater constructed wetlands: Insights from a laboratory study*. Journal of Hydrology, 338: 285-296.

Loganatha, G.V., Watkins, E.W. et Kibler, D.F. 1994. *Sizing storm-water detention basins for pollutant removal*. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, 120 (6): 1380-1399.

Oberts, G.L. et Osgood, R.A. 1991. *Water-quality effectiveness of a detention/wetland treatment system and its effects on a urban lake*, Environmental Management, 15 (1): 131-138.

OMOE (Ontario Ministry of Environment). 2003. *Stormwater Management Planning and Design Manual*. Ontario Ministry of Environment, Toronto.

Papa, F., Adams, B.J., et Guo, Y. 1999. *Detention time selection for stormwater quality control ponds*. Canadian Journal of Civil Engineering, 26 (1): 72-82.

Papa, F. et Adams, B.J. 1996. *Quality control optimisation of extended dry ponds*. In Advances in Modeling the Management of Stormwater Impacts. Edited by W. James. Computational Hydraulics International, Guelph, Ontario.

Rivard, G. 1998. *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain*. Laval : Alias Communication design inc. 329p.

Sear, T.R. et Rayborn, H.M. 1993. *Wet Detention Facility Pollutant Removal Modeling*. CH2M Hill, Orlando, Florida.

Shammaa, Y., Zhu, D.Z., Gyürék L.L. et Labatiuk, C.W. 2002. *Effectiveness of dry ponds for stormwater total suspended solids removal*. Canadian Journal of Civil Engineering, 29 (2): 316-324.

Torres, A. 2008. *Décantation des eaux pluviales dans un ouvrage réel de grande taille : éléments de réflexion pour le suivi et la modélisation*. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, 368p.

Walker, D.J. 1998. *Modelling residence time in stormwater ponds*. Ecological Engineering, 10: 247-262.

Wong, T.H.F., Fletcher, T.D., Duncan, H.P. et Jenkins, G.A. 2006. *Modelling urban stormwater treatment – A unified approach*. *Ecological Engineering*, 27: 58-70.

Wright et McLaughlin. 2001. *Urban Storm Drainage Criteria Manual*. Denver Regional Council of Governments, Denver.

5. Conclusion

Le présent mémoire de maîtrise a proposé un concept de gestion des eaux pluviales dans un bassin de rétention par le contrôle en temps réel. Cette solution a permis d'augmenter le temps de rétention des eaux pluviales dans un bassin de rétention et ainsi augmenter la quantité de polluants d'origine urbaine sédimentés et de diminuer la quantité rejetée au cours d'eau récepteur. Le contrôle s'applique au niveau d'un bassin de rétention, déjà construit ou à construire, en ajoutant une vanne contrôlée en temps réel en fonction des prévisions météorologiques et du volume d'eau présent dans le bassin. À l'aide du logiciel EPA SWMM 5.0, la modélisation de la qualité et de la quantité des eaux dans un bassin versant résidentiel typiquement urbain a permis de démontrer que le contrôle en temps réel augmentait le temps de rétention des eaux dans le bassin et par le fait même, la sédimentation des matières en suspension. Dans tous les scénarios simulés, le bassin géré par le contrôle en temps réel offrait une efficacité de sédimentation supérieure à celle du bassin traditionnel. Ce dernier offre généralement des temps de rétention des eaux ne permettant pas la sédimentation de toutes les particules, spécifiquement celles de faibles diamètres. La gestion en temps réel a augmenté davantage la sédimentation des particules fines, sur lesquelles la majorité des polluants s'adsorbent. Les pollutogrammes à l'entrée et à la sortie du bassin de rétention a permis de quantifier l'efficacité de la gestion proposée. Deux points n'ont toutefois pas été assez approfondis, il s'agit l'effet des eaux stagnantes et des débits relâchés, qui sont plus grands dans le cas des bassins contrôlés. Ces points devraient être étudiés davantage.

Sachant que le ruissellement urbain cause érosion et pollution des cours d'eau et que les impacts négatifs s'intensifieront avec l'urbanisation et les changements climatiques, des méthodes devront être développées permettant de réduire les charges en polluants rejetés au cours d'eau. En augmentant l'efficacité de sédimentation du bassin de rétention, le contrôle en temps réel des eaux de ruissellement a démontré qu'il permettait de réduire les charges en polluants rejetés au cours d'eau et ainsi les impacts négatifs sur les écosystèmes riverains et aquatiques sont alors diminués et la qualité des eaux améliorée. En appliquant ce système sur les divers exutoires pluviaux le long d'un cours d'eau urbain, les charges

totales en polluants rejetés seront nettement diminuées, permettant d'améliorer considérablement la qualité des cours d'eau. De ce fait, les écosystèmes pourraient être préservés davantage et les aspects esthétiques et récréatifs seraient améliorés, faisant ainsi le bonheur des citoyens et des gestionnaires des eaux. De plus, dans le cas où les pluies deviendront plus fréquentes et plus intenses, le contrôle en temps réel s'ajustera afin d'effectuer un contrôle plus optimal sans changer la configuration du bassin. Il peut même être ajouté aux infrastructures existantes dont leur contrôle n'est plus adéquat aux conditions climatiques actuelles. Ce type de contrôle est alors adaptable aux changements climatiques puisqu'il est flexible.

6. Bibliographie

Akan, A. O. et Houghtalen, R.J. 2003. *Urban Hydrology, Hydraulics, and Stormwater Quality: Engineering Applications and Computer Modeling*. John Wiley and Sons, inc., 373 p.

Alberta Environment Protection (AEP). 1999. *Stormwater Management Guidelines for the Province of Alberta*. Alberta Environmental Protection, Province of Alberta, Edmonton.

APWA (American Public Works Association). 1969. *Water Pollution Aspects of Urban Runoff*. Washington DC: Water Pollution Control Administration, Contract WP-20-15, 1969.

ASCE (American Society of Civil Engineers) et WEF (Water Environment Federation). 1992. *Design and Construction of Stormwater Management*. Manual of practice, New York.

ASCE (American Society of Civil Engineers) et WEF (Water Environment Federation). 1998. *Urban Runoff Quality Management*. WEF Manual of practice no.23, ASCE Manual and report on engineering practice, 87, Virginie.

Aquapaxis. 2007. *AquaIDF version 4.1.2*, Aquapaxis Inc.

Behera, P.K., Adams, B.J., et Li, J.Y. 2006. *Runoff Quality Analysis of Urban Catchments with Analytical Probabilistic Models*. Journal of Water Resources Planning and Management: 4-14.

Chambers, P.A., Allard, M., Walker, S.L., Marsalek, J., Lawrence, J., Servos, M., Busnarda, J., Munger, K.S., Adare, K., Jefferson, C., Kent, R.A. et Wong., M.P. 1997. *Impacts of municipal wastewater effluents on Canadian waters: A review*. Water Quality Resources Journal, 32: 659-713.

Chen, J. et Adams, B.J. 2006-a. *Urban stormwater quality control analysis with detention ponds*. Water Environment Research, 78 (7): 744-753.

Chen, J. et Adams, B.J. 2006-b. *Analytical urban storm water quality models based on pollutant buildup and washoff processes*. Journal of Environmental Engineering, 132 (10): 1314-1330.

Chen, J. et Adams, B.J. 2007. *A derived probability distribution approach to stormwater quality modeling*. Advances in Water Resources, 30: 80-100.

Comings, K.J., Booth, D.B. et Horner, R. 2000. *Storm water pollutant removal by two wet ponds in Bellevue, Washington*. Journal of Environmental Engineering: 321-330.

Conn, R.M. et Fiedler, F.R. 2006. *Increasing hydraulic residence time in constructed stormwater treatment wetlands with designed bottom topography*. Water Environment Research, 78 (13): 2514-2523.

CNRC (Conseil National de Recherches du Canada) et FCM (Fédération canadienne des municipalités). 2003. *Contrôle à la source et sur le terrain pour les réseaux de drainage municipaux*. Règles de l'art du Guide national pour des infrastructures municipales durables, Ottawa.

CNRC (Conseil National de Recherches du Canada) et FCM (Fédération canadienne des municipalités). 2004. *Planification de la gestion des eaux pluviales*. Règles de l'art du Guide national pour des infrastructures municipales durables, Ottawa.

Elliot, A.H. 1998. *Model for preliminary catchment-scale planning of urban stormwater quality controls*. Journal of Environmental Management, 52: 273-288.

Environmental Protection Agency. 1976. *Landuse – Water Quality Relationship Documentation Report of Models*. EPA-4001765001. Environmental Protection Agency, Washington D.C.

Environmental Protection Agency (EPA). 1983. *Results of the Nationwide Urban Runoff Program, Vol.1, Final Report*. Water Planning Division, U.S. Environmental Protection Agency, Washington D.C.

Environmental Protection Agency (EPA). 1986. *Methodology for Analysis of Detention Basins for Control of Urban Runoff Quality*. EPA 440/5-87-001. Office of Water Nonpoint Source Branch, Washington D.C.

Environmental Protection Agency (EPA). 1993. *Urban Runoff Pollution, Prevention and Control Planning*. Office of research and development center for environmental research information, Cincinnati.

EPASA (Environmental Protection Authority of South Australia). 2003. *Stormwater pollution*. Disponible à www.epa.sa.gov.au/pdfs/water_general.pdf.

Fair, M.F., Geyer, J.C. et Okun, D.A. 1968. *Water and Wastewater Engineering*. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Gharabaghi, B., Fata, A., Van Seters, T., Rudra, R.P., MacMillan, G., Smith, D., Li, J.Y., Bradford, A., et Tesa, G. 2006. *Evaluation of sediment control pond performance at construction sites in the Greater Toronto Area*. Canadian Journal of Civil Engineering, 33: 1335-1344.

Heaney, J.P., Pitt, R. et Field, R. 1999. *Innovative Urban Wet-weather Flow Management Systems*. EPA/600/R-99/029. Cincinnati.

- Huber, W.C., Heaney, J.P., Medina, M.A., Peltz, W.A., Sheikh, H. et Smith, G.F. 1975. *Storm Water Management Model User's Manual - Version II*. EPA-670/2-75-017 (NTIS PB-257809). Environmental Protection Agency, Cincinnati.
- Huber, W.C., et Dickinson, R.E. 1988. *Storm Water Management Model User's Manual, Version 4*. EPA-600/3-88/001a (NTIS PB88-236641/AS). Environmental Protection Agency, Athens.
- James, W., Huber, W.C., Rossman, L.E., Dickinson, R.E., Pitt, R.E., James, W.R.C., Roesner, L.A. et Aldrich, J.A. 2005. *User's guide to SWMM*. Water Systems Models, Computational Hydraulics International, Guelph, 942p.
- Jolicoeur, N., Pugin, S. et Fortier, V. 2008. *Ville de Québec : Méthodologie et critères de conception de bassins de rétention*. Note technique, BPR Infrastructures inc., Québec.
- Kadlec, R.H. 2000. *The inadequacy of the first-order treatment wetland models*, Ecological Engineering, 15: 105-119.
- Li, Y., Deletic, A., et Fletcher, T.D. 2007. *Modelling wet weather sediment removal by stormwater constructed wetlands: Insights from a laboratory study*. Journal of Hydrology, 338: 285-296.
- Loganatha, G.V., Watkins, E.W. et Kibler, D.F. 1994. *Sizing storm-water detention basins for pollutant removal*. ASCE Journal of Water Resources Planning and Management, 120 (6): 1380-1399.
- Marsalek, J., Diamond, M., Kok, S. et Watt, W.E. 2003. *Eaux de ruissellement urbaines*, Environnement Canada. Disponible à www.nwri.ca/threatsfull/ch11-1-f.html.
- Maryland Department of the Environment (MDE). 2000. *Maryland Stormwater Design Manual, Volume 1 et 2*. Center for Watershed Protection, Baltimore.
- MDDEP (Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs). 2002. Disponible à www.mddep.gouv.qc.ca/eau. Gouvernement du Québec.
- Oberts, G.L. et Osgood, R.A. 1991. *Water-quality effectiveness of a detention/wetland treatment system and its effects on a urban lake*, Environmental Management, 15 (1): 131-138.
- OMOE (Ontario Ministry of Environment). 2003. *Stormwater Management Planning and Design Manual*. Ontario Ministry of Environment, Toronto.
- Papa, F., Adams, B.J., et Guo, Y. 1999. *Detention time selection for stormwater quality control ponds*. Canadian Journal of Civil Engineering, 26 (1): 72-82.

Papa, F. et Adams, B.J. 1996. *Quality control optimisation of extended dry ponds*. In *Advances in Modeling the Management of Stormwater Impacts*. Edited by W. James. Computational Hydraulics International, Guelph, Ontario.

Rivard, G. 1998. *Gestion des eaux pluviales en milieu urbain*. Laval : Alias Communication design inc. 329p.

Sartor, J.D. et Boyd, G.B. 1972. *Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants*. EPA-R2-72-081, (NTIS PB-214408). Environmental Protection Agency.

Schueler, T.R., *Controlling Urban Runoff : a Practical Manual for Planning and Designing Urban Best Management Practices*, Metropolitan Washington Water Resources Planning Board, Washington D.C., 1987.

Sear, T.R. et Rayborn, H.M. 1993. *Wet Detention Facility Pollutant Removal Modeling*. CH2M Hill, Orlando, Florida.

Shammaa, Y., Zhu, D.Z., Gyürék L.L. et Labatiuk, C.W. 2002. *Effectiveness of dry ponds for stormwater total suspended solids removal*. Canadian Journal of Civil Engineering, 29 (2): 316-324.

Torres, A. 2008. *Décantation des eaux pluviales dans un ouvrage réel de grande taille : éléments de réflexion pour le suivi et la modélisation*. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, Lyon, 368p.

Terrene Institute. 1994. *Urbanization and Water Quality, a Guide to Protecting the Urban Environment*. Washington D.C.

Walker, D.J. 1998. *Modelling residence time in stormwater ponds*. Ecological Engineering, 10: 247-262.

Wong, T.H.F., Fletcher, T.D., Duncan, H.P. et Jenkins, G.A. 2006. *Modelling urban stormwater treatment – A unified approach*. Ecological Engineering, 27: 58-70.

Wright et McLaughlin. 2001. *Urban Storm Drainage Criteria Manual*. Denver Regional Council of Governments, Denver.

XP Software. 2007. *XP-SWMM version 10.6*, XP Software Inc.

Annexe 1 – Pluies SEA

Les pluies SEA sont des pluies synthétiques créées par le Service de l'Environnement Atmosphérique d'Environnement Canada. Elles ont été créées à partir d'études sur les patrons temporels des pluies à travers le Canada afin de déterminer quelle forme de pluie était la mieux adaptée à chacune des régions. Ces analyses ont été faites pour deux durées de pluie : 1 heure et 12 heures. Des courbes de masse ont été créées à partir de ces pluies pour diverses régions du Canada (Rivard, 1998). La région qui nous intéresse est celle du Sud-Ouest du Québec. Les Figures A1 et A2 présentent les hyétogrammes des pluies SEA utilisées pour la conception des bassins de rétention dans ce projet. Elles ont été faites à partir du logiciel «STORMS for SWMHYMO 1.2 ». Les pluies de conception sont la pluie SEA de récurrence 10 ans et de durée 1 heure et la pluie SEA de récurrence 2 ans et de durée 1 heure.

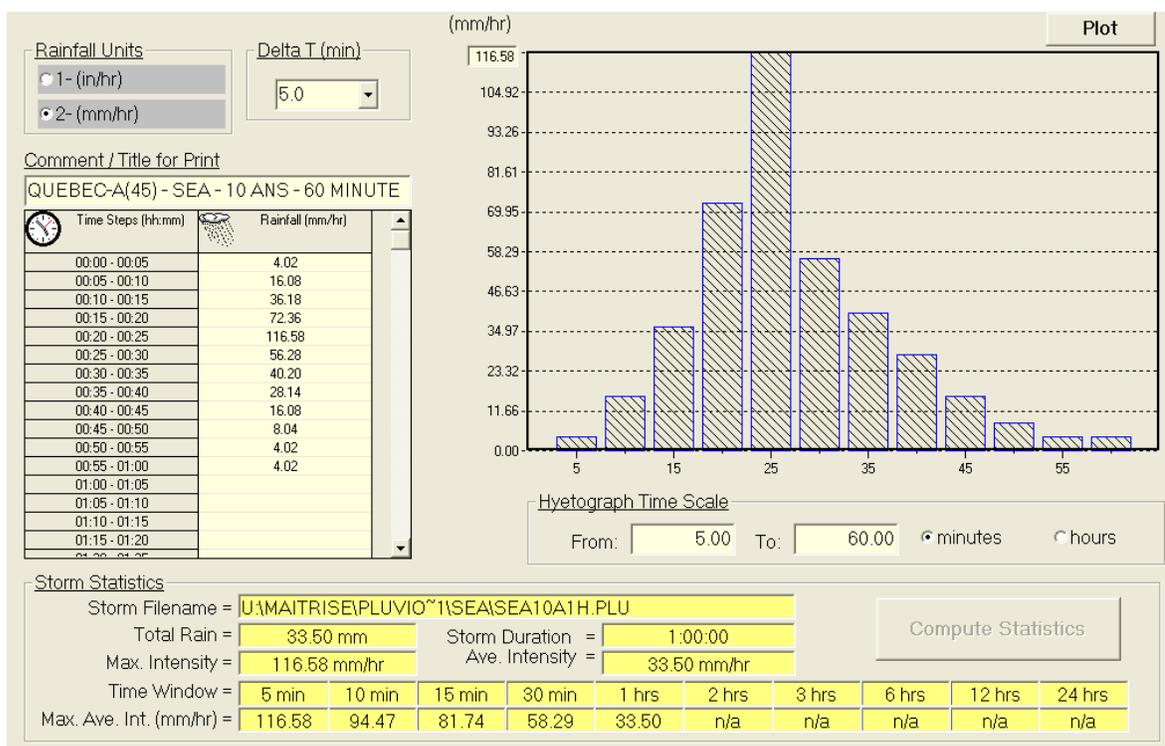


Figure A1 : Pluie SEA 10 ans – 1 heure

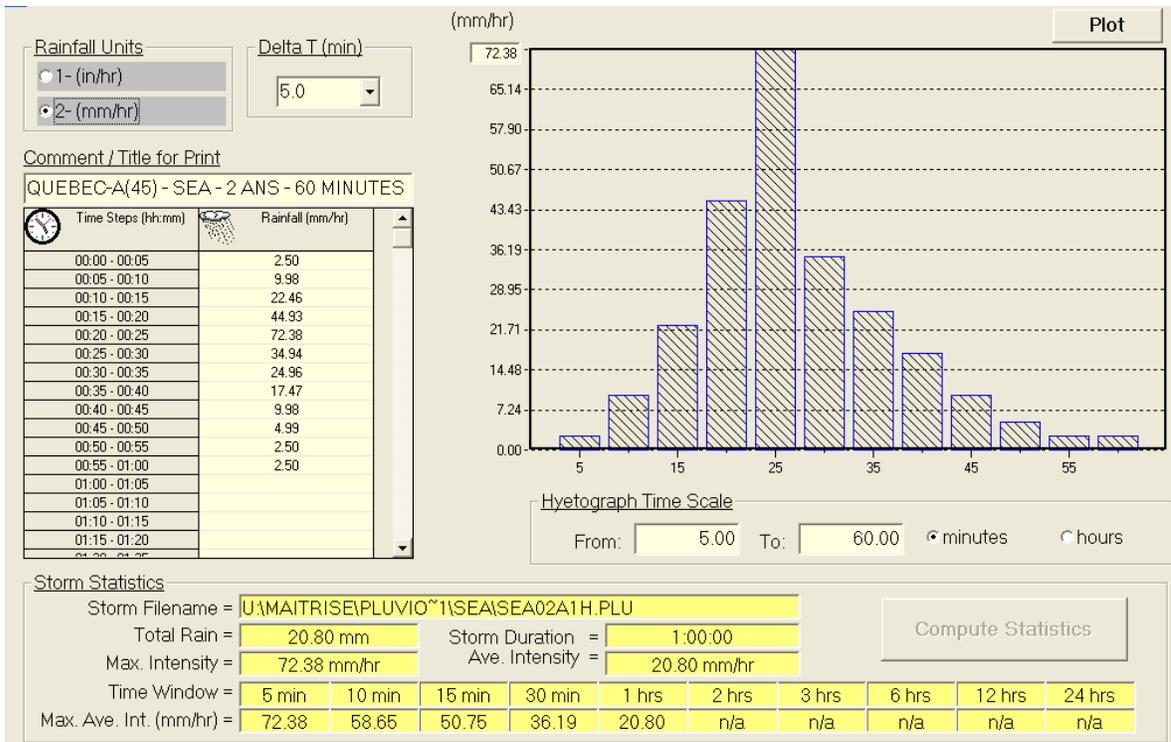


Figure A2 : Pluie SEA 2 ans – 1 heure

Annexe 2 – Séries pluviométriques des étés 2004 à 2006

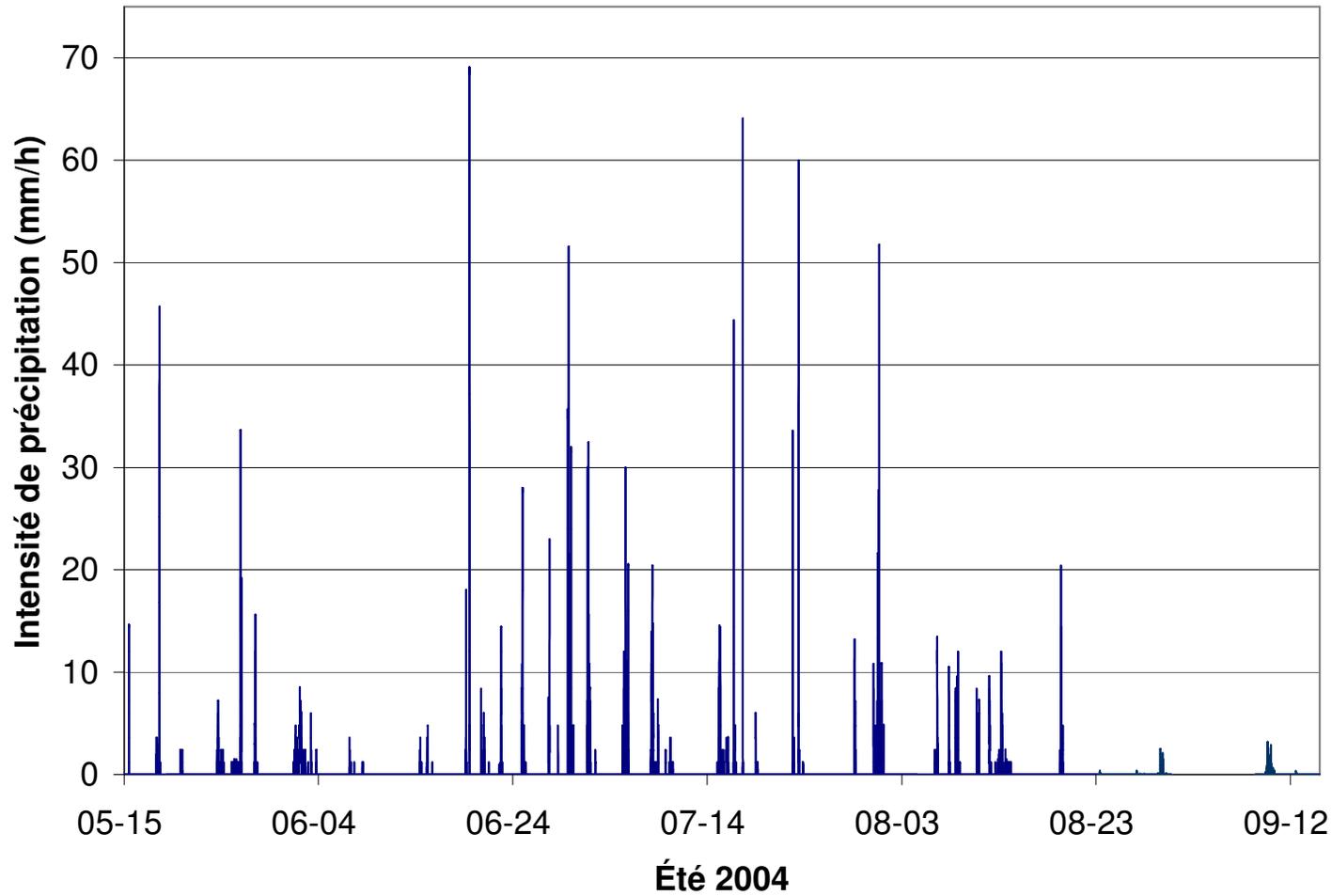


Figure A3 : Série pluviométrique de l'été 2004 du pluviomètre 901 de la Ville de Québec

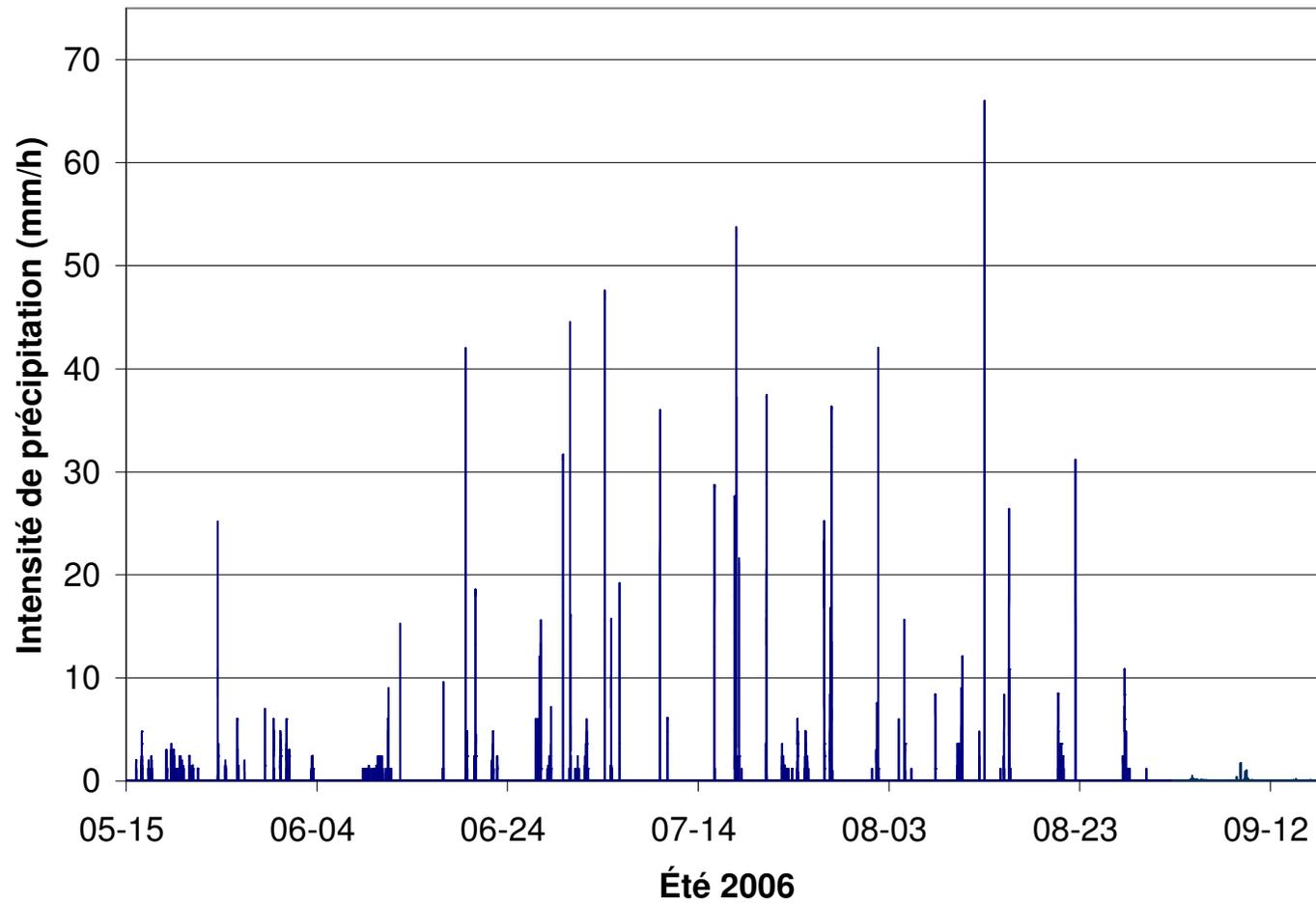


Figure A5 : Série pluviométrique de l'été 2006 du pluviomètre 901 de la Ville de Québec

Annexe 3 – Statistiques des séries pluviométriques des étés 2004 à 2006

Tableau A1 : Statistiques de la série pluviométrique de l'été 2004

Mai 2004					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2004-05-15 12:00	3.70	0.62	1.20	00:30	00 12:00
2004-05-18 06:55	2.61	0.08	0.30	02:45	02 18:35
2004-05-18 14:45	13.42	0.56	3.80	02:00	00 05:15
2004-05-20 19:10	0.90	0.06	0.20	01:10	02 02:35
2004-05-21 00:00	0.30	0.15	0.20	00:10	00 03:50
2004-05-24 13:35	13.30	0.18	0.60	06:00	03 13:35
2004-05-24 20:55	6.80	0.06	0.20	09:00	00 01:30
2004-05-26 01:10	5.33	0.05	0.13	09:40	00 19:25
2004-05-26 13:15	2.53	0.03	0.13	06:50	00 02:35
2004-05-26 21:20	17.20	0.27	2.80	05:15	00 01:25
2004-05-28 09:55	8.80	0.30	1.30	02:25	01 07:30
2004-05-28 13:15	0.30	0.08	0.10	00:20	00 01:05
2004-05-28 17:00	0.10	0.10	0.10	00:05	00 03:35
TOTAL	75.28				

Juin 2004					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (jj hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2004-06-01 10:25	40.11	0.11	0.70	01 05:15	03 17:20
2004-06-02 22:15	0.10	0.10	0.10	00 00:05	00 06:45
2004-06-03 05:15	1.60	0.12	0.50	00 01:05	00 07:05
2004-06-03 18:10	0.70	0.04	0.20	00 01:25	00 12:00
2004-06-07 03:55	1.40	0.14	0.30	00 00:50	03 08:30
2004-06-07 08:15	0.10	0.10	0.10	00 00:05	00 03:40
2004-06-07 16:05	0.10	0.10	0.10	00 00:05	00 07:55
2004-06-08 12:20	0.40	0.03	0.10	00 01:25	00 20:20
2004-06-14 09:35	2.50	0.05	0.30	00 04:35	05 20:00
2004-06-15 03:30	6.00	0.17	0.40	00 02:55	00 13:30
2004-06-15 16:40	0.10	0.10	0.10	00 00:05	00 10:25
2004-06-19 03:05	3.70	0.13	1.50	00 02:20	03 10:30
2004-06-19 12:35	11.10	1.39	5.70	00 00:40	00 07:20
2004-06-20 17:50	1.70	0.15	0.70	00 00:55	01 04:45
2004-06-20 23:00	5.60	0.13	0.50	00 03:30	00 04:25
2004-06-21 12:40	0.10	0.10	0.10	00 00:05	00 10:20
2004-06-22 14:05	0.08	0.08	0.08	00 00:05	01 01:30
2004-06-22 17:35	8.78	0.18	1.20	00 04:05	00 03:35
2004-06-24 22:20	14.10	0.21	2.30	00 05:40	02 00:50
2004-06-25 07:45	0.10	0.10	0.10	00 00:05	00 03:55
2004-06-27 16:00	0.93	0.23	0.63	00 00:20	02 08:20
2004-06-27 18:05	3.19	0.64	1.92	00 00:25	00 01:55
2004-06-28 15:35	0.50	0.25	0.40	00 00:10	00 21:15
2004-06-29 15:30	5.00	1.67	2.90	00 00:15	00 23:55
2004-06-29 17:00	11.90	0.25	4.30	00 03:55	00 01:25
2004-06-29 22:40	8.56	0.39	2.63	00 01:50	00 01:55
2004-06-30 04:30	2.00	0.13	0.40	00 01:15	00 04:10

TOTAL 130.45

Juillet 2004					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2004-07-01 15:30	27.03	0.26	2.70	08:45	01 09:45
2004-07-02 11:55	0.60	0.12	0.20	00:25	00 11:50
2004-07-05 06:35	1.40	0.18	0.40	00:40	02 18:25
2004-07-05 10:25	3.46	0.35	1.00	00:50	00 03:20
2004-07-05 14:25	17.41	0.19	2.50	07:35	00 03:20
2004-07-08 04:25	39.57	0.33	1.70	10:00	02 06:35
2004-07-08 18:25	4.90	0.08	0.60	05:10	00 04:10
2004-07-09 17:00	0.80	0.13	0.20	00:30	00 17:35
2004-07-10 02:00	0.10	0.10	0.10	00:05	00 08:40
2004-07-10 04:10	2.77	0.03	0.30	07:00	00 02:15
2004-07-15 00:50	0.10	0.10	0.10	00:05	04 13:50
2004-07-15 03:30	33.00	0.22	1.20	13:35	00 02:45
2004-07-15 23:55	0.60	0.20	0.30	00:15	00 07:00
2004-07-16 02:45	0.90	0.09	0.30	00:50	00 02:45
2004-07-16 16:40	6.40	0.49	3.70	01:05	00 13:15
2004-07-16 19:40	3.40	0.10	0.40	02:55	00 02:05
2004-07-17 15:30	12.70	1.15	5.30	00:55	00 17:05
2004-07-18 23:25	1.60	0.13	0.50	01:00	01 07:10
2004-07-19 02:10	0.40	0.01	0.10	02:30	00 01:55
2004-07-22 19:05	2.90	0.97	2.80	00:15	03 14:35
2004-07-22 22:35	0.70	0.12	0.30	00:30	00 03:25
2004-07-23 09:10	6.30	1.05	5.00	00:30	00 10:15
2004-07-23 11:05	0.40	0.20	0.20	00:10	00 01:35
2004-07-23 19:55	0.18	0.09	0.10	00:10	00 08:50
2004-07-23 22:00	0.08	0.08	0.08	00:05	00 02:10
2004-07-29 03:00	7.90	0.20	1.10	03:15	05 05:05
2004-07-31 02:20	4.70	0.15	0.90	02:40	01 20:15
2004-07-31 06:55	0.80	0.09	0.40	00:45	00 02:05
2004-07-31 10:50	27.78	0.33	4.30	07:00	00 03:20
2004-07-31 21:45	3.70	0.25	0.90	01:15	00 04:05
TOTAL	212.58				

Août 2004					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2004-08-01 03:20	0.80	0.27	0.40	00:15	00 04:20
2004-08-06 09:40	2.35	0.06	0.20	03:20	05 06:15
2004-08-06 15:45	5.24	0.31	1.10	01:25	00 02:55
2004-08-07 20:55	2.56	0.11	0.88	01:55	01 03:55
2004-08-08 13:10	2.10	0.42	0.70	00:25	00 14:30
2004-08-08 15:50	0.90	0.45	0.80	00:10	00 02:25
2004-08-08 18:15	1.90	0.08	1.00	01:55	00 02:25
2004-08-08 23:40	0.20	0.10	0.10	00:10	00 03:40
2004-08-10 17:05	2.90	0.16	0.70	01:30	01 17:25
2004-08-10 23:10	3.00	0.38	0.60	00:40	00 04:45
2004-08-12 00:00	6.98	0.44	0.80	01:20	01 00:20
2004-08-12 04:15	0.10	0.10	0.10	00:05	00 03:05
2004-08-12 15:10	0.10	0.10	0.10	00:05	00 11:00
2004-08-12 21:20	2.40	0.03	0.20	05:45	00 06:15
2004-08-13 05:00	13.53	0.23	1.00	05:00	00 02:05
2004-08-13 14:55	1.76	0.03	0.20	05:45	00 05:05
2004-08-13 22:40	0.70	0.03	0.10	01:45	00 02:10
2004-08-14 01:55	0.50	0.02	0.10	02:10	00 01:40
2004-08-14 06:00	0.10	0.10	0.10	00:05	00 02:05
2004-08-19 06:55	0.38	0.05	0.20	00:40	05 01:00
2004-08-19 09:05	3.93	0.33	1.70	01:00	00 01:40
2004-08-19 12:15	3.03	0.12	0.40	02:10	00 02:20
2004-08-23 08:50	2.10	0.07	0.40	02:40	03 18:35
2004-08-27 03:55	1.60	0.07	0.40	02:00	03 16:35
2004-08-27 12:05	0.10	0.10	0.10	00:05	00 06:20
2004-08-27 22:25	0.10	0.10	0.10	00:05	00 10:25
2004-08-29 08:15	0.51	0.05	0.13	00:55	01 09:55
2004-08-29 11:35	0.10	0.10	0.10	00:05	00 02:35
2004-08-29 14:40	6.51	0.54	2.50	01:00	00 03:10
2004-08-29 17:50	0.10	0.10	0.10	00:05	00 02:20
2004-08-29 19:00	13.56	0.35	2.10	03:15	00 01:15
2004-08-30 00:00	0.10	0.10	0.10	00:05	00 01:55
2004-08-30 03:05	0.27	0.01	0.10	01:45	00 03:10
2004-08-30 06:40	0.20	0.03	0.10	00:35	00 02:00
TOTAL	80.72				

Septembre 2004					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (jj hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2004-09-09 10:10	105.94	0.37	3.17	01 00:00	10 02:55
2004-09-12 13:15	0.78	0.16	0.38	00 00:25	02 03:15
2004-09-12 17:00	0.20	0.10	0.10	00 00:10	00 03:30
TOTAL	106.92				
Total estival (mm)	605.95				

Tableau A2 : Statistiques de la série pluviométrique de l'été 2005

Mai 2005					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2005-05-15 06:10:00	0.20	0.07	0.10	00:10	00 00:00
2005-05-15 07:40:00	3.58	0.04	0.20	06:45	00 01:25
2005-05-15 16:10:00	0.10	0.10	0.10	00:05	00 01:55
2005-05-15 18:20:00	1.98	0.03	0.20	05:20	00 02:15
2005-05-16 10:55:00	1.93	0.03	0.25	05:15	00 11:25
2005-05-16 22:25:00	2.70	0.39	1.50	00:35	00 06:25
2005-05-18 11:10:00	1.17	0.19	0.25	00:30	01 12:20
2005-05-18 13:10:00	1.28	0.18	0.50	00:35	00 01:40
2005-05-18 18:05:00	0.33	0.03	0.13	01:05	00 04:30
2005-05-19 15:15:00	0.88	0.08	0.13	00:55	00 20:15
2005-05-20 17:20:00	1.26	0.04	0.20	02:25	01 01:20
2005-05-20 22:45:00	0.13	0.13	0.13	00:05	00 03:10
2005-05-21 06:20:00	3.10	0.06	0.17	04:05	00 07:40
2005-05-21 19:45:00	0.08	0.08	0.08	00:05	00 09:30
2005-05-23 01:20:00	2.43	0.05	0.25	04:05	01 05:40
2005-05-23 07:55:00	0.85	0.03	0.13	02:35	00 02:40
2005-05-23 13:55:00	0.13	0.13	0.13	00:05	00 03:35
2005-05-26 09:35:00	0.13	0.13	0.13	00:05	02 19:45
2005-05-26 11:55:00	0.10	0.10	0.10	00:05	00 02:25
2005-05-26 14:10:00	0.10	0.10	0.10	00:05	00 02:20
2005-05-29 00:10:00	0.07	0.07	0.07	00:05	02 10:05
2005-05-29 04:45:00	0.13	0.13	0.13	00:05	00 04:40
2005-05-29 07:40:00	0.07	0.07	0.07	00:05	00 03:00
2005-05-29 22:10:00	4.00	0.06	0.30	06:00	00 14:35
TOTAL	26.69				

Juin 2005					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2005-06-05 23:40	0.17	0.17	0.17	00:05	00 00:00
2005-06-06 03:10	3.45	0.08	0.30	03:45	00 03:35
2005-06-06 10:25	15.76	0.43	2.90	03:05	00 03:40
2005-06-06 20:40	0.97	0.24	0.38	00:20	00 07:20
2005-06-06 22:50	8.24	0.27	1.70	12:15	00 02:00
2005-06-07 11:20	0.40	0.03	0.10	01:15	00 10:05
2005-06-07 17:25	0.10	0.10	0.10	00:05	00 05:00
2005-06-09 15:25	0.71	0.12	0.20	00:30	01 22:05
2005-06-12 05:45	8.12	1.35	5.00	00:30	02 14:00
2005-06-12 07:25	0.10	0.10	0.10	00:05	00 01:20
2005-06-12 16:05	17.00	2.43	6.00	00:35	00 08:45
2005-06-14 09:00	12.00	0.09	0.50	10:40	01 16:30
2005-06-14 22:05	0.08	0.08	0.08	00:05	00 02:35
2005-06-15 00:10	3.16	0.03	0.13	10:25	00 02:10
2005-06-15 15:40	12.35	0.13	0.80	08:10	00 05:15
2005-06-16 02:10	40.55	0.22	1.70	15:35	00 02:30
2005-06-16 19:50	0.48	0.01	0.10	04:00	00 02:15
2005-06-17 02:20	0.13	0.13	0.13	00:05	00 02:40
2005-06-17 07:30	14.65	0.17	0.60	07:15	00 05:15
2005-06-18 00:55	0.10	0.10	0.10	00:05	00 10:20
2005-06-18 11:00	0.10	0.10	0.10	00:05	00 10:10
2005-06-21 20:15	1.40	0.23	0.70	00:30	03 09:20
2005-06-21 22:50	0.10	0.10	0.10	00:05	00 02:15
2005-06-24 09:55	3.40	0.34	0.70	00:50	02 11:10
2005-06-24 12:00	1.13	0.16	0.40	00:35	00 01:25
TOTAL	144.64				

Juillet 2005					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2005-07-01 14:40	0.08	0.08	0.08	00:05	00 00:00
2005-07-01 19:50	7.64	0.69	2.90	00:55	00 05:15
2005-07-02 04:30	0.10	0.10	0.10	00:05	00 07:55
2005-07-05 04:50	3.40	0.06	0.40	04:30	03 00:25
2005-07-05 16:00	12.40	2.07	4.70	00:30	00 06:50
2005-07-09 11:10	22.63	0.29	1.00	06:35	03 18:50
2005-07-09 19:40	0.98	0.04	0.20	01:55	00 02:05
2005-07-09 23:55	0.50	0.03	0.10	01:25	00 02:30
2005-07-10 17:20	1.93	0.06	1.40	02:50	00 16:10
2005-07-14 13:10	5.10	0.21	1.00	02:00	03 17:10
2005-07-18 02:40	4.82	0.40	1.80	01:00	03 11:40
2005-07-18 05:20	3.30	0.19	1.10	01:25	00 01:50
2005-07-18 12:55	0.10	0.10	0.10	00:05	00 06:20
2005-07-18 15:35	2.10	0.19	0.90	00:55	00 02:45
2005-07-19 08:40	0.20	0.07	0.10	00:15	00 16:20
2005-07-19 16:00	0.80	0.27	0.40	00:15	00 07:15
2005-07-21 19:45	0.80	0.16	0.33	00:25	02 03:40
2005-07-21 21:45	0.10	0.10	0.10	00:05	00 01:45
2005-07-23 15:10	0.50	0.17	0.20	00:15	01 17:30
2005-07-23 17:05	1.13	0.16	0.30	00:35	00 01:50
2005-07-25 02:00	18.00	0.26	1.70	05:50	01 08:30
2005-07-26 18:35	0.13	0.13	0.13	00:05	01 10:55
2005-07-26 23:25	0.10	0.10	0.10	00:05	00 04:55
2005-07-27 01:00	4.46	0.26	0.63	01:25	00 01:40
2005-07-29 13:35	0.10	0.10	0.10	00:05	02 11:20
TOTAL	91.41				

Août 2005					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2005-08-01 04:20	1.40	0.14	0.30	00:50	00 00:00
2005-08-01 06:15	5.37	0.32	0.92	01:25	00 01:15
2005-08-01 19:35	0.28	0.04	0.10	00:35	00 12:05
2005-08-02 04:40	0.10	0.10	0.10	00:05	00 08:40
2005-08-02 10:20	0.20	0.20	0.20	00:05	00 05:45
2005-08-02 15:30	5.60	0.62	3.70	00:45	00 05:15
2005-08-05 04:40	1.67	0.28	0.83	00:30	02 12:35
2005-08-05 09:40	0.10	0.10	0.10	00:05	00 04:40
2005-08-09 22:15	0.88	0.44	0.63	00:10	04 12:40
2005-08-10 01:30	1.48	0.16	0.90	00:45	00 03:15
2005-08-12 21:10	0.08	0.08	0.08	00:05	02 19:05
2005-08-13 00:25	6.28	0.11	0.50	05:30	00 03:20
2005-08-13 09:55	0.10	0.10	0.10	00:05	00 04:10
2005-08-17 01:00	0.13	0.13	0.13	00:05	03 15:10
2005-08-19 21:40	1.67	1.67	1.67	00:05	02 20:45
2005-08-20 04:00	0.48	0.03	0.10	01:20	00 06:25
2005-08-20 07:30	0.10	0.10	0.10	00:05	00 02:20
2005-08-20 09:25	0.08	0.08	0.08	00:05	00 02:00
2005-08-20 12:00	17.92	0.12	0.40	12:00	00 02:40
2005-08-21 03:00	0.08	0.08	0.08	00:05	00 03:10
2005-08-21 04:35	0.13	0.13	0.13	00:05	00 01:40
2005-08-21 07:05	0.08	0.08	0.08	00:05	00 02:35
2005-08-21 12:50	4.60	0.29	2.20	01:20	00 05:50
2005-08-21 20:50	2.50	2.50	2.50	00:05	00 06:50
2005-08-22 03:45	0.10	0.10	0.10	00:05	00 07:00
2005-08-28 08:10	4.25	0.06	0.50	05:55	06 04:30
2005-08-28 20:40	0.20	0.10	0.10	00:10	00 06:45
2005-08-28 23:10	2.20	0.20	0.70	00:55	00 02:30
2005-08-30 19:55	11.05	0.31	5.40	03:00	01 20:00
2005-08-31 00:30	7.80	1.56	3.70	00:25	00 01:45
2005-08-31 05:05	0.20	0.20	0.20	00:05	00 04:20
2005-08-31 06:40	82.95	0.45	2.40	15:20	00 01:40
TOTAL	160.06				

Septembre 2005					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2005-09-01 04:40	0.10	0.10	0.10	00:05	00 00:00
2005-09-02 18:05	5.65	0.81	1.70	00:35	01 13:30
2005-09-02 23:00	0.10	0.10	0.10	00:05	00 04:30
2005-09-08 02:00	0.13	0.13	0.13	00:05	05 03:05
2005-09-08 11:20	0.41	0.07	0.13	00:30	00 09:25
2005-09-08 15:25	8.70	0.18	0.60	04:00	00 03:45
2005-09-09 01:45	0.88	0.04	0.30	01:55	00 06:30
TOTAL	15.97				
Total estival	438.76				

Tableau A3 : Statistiques de la série pluviométrique de l'été 2006

Mai 2006					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh :mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh :mm)
2006-05-16 01:05	0.35	0.700	2.000	00:25	01 01:05
2006-05-16 14:05	3.44	1.215	4.800	02:50	00 12:30
2006-05-17 08:00	0.47	0.933	2.000	00:30	00 15:05
2006-05-17 14:00	1.62	0.571	2.400	02:50	00 05:30
2006-05-19 04:30	2.34	0.826	3.000	02:50	01 11:40
2006-05-19 16:25	3.61	2.062	3.600	01:45	00 09:05
2006-05-19 20:10	0.33	0.488	2.400	00:40	00 02:00
2006-05-20 00:05	0.82	0.817	3.000	01:00	00 03:15
2006-05-20 06:30	1.00	0.500	1.200	02:00	00 05:25
2006-05-20 14:55	2.08	0.958	2.400	02:10	00 06:25
2006-05-20 20:45	1.38	0.337	2.000	04:05	00 03:40
2006-05-21 15:25	1.21	0.274	2.400	04:25	00 14:35
2006-05-21 23:30	0.61	0.730	1.500	00:50	00 03:40
2006-05-22 12:55	0.18	1.100	1.200	00:10	00 12:35
2006-05-24 14:15	5.81	2.904	25.200	02:00	02 01:10
2006-05-25 09:05	0.60	0.212	2.000	02:50	00 16:50
2006-05-26 15:25	3.42	1.051	6.000	03:15	01 03:30
2006-05-27 10:10	0.17	2.000	2.000	00:05	00 15:30
2006-05-29 13:10	0.83	3.333	7.000	00:15	02 02:55
2006-05-30 10:35	4.92	2.034	6.000	02:25	00 21:10
2006-05-31 03:25	5.58	1.968	4.800	02:50	00 14:25
2006-05-31 19:15	3.27	1.960	6.000	01:30	00 13:10
TOTAL	44.00				

Juin 2006					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh :mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh :mm)
2006-06-01 02:10	1.18	1.014	3.000	01:10	00 05:15
2006-06-03 10:05	3.28	0.555	2.400	05:55	02 06:45
2006-06-08 19:35	0.10	1.200	1.200	00:05	05 03:35
2006-06-08 22:25	0.30	0.327	1.200	00:55	00 02:45
2006-06-09 03:50	0.10	1.200	1.200	00:05	00 04:30
2006-06-09 07:55	1.01	0.018	0.125	04:35	00 03:40
2006-06-09 18:00	0.20	0.065	1.200	03:05	00 05:50
2006-06-10 01:00	8.11	0.402	2.400	20:10	00 03:55
2006-06-11 04:00	0.10	1.200	1.200	00:05	00 06:50
2006-06-11 09:40	4.63	1.236	9.000	03:45	00 05:35
2006-06-11 18:45	0.20	0.800	1.200	00:15	00 05:20
2006-06-12 17:50	2.35	9.400	15.000	00:15	00 22:50
2006-06-17 04:45	1.30	0.624	9.600	02:05	04 10:40
2006-06-19 14:00	3.60	21.600	42.000	00:10	02 07:10
2006-06-19 17:25	2.97	2.543	4.800	01:10	00 03:15
2006-06-20 12:05	0.59	1.183	2.400	00:30	00 17:30
2006-06-20 14:55	4.95	3.494	18.000	01:25	00 02:20
2006-06-22 08:20	2.41	0.567	4.800	04:15	01 16:00
2006-06-22 20:55	0.93	1.009	2.400	00:55	00 08:20
2006-06-26 23:05	25.19	1.913	15.600	13:15	04 01:15
2006-06-28 04:55	0.53	0.630	1.500	00:50	00 16:35
2006-06-28 08:15	3.83	0.765	7.200	05:00	00 02:30
2006-06-29 19:25	4.23	16.900	31.200	00:15	01 06:10
2006-06-30 11:20	16.03	4.094	44.400	03:55	00 15:40

TOTAL

88.11

Juillet 2006					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2006-07-01 02:35	0.90	0.101	2.400	08:55	00 11:20
2006-07-02 02:00	9.62	1.131	6.000	08:30	00 14:30
2006-07-04 04:55	7.30	29.200	46.800	00:15	01 18:25
2006-07-04 19:40	4.83	1.414	15.600	03:25	00 14:30
2006-07-05 17:40	2.00	8.000	19.200	00:15	00 18:35
2006-07-09 23:45	3.00	36.000	36.000	00:05	04 05:50
2006-07-10 18:25	1.20	4.800	6.000	00:15	00 18:35
2006-07-15 16:15	3.66	2.311	28.500	01:35	04 21:35
2006-07-17 19:45	6.32	8.42	27.60	00:45	02 01:55
2006-07-17 23:00	23.49	1.729	52.800	13:35	02 05:10
2006-07-21 01:35	13.77	4.859	37.200	02:50	02 13:00
2006-07-22 18:30	5.81	0.494	3.600	11:45	01 14:05
2006-07-23 10:50	0.10	1.200	1.200	00:05	00 04:35
2006-07-23 19:30	0.30	0.514	1.200	00:35	00 08:35
2006-07-24 09:00	5.27	2.875	6.000	01:50	00 12:55
2006-07-25 03:25	6.70	0.664	4.800	10:05	00 16:35
2006-07-27 04:50	10.00	8.000	25.200	01:15	01 15:20
2006-07-27 19:10	11.96	1.864	36.000	06:25	00 13:05
TOTAL	116.22				

Août 2006					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2006-08-01 05:40	0.10	1.200	1.200	00:05	04 04:15
2006-08-01 16:00	1.83	0.846	7.500	02:15	00 10:25
2006-08-01 20:30	7.97	8.691	40.800	00:55	00 02:25
2006-08-04 01:00	0.50	6.000	6.000	00:05	02 03:45
2006-08-04 14:40	5.28	2.264	15.600	02:20	00 13:45
2006-08-05 08:45	0.10	1.200	1.200	00:05	00 15:55
2006-08-07 20:30	1.30	3.120	8.400	00:25	02 11:50
2006-08-10 03:25	7.08	1.179	3.600	06:00	02 06:40
2006-08-10 14:30	0.92	5.500	9.000	00:10	00 05:10
2006-08-10 16:35	1.90	5.700	12.000	00:20	00 02:00
2006-08-12 11:15	0.70	1.400	4.800	00:30	00 00:00
2006-08-13 00:05	5.50	66.000	66.000	00:05	00 12:30
2006-08-14 16:55	0.10	1.200	1.200	00:05	01 16:55
2006-08-15 00:40	1.10	1.100	8.400	01:00	00 07:50
2006-08-15 13:20	7.73	1.972	26.400	04:00	00 11:50
2006-08-20 16:25	20.03	1.299	8.400	15:25	04 23:15
2006-08-22 13:45	2.60	31.200	31.200	00:05	01 06:05
2006-08-27 12:25	14.55	0.824	10.800	17:40	04 22:45
2006-08-29 23:20	0.10	1.200	1.200	00:05	01 17:25
TOTAL	79.38				

Septembre 2006					
Événement	Hauteur totale (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Intensité max. (mm/h)	Durée (hh:mm)	Temps sec avant la pluie (jj hh:mm)
2006-09-03 14:25	8.13	0.424	6.000	19:10	04 15:00
2006-09-04 17:20	0.40	0.533	1.200	00:45	00 07:45
2006-09-05 00:10	0.10	1.200	1.200	00:05	00 06:05
2006-09-05 05:40	0.10	1.200	1.200	00:05	00 05:25
2006-09-08 10:10	1.10	2.640	4.800	00:25	03 04:25
2006-09-08 19:35	10.93	4.521	20.400	02:25	00 09:00
2006-09-09 05:05	14.24	1.124	12.000	12:40	00 07:05
2006-09-10 02:55	0.10	1.200	1.200	00:05	00 09:10
2006-09-14 10:15	0.10	1.200	1.200	00:05	04 07:15
2006-09-14 16:10	0.40	1.200	2.400	00:20	04 13:10

TOTAL 35.60
Total estival 363.31