

Optimisation de la gestion d'un bassin de rétention d'eaux pluviales

Gaborit, E.¹, Anctil, F.¹ et Vanrolleghem, P.A.²

1. Chaire de recherche EDS en prévisions et actions hydrologiques, Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval, 1065 Avenue de la Médecine, Québec, Qc, G1V 0A6, Canada.

2. modelEAU, Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval, 1065 Avenue de la Médecine, Québec, Qc, G1V 0A6, Canada.

Correspondance: Étienne Gaborit

Courriel: Etienne.Gaborit.1@ulaval.ca

Mots-clefs: bassin de rétention; CTR; enlèvement des MES; gestion du ruissellement urbain; prévisions de pluie; réduction du stress hydraulique.

Introduction

Les surfaces imperméables des zones urbaines augmentent la vitesse et le volume de l'eau de ruissellement par rapport à l'état naturel (Booth et Jackson 1997, Marsalek 2005, Wenger *et al.* 2009), ce qui conduit à une augmentation des crues et de l'érosion dans les cours d'eau récepteurs (Walsh 2000). En ruisselant en milieu urbain, l'eau se charge de plus en Matières En Suspension (MES) sur lesquelles sont adsorbés de nombreux polluants (Ellis et Marsalek 1996).

Dans les quartiers urbains récents où des réseaux d'égouts séparatifs sont présents, des bassins de rétention "secs" (Stanley 1996, Papa *et al.* 1999) sont parfois installés pour atténuer ces problèmes. Ces bassins de rétention permettent de limiter les chocs hydrauliques imposés par l'urbanisation sur le cours d'eau accueillant son ruissellement en contrôlant la manière dont ce ruissellement est retourné au milieu récepteur. Leur gestion repose actuellement sur une limitation fixe de leur débit de sortie maximal (contrôle statique, voir Middleton et Barrett 2008).

Ainsi, lorsqu'un évènement pluvieux engendre un débit d'entrée au bassin supérieur à cette limitation, le ruissellement est temporairement stocké dans la structure de rétention, ce qui permet de surcroît une réduction du volume de l'eau de ruissellement (grâce à l'infiltration dans le bassin), ainsi qu'une amélioration de la qualité de l'eau due à la décantation ayant lieu dans le bassin pendant le stockage de l'eau, ce qui permet une diminution de la charge en MES (et donc de polluants) larguée dans l'environnement..

Ce travail explore diverses stratégies de contrôle en temps réel (CTR) d'une vanne qui permet de varier le débit de sortie d'un bassin de rétention situé près de la Ville de Québec (et

qui possède à l'heure actuelle un taux d'enlèvement des MES de 50%). Le but est d'optimiser ses performances en maximisant le temps de rétention de l'eau dans le bassin et en la relâchant doucement de manière à éviter les chocs hydrauliques dans la rivière en aval, tout en évitant le débordement du bassin.

Les données disponibles pour effectuer ce travail et le site à l'étude sont décrites dans un premier temps, avant la description des règles de gestion élaborées. Les performances des différents scénarios sont ensuite présentées, pour finalement exprimer les principales conclusions et perspectives découlant de cette étude.

Méthodologie

a) site à l'étude

Le bassin de rétention Chauveau est installé à l'exutoire d'un petit bassin versant urbain résidentiel de densité moyenne (917 habitants répartis sur 15 ha) situé dans l'agglomération de la Ville de Québec (Canada). Cette zone résidentielle comporte environ 33% de surfaces imperméables, a une pente d'environ 3.5% et est munie d'un réseau d'égouts séparatifs: les eaux usées sont acheminées vers une usine de traitement alors que l'eau de ruissellement est convoyée vers le bassin de rétention avant son retour à la rivière Saint-Charles. Le bassin de rétention a un volume de 4000 m³ et un débit de sortie maximal de 0.35 m³/s, ce qui lui permettrait d'accueillir un évènement pluvieux d'une durée de 1 h et de période de retour 100 ans. La hauteur maximale de l'eau dans le bassin avant son débordement est de 1.65m.

b) données disponibles

Afin de tester les règles de gestion en temps réel développées ici, une modélisation quantitative et qualitative du ruissellement qui alimente ce bassin de rétention, ainsi qu'une modélisation du bassin de rétention lui-même, ont été effectuées à l'aide du logiciel SWMM5 (EPA 2008).

Les données nécessaires à la calibration et validation du modèle SWMM5 ont été récoltées au cours de 15 campagnes de mesures (chacune d'une durée de plusieurs heures) effectuées pendant les étés 2008 à 2010 par Vallet (2011) et Carpenter *et al.* (Soumis). Sur ces 15 campagnes, 10 ont été menées avec la vanne de sortie du bassin complètement ouverte

(comportement statique actuel) et 5 avec la vanne complètement fermée. Les données récoltées consistent essentiellement en des données de débit et de concentration en MES à l'entrée et à la sortie du bassin de rétention, ainsi qu'en des mesures de hauteur d'eau et de concentration en MES dans le bassin, avec un pas de temps pour ces données de 1 min pour les débits et entre 2 et 30 min pour les autres. Un pluviomètre de la Ville de Québec situé à moins de 1 km du bassin présente les mesures de pluie au pas de temps de 5 min pendant les périodes estivales, depuis 1999.

La courbe décrivant le volume d'eau du bassin en fonction de la hauteur d'eau dans ce dernier est précisément connue, ainsi que les propriétés géométriques des rues et du système d'égouts pluvial de cette zone urbaine.

c) simulation quantitative du ruissellement

Les paramètres hydrologiques du modèle SWMM5 mis en place ont été calibrés avec des données de débit mesuré à la sortie du bassin de rétention pendant les campagnes de mesure avec la vanne de sortie complètement ouverte. La calibration a été effectuée automatiquement à l'aide du logiciel "BlueM.opt" (Muschalla *et al.*, 2009), en utilisant l'algorithme d'optimisation de Hooke et Jeeves (1961) et le critère de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) comme fonction objectif. Les valeurs du nombre de Nash sont respectivement de 0.98 et 0.91, pour les périodes de calibration (15 au 19 juillet 2010) et validation (29 septembre au 1^{er} octobre 2009, voir figure 1). L'évaporation ayant lieu dans le bassin de rétention a été fixée à 2 mm/jour, et les paramètres de la fonction de Green-Ampt utilisée pour représenter l'infiltration dans le bassin de rétention ont été ajustés à l'aide des hauteurs d'eau mesurées dans le bassin lorsque sa sortie était fermée (figure 2).

d) simulation qualitative du ruissellement

La simulation de la qualité de l'eau de ruissellement a consisté en la simulation de la concentration en MES entrant dans le bassin de rétention par lessivage des surfaces de la zone urbaine, et en la simulation du processus de sédimentation ayant lieu dans le bassin de rétention. Les MES représentent le polluant principal de l'eau de ruissellement et sont un très bon indicateur de sa qualité globale (Papa *et al.* 1999). La simulation de la concentration en MES entrant dans le bassin repose ici sur la fonction d'accumulation dite "puissance" telle que définie

par Hossain *et al.* (2010), et sur une version modifiée de la fonction de lessivage dite "exponentielle" du modèle SWMM5. Cette version modifiée est définie par les équations (1) et (2) ci-dessous:

$$W = E1 q B C \quad (1)$$

où

$$C = 1 - (1 / (1 + (q/d)^{100})) \quad (2).$$

W est la quantité de polluant lessivé (kg/km²/h), $E1$ est le coefficient de lessivage, q est le taux de ruissellement par unité d'aire (mm/h), B est la quantité de polluant accumulé (kg/km²) (calculée par la fonction d'accumulation "puissance") et d est une valeur seuil de ruissellement par unité d'aire (mm/h). Cette formulation modifiée de la fonction de lessivage implique qu'il n'y a aucun lessivage de MES si le ruissellement est sous la valeur seuil définie par d dans l'équation (2), et que la quantité lessivée revient à utiliser l'équation (1) sans la variable C dès que q est supérieur à d dans l'équation (2). Six classes de MES différentes, avec chacune leurs paramètres distinctifs dans les équations d'accumulation et de lessivage et possédant de plus leur propre vitesse de sédimentation, ont été utilisées pour effectuer la simulation des MES totales de l'eau de ruissellement de ce bassin urbain. Les paramètres de chaque classe ont été calibrés sur quelques évènements de 2009. La simulation des MES a été validée avec les autres évènements mesurés de 2009 et ceux de 2010. Un exemple de simulation des MES est montré à la figure 3. Les vitesses de sédimentation de chaque classe ont été attribuées en calculant le pourcentage des MES totales représenté par chaque classe dans le modèle (à l'issue d'une simulation continue sur les étés 2009 et 2010, avec les paramètres calibrés des fonctions d'accumulation et de lessivage), et en supposant une distribution des vitesses de sédimentation des MES identique à celle identifiée par l'étude du Ministère de l'Environnement et de l'Énergie (MOEE 1994), reposant sur le programme "NURP" (EPA 1983).

e) règles de contrôle en temps réel (CTR) développées

Bien que le CTR ait fait l'objet de nombreuses études dans le contexte de réseau d'égouts unitaires, seules quelques études ont été identifiées dans la littérature sur le CTR de bassins de rétention d'eaux pluviales, soit les travaux de McCarthy (1994), Jacopin *et al.* (2001), Middleton et Barrett (2008), et de Muschalla *et al.* (2009). L'étude de ces travaux a permis d'identifier

certaines lacunes dans leurs règles de gestion, qui ont été rectifiées lors du développement des règles élaborées ici, ainsi que certains objectifs importants à remplir afin de parvenir à optimiser les performances d'un bassin de rétention, qui peuvent être résumés ainsi:

- Maximiser le temps de détention de l'eau dans le bassin tout en évitant son débordement.
- Le ruissellement doit commencer à être stocké dans le bassin dès le début de l'évènement pluvieux, car le premier ruissellement est généralement très chargé en MES.
- Essayer de vidanger le bassin le plus doucement possible s'il n'y a pas d'alerte de sécurité concernant le niveau d'eau, afin de minimiser l'érosion et les chocs hydrauliques induits dans la rivière en aval.
- Respecter un temps maximum de 4 jours avec de l'eau accumulée dans le bassin, afin de limiter le risque de développement de moustiques (Knight *et al.* 2003).

Des scénarios de CTR reposant sur la connaissance en tout instant de la hauteur d'eau dans le bassin et sur la détection de la pluie ont d'abord été développés, en allant progressivement du moins vers le plus complexe. Les règles de ces différents scénarios sont présentées à la figure 4. Sur cette figure, les règles sont présentées par ordre de priorité décroissante. Le scénario dit "évolué C" a également été élaboré. Il consiste en le scénario dit "évolué B" montré à la figure 4, avec en plus une règle relative au temps maximal de 4 jours passé avec une accumulation d'eau dans le bassin. Cette règle spécifie simplement une ouverture de la vanne de sortie de plus en plus grande (entre 20 et 100%) à mesure que le temps passé avec de l'eau accumulée se rapproche de la limite de 4 jours. Son degré de priorité est situé entre les règles R1 et R2 de la figure 4, et cette règle est nommée R10 sur la figure 5, qui présente une comparaison de l'évolution de la hauteur d'eau dans le bassin sous l'influence des scénarios de gestion statique actuel et de CTR dit "évolué C".

Finalement, l'inclusion de prévisions météorologiques de pluie comme information supplémentaire sur laquelle reposent les règles de gestion a été effectuée de manière à permettre une anticipation des épisodes de débordement. Il est en effet attendu que cette information puisse renforcer la sécurité liée au risque de débordement en permettant une vidange préventive du bassin afin de libérer le volume d'eau nécessaire à l'accueil de l'évènement pluvieux prévu comme étant problématique. Pour cela, la prévision de la quantité de pluie prévue dans les prochaines 24 h est considérée. Le volume d'eau correspondant est estimé grâce au coefficient de ruissellement du bassin, analysé avec les simulations de plusieurs évènements pluvieux très

variés. Ce coefficient est relativement stable et sa valeur est environ de 40%. Si ce volume d'eau prévu, additionné au volume actuel dans le bassin, dépasse la capacité maximale de stockage, alors le volume en excès (qui doit donc être évacué avant l'évènement prévu) est connu également. La vitesse de vidange finalement choisie au travers du pourcentage d'ouverture de la vanne de sortie dépend du temps qu'il reste avant l'évènement pluvieux prévu, connu également grâce aux prévisions météorologiques. Le scénario incluant les prévisions météorologiques de pluie comme information supplémentaire est nommé "Futur C" dans le tableau 1. Ses règles consistent en les règles du scénario "Évolué C", avec en plus les règles considérant les prévisions.

Résultats

Les résultats sont présentés au tableau 1. Les critères utilisés consistent en le taux d'enlèvement des MES (à maximiser), le nombre d'heures passé avec un débit supérieur à 0.06 et 0.15 m³/s (à minimiser), et le nombre de débordements (à restreindre à 0). Ces critères ont été calculés en réalisant des simulations continues sur 6 étés consécutifs (plus de 1000 jours de simulation) de 2005 à 2010.

Les résultats indiquent que le CTR de ce bassin de rétention augmente considérablement ses performances: par rapport au contrôle statique actuel, le CTR a fait passer le pourcentage d'enlèvement des MES de 46 à 90%. La charge déversée dans le milieu récepteur a donc été diminuée d'un facteur 5 – de 54% à 10%. De plus, le CTR a conduit à une diminution des pics de débit à l'exutoire du bassin et a permis de minimiser le nombre d'opérations appliquées à la vanne, afin de réduire l'usure du système de gestion, et tout cela sans qu'il y ait un seul débordement du bassin sur cette période de simulation (Tableau 1). De plus, une limite maximale de rétention de l'eau de 4 jours dans le bassin a été respectée afin d'empêcher le développement potentiel de moustiques. Le scénario "Futur C", reposant sur de l'information prévisionnelle de pluie, a été réalisé ici avec des prévisions parfaites (construites à partir de hauteurs de pluie observée). Il a également été testé sur une période de 3 mois durant l'automne 2010 avec de véritables prévisions météorologiques provenant d'Environnement Canada. Cependant, la taille importante du bassin de rétention étudié ici ne conduisant à aucun débordement quel que soit le scénario mis en place, aucune conclusion précise sur l'intérêt réel de l'inclusion des prévisions de pluie dans les stratégies de gestion n'a pu être distinguée ici.

Conclusion

Les règles de CTR développées ici conduisent à une nette amélioration des performances du bassin de rétention étudié par rapport à son contrôle statique appliqué dans la réalité à l'heure actuelle. Le taux d'enlèvement des MES passe notamment de 46 à 90%. Ces règles sont facilement transférables à d'autres bassins de rétention du même type, le but ultime étant d'effectuer une gestion intégrée performante de tous les bassins de rétention d'eaux pluviales de la Ville de Québec. Il est prévu de ré-effectuer ce travail avec un bassin de rétention ayant un volume plus petit (et donc un débordement plus fréquent), afin de mieux distinguer l'intérêt des prévisions météorologiques dans ce contexte de gestion en temps réel.

Remerciements

Les auteurs remercient le CRSNG et Mitacs/Mprime pour leur support financier, et la Ville de Québec ainsi qu'Environment Canada pour les données fournies. Peter A. Vanrolleghem est titulaire de la Chaire de recherche du Canada en modélisation de la qualité de l'eau.

Références

- Booth, D.B. et Jackson, C.R. 1997. Urbanization of aquatic systems: degradation thresholds, stormwater detection, and the limits of mitigation. *Journal of the American Water Resources Association*, 33, 1077-1090. Doi: 10.1111/j.1752-1688.1997.tb04126.x
- Carpenter, J.F., Vallet, B., Pelletier G., Lessard P. et Vanrolleghem, P.A. (soumis). Evaluation of the removal efficiency of a retrofitted stormwater detention pond. *J. Environ. Eng.*
- Ellis, J.B. et Marsalek, J. 1996. Overview of urban drainage: environmental impacts and concerns, means of mitigation and implementation policies. *Journal of Hydraulic Research*, 34 (6), 723-732. Doi: 10.1080/00221689609498446
- Environmental Protection Agency (EPA). 1983. Results of the nationwide urban runoff program. Vol. I, Final Rep., Water Planning Division, Washington, D.C.
- Environmental Protection Agency (EPA). 2008. Storm Water Management Model (SWMM), Version 5.0. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.
- Hooke, R. et Jeeves, T.A. 1961. Direct search solution of numerical and statistical problems. *Journal of Association of Computational Machinery*, 8 (2), 212-229. Doi: 10.1145/321062.321069
- Hossain, I., Imteaz, M.A., Gato-Trinidad, S. et Shanableh, A. 2010. Development of a

catchment water quality model for continuous simulations of pollutants build-up and wash-off. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2 (4), 210–217.

Jacopin, C., Lucas, E., Desbordes, M. et Bourgoigne, P. 2001. Optimisation of operational management practices for the detention basins. *Water Science & Technology*, 44 (2-3), 277-285.

Knight R.L., Walton, W.E., O'Meara, G.F., Reisen, W.K., et Wass, R. 2003. Strategies for effective mosquito control in constructed treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 21, 211–232. Doi:10.1016/j.ecoleng.2003.11.001

Marsalek, J. 2005. Evolution of urban drainage: from cloaca maxima to environmental sustainability. Paper presented at Acqua e Citta`, I Convegno Nazionale di Idraulica Urbana, Cent. Stud. Idraul. Urbana, Sant'Agello di Sorrento, Italy, 28– 30 Sept.

McCarthy, E.J. 1994. Stormwater control system. U.S. Patent 5,342,144. Filed November 2, 1992. Issued August 30, 1994.

Middleton, J.R. et Barrett, M.E. 2008. Water quality performance of a batch-type stormwater detention basin. *Water Environment Research*, 80 (2), 172-178(7). Doi: <http://dx.doi.org/10.2175/106143007X220842>

Ministry of Environment and Energy (MOEE). 1994. Stormwater management practices planning and design manual. ISBN 0-7778-2957-6, MOEE, Toronto, Ontario.

Muschalla, D., Pelletier, G., Berrouard, É., Carpenter, J.-F., Vallet, B. et Vanrolleghem, P.A. (2009). Ecohydraulic-driven real-time control of stormwater basins. In: Proceedings 8th International Conference on Urban Drainage Modelling (8UDM). Tokyo, Japan, September 7-11 2009.

Muschalla, D., Froehlich, F., Heusch, S., Hübner, C., Kerber, D., Reußner, F. et Ostrowski, M. 2009. BlueM.Opt - a generic framework for simulation based optimization. Paper presented at the International Stormwater and Urban Water Systems Modeling Conference, Toronto, Canada, February 19.

Nash, J.E. et Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290.

Papa, F., Adams, B. et Guo, Y. 1999. Detention time selection for stormwater quality control ponds. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 26 (1), 72-82. Doi: 10.1139/198-046

Stanley, D.W. 1996. Pollutant removal by a stormwater dry detention pond. *Water Environment Research*, 68 (6), 1076-1083.

Vallet, B. 2011. Modélisation d'un bassin d'orage en vue de l'amélioration de la qualité des rivières par la gestion en temps réel. Thesis (PhD). Civil Engineering and Water Engineering

Dept., Université Laval, Québec, QC, Canada.

Walsh, C.J. 2000. Urban impacts on the ecology of receiving waters: a framework for assessment, conservation and restoration. *Hydrobiologia*, 431, 107–114. Doi: 10.1023/A:1004029715627

Wenger, S.J., Roy, A.H., Rhett Jackson, C., Bernhardt, E.S., Carter, T.L., Filoso, S., Gibson, C.A., Cully Hession, W., Kaushal, S.S., Martí, E., Meyer, J.L., Palmer, M.A., Paul, M.J., Purcell, A.H., Ramírez, A., Rosemond, A.D., Schofield, K.A., Sudduth, E.B. et Walsh, C.J. 2009. Twenty-six key research questions in urban stream ecology: an assessment of the state of the science. *Journal of the North American Benthological Society*, 28 (4), 1080-1098. Doi: <http://dx.doi.org/10.1899/08-186.1>

Tableau 1: Performances des différents scénarios de CTR étudiés. Q: débit de sortie du bassin de rétention;

	Static 1	Basique	Evolué A	Evolué B	Evolué C	Futur C
Enlèvement des MES (%)	46	88	90	93	88	87
Q > 0.06m ³ /s (h)	251	457	42	31	202	207
Q > 0.15m ³ /s (h)	66	18	16	6	9	23
Débordements (h)	0	0	0	0	0	0
Nombre d'opérations	0	16197	6407	1368	1451	3111

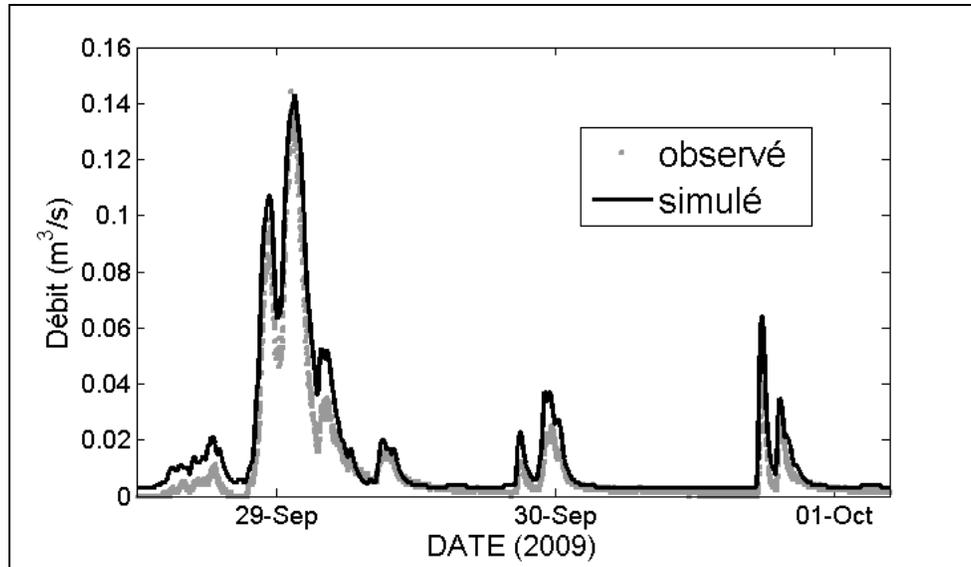


Figure 1: Débits de sortie observés et simulés du bassin de rétention, pendant des campagnes de mesure réalisées avec la vanne de sortie complètement ouverte (période de validation du modèle hydrologique).

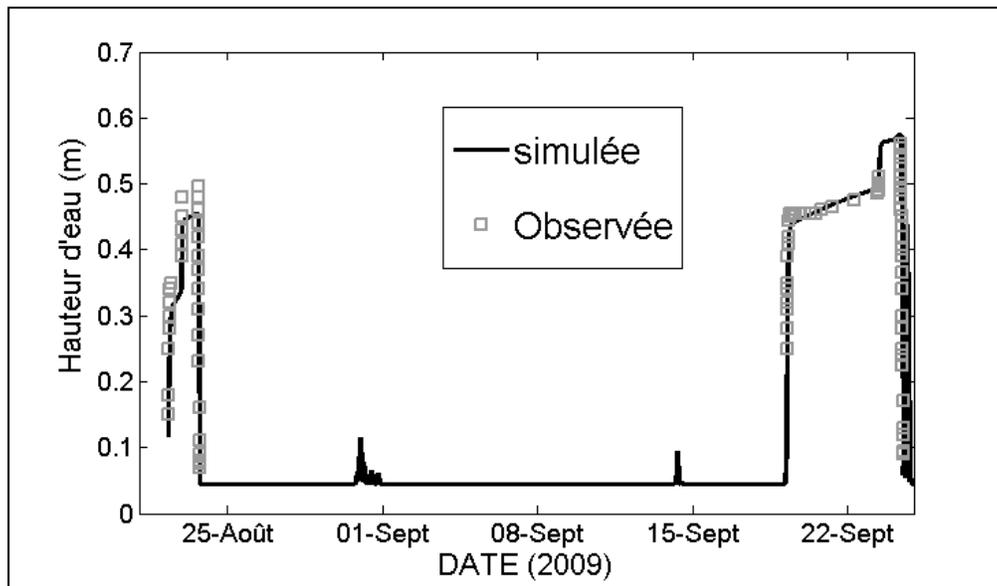


Figure 2: Hauteurs d'eau simulées et observées dans le bassin de rétention pendant 2 campagnes de mesure avec la vanne de sortie fermée (période de validation de la fonction d'infiltration calibrée).

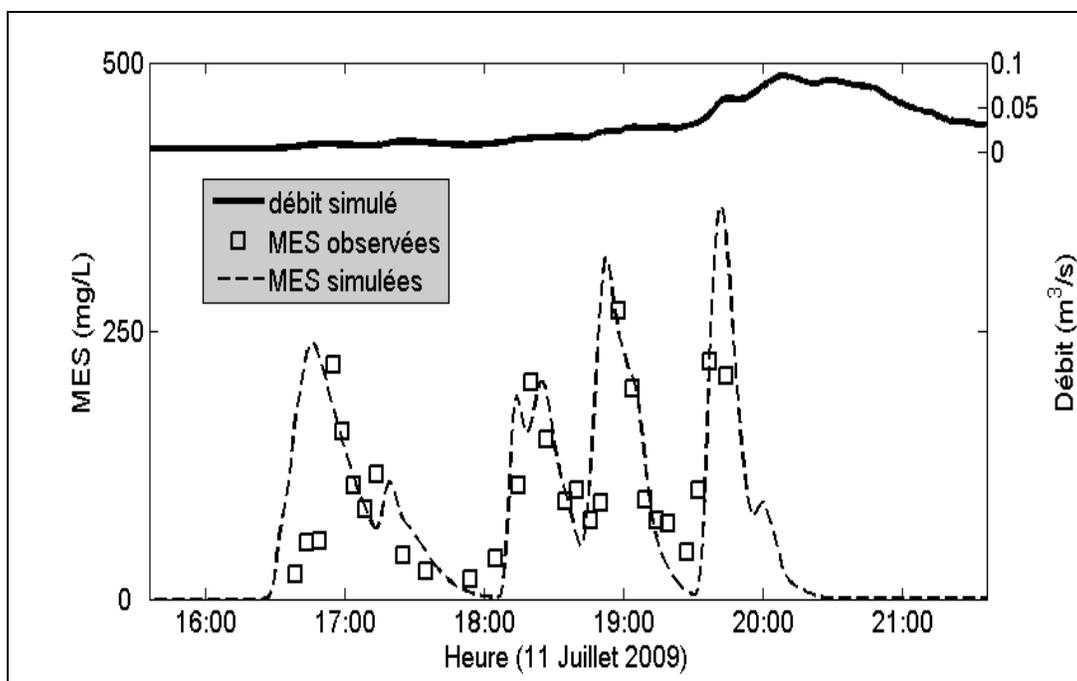


Figure 3: MES observées et simulées à l'entrée du bassin de rétention pour l'une des périodes de calibration de l'année 2009.

Basique	Evolué A
Si Hauteur d'eau ≥ 1.4 m Alors ouv. vanne = 100	R1 Si hauteur d'eau ≥ 1.55 m Alors ouv. vanne = 100
Si Pluie > 0 mm et $1.2 \leq$ hauteur d'eau ≤ 1.4 m Alors ouv. vanne = 20	R2 Si Pluie > 0.0 mm et $1.4 \leq$ Hauteur d'eau ≤ 1.5 m Alors ouv. vanne = 20
Si Pluie > 0 mm Alors ouv. vanne = 0	R3 Si Pluie = 0.0 mm et $1.4 \leq$ Hauteur d'eau ≤ 1.5 m Alors ouv. vanne = 10
Evolué B = Evolué A +:	R4 Si Pluie > 0.0 mm et $1.25 \leq$ Hauteur d'eau ≤ 1.35 m Alors ouv. vanne = 10
R7 Si $30 \text{ min} < \text{TPS DET} < 30\text{h}$ et Hauteur d'eau ≤ 1.35 m Alors ouv. vanne = 0	R5 Si Pluie > 0.0 mm et Hauteur d'eau < 1.20 m Alors ouv. vanne = 0
R8 Si TPS DET $> 60\text{h}$ Alors ouv. vanne = 10	R6 Si Pluie = 0.0 mm et $1.25 \leq$ Hauteur d'eau ≤ 1.35 m Alors ouv. vanne = 5
R9 Si TPS DET $> 48\text{h}$ Alors ouv. vanne = 5	

Figure 4: Règles des trois premiers scénarios de CTR développés dans cette étude. ouv. vanne: pourcentage d'ouverture de la vanne de sortie; TPS DET : temps de détention.

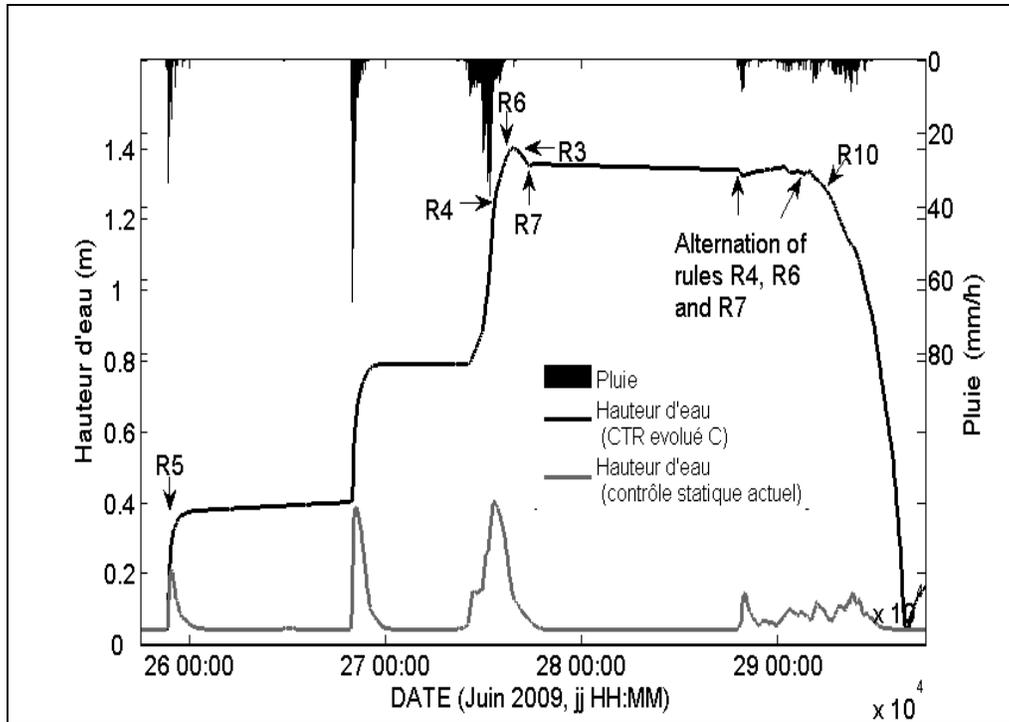


Figure 5: Hauteurs d'eau simulées dans le bassin de rétention sous le scénario de CTR "évolué C" (figure 4), et celui correspondant au contrôle statique actuel. Les règles de gestion prises dans le scénario "évolué C" sont également représentées. Leur description est donnée à la figure 4.