

Évaluation pour les événements pluvieux fréquents d'un modèle hydrologique utilisé en assainissement urbain

■ A.-L. LE DELLIU¹, E. BERTHIER²

Mots clés : hydrologie urbaine, modélisation, ruissellement, SWMM

1. Introduction

L'étude des bassins-versants urbanisés a débuté au cours des années 1970 [BRATER, 1968 ; HALL, 1984 ; DESBORDES, 1987] et était principalement centrée sur les événements pluvieux intenses (BERTHIER, 1998). Cependant, les données ayant montré que les bassins-versants réagissent de manière plus complexe que prévu aux précipitations courantes, il est apparu nécessaire d'effectuer des études lors des événements modérés et sur des chroniques de longue durée.

L'étude des bassins-versants urbains s'est concrétisée par la mise au point de modèles dont s'inspirent les principaux logiciels tels CANOE [INSAVALOR et SOGREA, 1997], MOUSE [DHI, 1998], ou HYDROWORKS [WALLINGFORD, 1997] et le logiciel que nous utiliserons dans cette étude : le « Storm Water Management Model » (SWMM) [HUBERT et DICKINSON, 1988] réalisé par l'Environmental Protection Agency américaine (US-EPA). Il permet d'établir sur des périodes variables les bilans quantitatifs et qualitatifs des rejets au niveau de l'exutoire des réseaux d'assainissement et leurs fréquences.

Cette étude consiste à tester la fonction de production du logiciel. Pour cela, les formules permettant le calcul du ruissellement initialement prévues par les

concepteurs du logiciel ont été modifiées afin d'appliquer celles qui sont les plus couramment utilisées en France. Le logiciel ainsi modifié est testé sur un bassin-versant expérimental du Laboratoire central des Ponts et Chaussées afin de vérifier ses capacités à reproduire les différentes caractéristiques des débits fréquents en vue d'une utilisation dans le dimensionnement d'ouvrages et dans la gestion des réseaux d'assainissement.

2. Données nécessaires au modèle

2.1. Caractéristiques du bassin-versant

Le logiciel pluie-débit EPA SWMM est évalué sur le bassin-versant de Rezé qui fut instrumenté entre le mois d'août 1991 et la fin 2001 en mesures de pluie et de débit. Ce bassin-versant rectangulaire de 550 m de long et 400 m de large présente une dénivellation maximale de 11,5 m pour des pentes n'excédant pas quelques pourcents. Ce bassin-versant est subdivisé en deux zones de 4,7 et 13,4 ha. Dans la suite de cette étude, nous utiliserons uniquement les données concernant le grand bassin-versant nommé P13. Celui-ci est équipé d'un réseau d'assainissement de type séparatif d'une longueur de 1 710 m permettant une délimitation en cinq sous-bassins versants homogènes. L'habitat y est principalement de type pavillonnaire avec un quart de type collectif pour un coefficient d'imperméabilisation de 39 %. L'acquisition des données hydrologiques est effectuée sur une longue durée de façon continue avec un pas de temps de 1 minute et l'intensité de la pluie est considérée comme égale à la moyenne de l'intensité de trois pluviomètres situés sur le bassin-versant (la variabilité

¹ Laboratoire central des Ponts et Chaussées, division "Eau et Environnement", route de Bouaye, BP 4129, 44341 Bouguenais Cedex - (Mél. : amelie-laure.ledelliou@lcpc.fr).

² Laboratoire régional de l'Ouest parisien, Direction régionale de l'équipement, 12 rue Teisserenc de Bort, 78190 Trappes-en-Yvelines (Mél. : emmanuel.berthier@equipement.gouv.fr).

spatiale de la pluie peut être négligée sur une superficie de 13 ha ; la combinaison de trois pluviomètres à auget permet une meilleure discrétisation des faibles intensités qui provoquent un nombre réduit de basculements). La mesure du débit est réalisée à l'exutoire du bassin-versant en amont d'un seuil jaugeur à l'aide d'une sonde de hauteur d'eau.

2.2. Étude statistique des données

Les chroniques de pluie et de débit disponibles au pas de temps de deux minutes permettent de réaliser une étude statistique des quantiles [MOSINI *et al*, 2000] pour des périodes de retour allant de 15 jours à 3 ans et pour des durées d'événements comprises entre 2 min et 24 h. L'estimation des quantiles est basée sur l'utilisation des fréquences empiriques des valeurs

maximales. Nous obtenons alors un échantillon de 80 données pour chacun des deux quantiles.

2.3. Analyse des événements pluvieux

L'étude des chroniques a permis de relever 1 779 événements qui ont engendré un écoulement à l'exutoire (2 événements sont séparés par au moins 15 min de temps sec ; pour plus de détails sur la méthodologie d'identification, voir [BERTHIER, 1998]). Au sein de ces événements, nous n'avons conservé que ceux dont nous possédions les données de pluie et de débit. Nous obtenons alors 1 739 événements dont 1 048 ont une hauteur de pluie supérieure à 2 mm et 393 supérieure à 5 mm. Il est alors possible de calculer la période de retour de ces événements par inter-

Période de retour	Durée de pluie									
	2 min	6 min	15 min	30 min	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
15 jours	0,4	0,8	1,4	2,0	2,8	3,9	4,8	5,9	7,3	9,2
1 mois	0,8	1,6	2,5	3,5	5,0	6,9	8,4	11,0	14,1	17,3
2 mois	1,2	2,6	3,8	5,3	7,3	9,6	11,6	15,5	19,9	24,2
3 mois	1,4	3,0	4,5	6,3	8,6	11,6	13,5	17,2	22,4	27,1
6 mois	1,8	3,8	5,8	8,4	10,8	13,9	15,2	20,1	26,6	32,8
1 an	2,1	5,2	7,6	10,7	13,0	16,2	18,4	22,2	29,6	36,8
2 ans	2,7	6,8	11,3	14,7	17,2	19,8	21,2	24,6	33,1	44,7
3 ans	3,4	7,7	11,9	15,4	19,6	21,2	21,8	26,4	34,9	52,8

Tableau I. Quantile des pluies sur le bassin-versant P13 (mm)

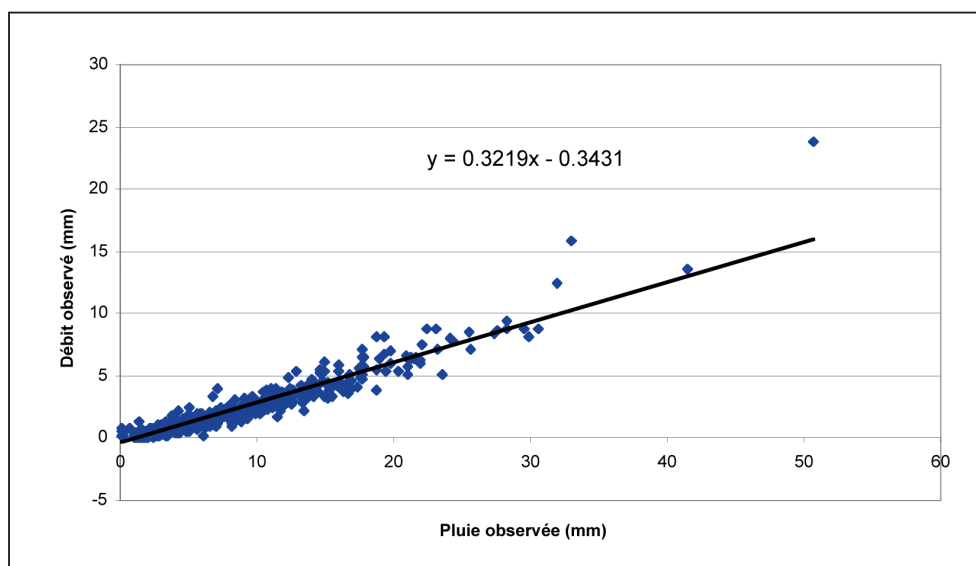


Figure 1. Cumul du débit observé par événement en fonction de la pluie observée pendant les événements pluvieux

Période de retour	Durée de débit										
	2 min	6 min	15 min	30 min	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h	
15 jours	0,0	0,1	0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	1,2	1,5	1,8	
1 mois	0,1	0,3	0,6	0,9	1,4	1,9	2,3	3,0	3,7	4,6	
2 mois	0,2	0,5	0,9	1,4	2,0	2,8	3,4	4,5	5,7	7,2	
3 mois	0,2	0,6	1,1	1,7	2,4	3,5	4,2	5,3	6,8	9,0	
6 mois	0,3	0,8	1,4	2,2	3,2	4,3	5,0	6,7	9,0	11,0	
1 an	0,4	1,0	2,0	3,0	4,0	4,9	5,6	7,8	10,5	14,5	
2 ans	0,6	1,6	2,9	4,0	4,6	6,5	7,2	8,7	11,7	16,9	
3 ans	0,6	1,8	3,6	4,4	6,0	7,0	7,5	9,0	12,9	18,0	

Tableau II. Quantile des débits sur le bassin-versant P13 (mm)

	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane
Durée (min)	14	1 524	137	100
Pluie totale (mm)	1	51	4	2
Intensité maximale à 2 min (mm/h)	2,1	111,7	12,1	8,2
Période de retour de l'intensité moyenne (mois)	0,5	36,0	2,4	0,9
Période de retour de l'intensité maximale (mois)	0,5	36,0	1,4	0,8
Débit total (m ³)	0,5	3 190,4	134,7	61,6
Débit maximal à 2 min (l/s)	0,3	933,9	53,1	29,2
Période de retour du débit moyen (mois)	0,5	36,0	2,1	0,8
Période de retour du débit maximal (mois)	0,5	29,4	1,5	0,8
Coefficient de ruissellement	0,004	0,555	0,194	0,195

Tableau III. Caractéristiques des 1 739 événements pluvieux

polation linéaire entre la durée et les quantiles observés de pluie et de débit.

2.4. Paramétrisation de la fonction de production du modèle

La production du débit est calculée pour chaque événement pluvieux et chaque sous-bassin versant avec un modèle de type pertes initiales (PI) – coefficient de (ruissellement Cr) constants :

- en début d'événement, le débit produit est nul tant que la hauteur cumulée de pluie reste inférieure à PI ;
- dès que la hauteur de pluie cumulée dépasse PI, alors le débit produit est égal à la pluie.

Le calage des paramètres PI et Cr est effectué globalement avec la droite de régression entre les volumes de pluie observés et les volumes de débit observés pendant les événements. Cette régression est effectuée sur tous les événements pluvieux (figure 1), sur les événements pluvieux supérieurs à 2 mm et sur ceux supérieurs à 5 mm (tableau IV).

Échantillon	Pertes Initiales	Coefficient de ruissellement
Tous les événements	1 mm	32,2 %
Événements > 2 mm	1,5 mm	33,5 %
Événements > 5 mm	2,6 mm	36,5 %

Tableau IV. Paramètres de calage en fonction de l'échantillon d'événements considéré

3. Objectif de dimensionnement

3.1. Confrontation des quantiles

La confrontation des quantiles montre que les débits simulés sont surestimés pour les faibles périodes de retour (15 jours) et sous-estimés pour la plupart des périodes de retour supérieures (figure 2).

Dans la première partie de ces courbes, pour des périodes de retour de 15 jours et pour des durées d'événement de plus d'une heure, nous avons une incertitude de mesure qui est liée à la loi hauteur débit au niveau du seuil à l'exutoire. Dans la dernière

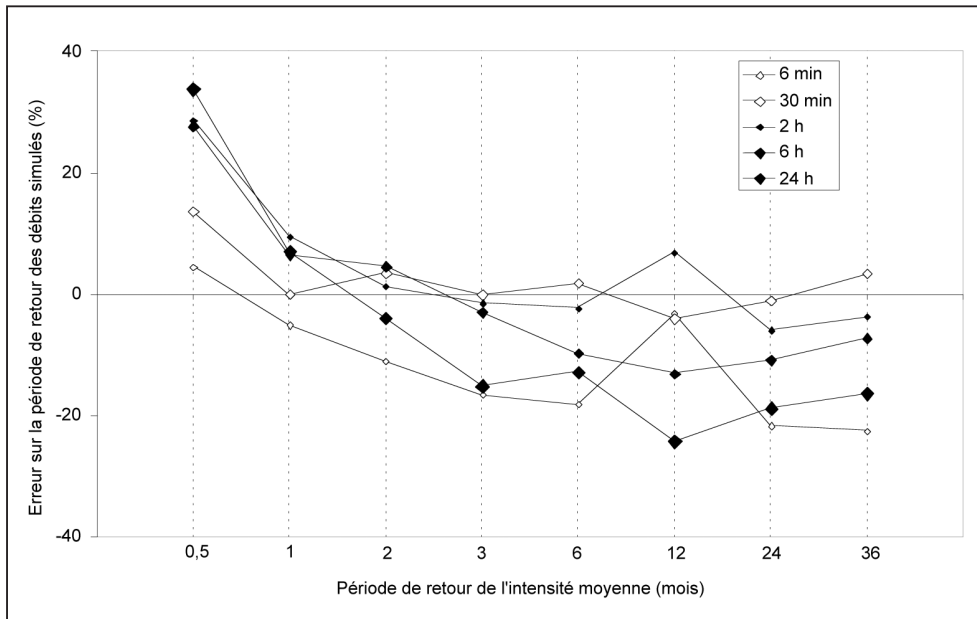


Figure 2. Écart entre les quantiles des débits observés et les quantiles des débits simulés en fonction de la période de retour des quantiles de débit observé (%)

partie de ce graphe, soit pour des périodes de retour supérieures à 24 mois, les observations manquent de robustesse. Nous n'étudierons donc que les simulations ayant des périodes de retour comprises entre 1 et 12 mois où le taux d'erreur est compris entre -25 et +12 %, ce qui est satisfaisant car il intègre le taux d'erreur des mesures estimé à 10 %.

3.2. Étude de sensibilité

La sensibilité des paramètres du calage de base est testée : deux nouvelles simulations complètes sont réalisées à partir de la paramétrisation des pertes initiales et du coefficient de ruissellement pour les événements pluvieux dépassant 2 et 5 mm. Les résultats montrent les mêmes problèmes que ceux détaillés en première partie de ce chapitre : les erreurs pour les hauteurs de pluie supérieures à 2 mm sont désormais comprises entre +13 % et -23 %. Cet élargissement du faisceau des erreurs est encore plus important avec les paramètres calés sur les événements supérieurs à 5 mm car il est alors compris entre +21 % et -22 %.

3.3. Application au dimensionnement d'ouvrages

Le calcul de la période de retour (T) des quantiles simulés s'effectue à partir de l'interpolation des quantiles observés. Il est alors possible d'exprimer les

erreurs sur les quantiles simulés en termes de mois de période de retour :

$Erreur = TqQ_{sim} - qQ_{obs}$ où TqQ_{sim} correspond à la période de retour des quantiles des débits simulés et TqQ_{obs} à la période de retour des débits observés en mois. L'écart entre les périodes de retour ainsi obtenues varie de +30 % à -60 % : les erreurs en période de retour sont plus importantes qu'avec les quantiles mais restent acceptables pour des périodes de retour n'excédant pas l'année et pour des durées d'événements comprises entre six minutes et six heures.

En imaginant le souhait de dimensionner un déversoir d'orage à l'exutoire du bassin-versant de Rezé à partir de la simulation effectuée pour que les déversements apparaissent une fois par an sur une durée critique de 30 minutes, le tableau V indique une erreur sur la période de retour des quantiles des débits simulés de 29 %. Les débits simulés arrivent donc 29 % plus souvent en réalité. Il est donc important d'avoir connaissance des valeurs des erreurs commises afin dans notre cas de pouvoir construire un seuil de déversoir d'orage plus haut de manière à ne déverser que lors des événements ayant réellement une période de retour de un an sur une durée de 30 minutes.

		Durée de l'événement									
		2 min	6 min	15 min	30 min	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h	24 h
Période de retour	15 jours		6	5	12	19	22	23	18	15	22
	1 mois		-4	0	0	14	20	22	12	13	
	2 mois		-12	-1		17	2	5	14	7	
	3 mois		-21	-6		18	-2	-2	-7	-8	
	6 mois		-28	-16	9	-4		-12		-27	
	1 an		-7	-18	29	-11	20	8	-47	-52	
	2 ans	-33	-15	-6	-2	23	-12	-19	-51	-48	
	3 ans	-49	-40	-34	-4	0	-18	-42	-46	-59	-60

Tableau V. Erreur entre la période de retour des quantiles de débits simulés et la période de retour des quantiles observés (%)

4. Objectif de prédiction

4.1. Étude des critères de performance lors des événements

Les critères sont calculés pour l'ensemble des 1 739 événements (tableau VI). Le critère d'écart de bilan a une distribution centrée sur la valeur nulle, ce qui est satisfaisant. La majorité des valeurs du coefficient de corrélation sont supérieures à 0,8 ce qui là aussi est correct. En revanche, les variations du critère de Nash sont importantes en fonction de la période de retour passant d'environ 50 % à 86 % lorsque la période de retour augmente. Cette amélioration liée à l'augmentation de la période de retour s'observe également pour les critères d'écart de bilan et le coefficient de corrélation, elle s'explique par le fait que le modèle utilisé n'est pas à l'origine conçu pour la simulation des événements pluvieux fréquents, c'est-à-dire ayant de petites périodes de retour. À l'inverse, pour le critère d'écart relatif sur le débit de pointe, l'augmentation de la période de retour entraîne la hausse du taux d'erreur. Il est cependant à noter que, quelle que soit la période de retour, le débit maximal des événements est sous-estimé mais que ce phénomène est encore plus accentué lors des grandes périodes de retour. Ces résultats s'expliquent en partie par la méthode de calage du modèle, qui privilégie la bonne représentation des volumes et non celle des débits de pointes.

Dans la suite de cette étude, seuls les critères d'écart de bilan et d'écart relatif sur le débit de pointe seront utilisés car ce sont les plus significatifs pour la gestion des ouvrages situés au sein du réseau d'assainissement.

Critère de Nash (%)						
Timoy	Moyenne	Moyenne absolue	Médiane	Médiane absolue	Minimum	Maximum
0,5	52	68	70	73	-179	97
1,0	68	74	78	78	-203	97
2,0	72	79	83	83	-154	99
3,0	80	80	84	84	26	98
6,0	72	76	82	82	-52	97
12,0	86	86	86	86	67	96
Critère d'écart de bilan (%)						
Timoy	Moyenne	Moyenne absolue	Médiane	Médiane absolue	Minimum	Maximum
0,5	5	22	2	17	-49	119
1,0	8	18	4	14	-32	00
2,0	5	15	1	11	-30	87
3,0	3	13	2	9	-33	59
6,0	1	15	-2	10	-35	84
12,0	-2	10	-2	8	-24	24
Coefficient de corrélation (%)						
Timoy	Moyenne	Moyenne absolue	Médiane	Médiane absolue	Minimum	Maximum
0,5	81	81	83	83	19	99
1,0	84	84	86	86	25	98
2,0	84	84	87	87	8	99
3,0	87	87	89	89	65	98
6,0	84	84	90	90	23	97
12,0	90	90	91	91	68	96
Critère d'écart sur le débit de pointe (%)						
Timax	Moyenne	Moyenne absolue	Médiane	Médiane absolue	Minimum	Maximum
0,5	-15	31	-12	20	-100	166
1,0	-14	29	-19	23	-100	313
2,0	-13	23	-17	20	-51	119
3,0	-16	21	-19	21	-43	25
6,0	-19	33	-29	34	-57	84
12,0	-19	31	-30	34	-45	61

Tableau VI. Statistiques des critères de performances en fonction de la classe de la période de retour de la pluie

4.2. Étude de sensibilité

Une étude de sensibilité des critères d'écart de bilan et d'écart relatif sur le débit de pointe est réalisée à partir des deux simulations paramétrées pour les événements pluvieux supérieurs à 2 mm et 5 mm. Ainsi, lors des événements pluvieux dont la hauteur de pluie totale dépasse 2 mm et 5 mm, le coefficient de ruissellement vaut respectivement 33,53 % et 36,49 %. Les valeurs des pertes initiales atteignent pour ces mêmes événements, respectivement 1,5 mm et 2,6 mm. Cette étude de sensibilité montre que les moyennes et les médianes absolues des critères des écarts de bilan événementiel augmentent de manière importante lorsque les paramètres pertes initiales et coefficient de ruissellement augmentent et ce, quelle que soit la période de retour. Il est aussi à noter que contrairement à l'évolution des valeurs des critères de la simulation de base, les critères des simulations pour les événements pluvieux supérieurs à 2 mm et 5 mm ne semblent pas s'organiser en fonction de la période de retour de la pluie. En revanche, les modifications apportées aux pertes initiales et au coefficient de ruissellement ne semblent pas avoir de conséquences importantes sur les valeurs du critère relatif sur le débit de pointe.

4.3. Application à la gestion d'ouvrages

Il est possible d'exprimer les erreurs sur le volume total écoulé et le débit maximal lors des événements en terme de période de retour : $Erreur = TQ_{sim} - TQ_{obs}$ (en mois). Le *tableau VII* montre que le taux d'erreur sur la période de retour du volume total simulé et du débit maximal se détériore avec la hausse de la période de retour. Par exemple, le dimensionnement avec le modèle d'un bassin de rétention pour un événement de période de retour 6 mois conduirait à une erreur moyenne de -1,5 mois. La période de retour réelle du volume simulé serait donc de 7,5 mois ce qui entraînerait le surdimensionnement de l'ouvrage par rapport à l'objectif assigné.

5. Conclusion et perspectives

Le modèle « pertes initiales – coefficient de ruissellement constant » destiné à représenter le ruissellement de surface a été testé afin de reproduire les différentes

Erreur sur la période de retour du volume total simulé par événement (mois)						
TQsim	Moyenne	Moyenne absolue	Médiane	Médiane absolue	Minimum	Maximum
0,5	-0,05	0,10	-0,02	0,07	-0,88	0,21
1,0	0,00	0,17	0,03	0,12	-2,02	0,49
2,0	-0,19	0,67	0,10	0,38	-10,03	1,23
3,0	-0,48	1,27	0,08	0,58	-9,21	3,12
6,0	-1,47	2,66	-0,06	1,52	-14,14	2,76
12,0	-5,58	8,16	-2,05	4,15	-26,68	10,18
Erreur sur la période de retour du débit maximal simulé par événement (mois)						
TQsim	Moyenne	Moyenne absolue	Médiane	Médiane absolue	Minimum	Maximum
0,5	-0,05	0,08	-0,02	0,05	-0,94	0,18
1,0	-0,29	0,34	-0,13	0,15	-4,95	0,62
2,0	-1,51	1,61	-0,77	0,79	-8,57	0,94
3,0	-4,64	4,93	-5,35	5,35	-8,06	1,15
6,0	-7,08	7,17	-4,65	4,65	-20,43	0,54
12,0	-9,23	10,10	-10,04	10,04	-18,96	1,31

Tableau VII. Erreur sur la période de retour du volume total simulé et du débit maximal par événement (mois)

caractéristiques des débits fréquents. Les données du bassin-versant de Rezé instrumenté par le Laboratoire central des Ponts et Chaussées ont été utilisées et le modèle a été calé avec une méthode optimisant la reproduction globale du volume écoulé pendant les événements. Les résultats montrent une reproduction des quantiles de débits simulés satisfaisante bien que l'erreur sur les périodes de retour soit légèrement plus importante. Les volumes cumulés par événement lors des simulations sont corrects et leur taux d'erreur diminue avec l'augmentation de la période de retour en raison de l'utilisation dans le modèle hydrologique d'équations davantage adaptées aux périodes de retour rares qu'aux périodes de retour fréquentes. En revanche, les débits de pointe simulés sont systématiquement inférieurs à ceux observés, entraînant un taux d'erreur de plus en plus important avec l'augmentation de la période de retour.

La méthodologie d'évaluation mise au point, en distinguant une première étape de confrontation des quantiles de débit puis une seconde étape de comparaison des débits événementiels, mériterait d'être appliquée à d'autres bassins versants. Une analyse plus approfondie des résultats permettrait aussi une évaluation plus complète du modèle : influences de

la fonction de transfert et de la méthode de calage, évaluation des résultats en fonction des saisons... Enfin, les résultats des simulations seraient probablement améliorés en utilisant des équations de produc-

tion permettant de mieux représenter les pertes sur les surfaces imperméabilisées (PI variables, prise en compte des phénomènes d'évaporation et d'infiltration).

Bibliographie

BERTHIER E., AUZIZEAU J., FASQUEL M., FLAHAUT B., ROUARD J.-M., ANDRIEU H. (1998). "Le suivi hydrologique de bassins versants expérimentaux en milieu urbanisé". Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, REF. 4209, pp.59-75.

MOSINI M.-L., RODRIGUEZ F., ANDRIEU H. (2000). "Propriétés statistiques de la réponse hydrologique d'un petit bassin-versant urbanisé, Application au site expérimental de Rezé". Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, NT. 4322, pp.105-110.

MOSINI M.-L., RODRIGUEZ F., ANDRIEU H. (2003). "Évaluation du logiciel Canoe sur un bassin-versant nantais. Étude de sensibilité et capacité du modèle à reproduire des débits de période de retour". Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussée, REF. 4468, pp.31-36.

United States Environmental Protection Agency (2005). "Storm Water Management Model, User's Manual" 5^e édition, 237 p. (<http://www.epa.gov/ednrmrl/tools/model/swmm.htm>).

Résumé

A.-L. LE DELLIOU, E. BERTHIER. Évaluation pour les événements pluvieux fréquents d'un modèle hydrologique utilisé en assainissement urbain

L'objectif de l'étude est d'évaluer rigoureusement les performances de la fonction de production « pertes initiales – coefficient de ruissellement » en fonction de la période de retour de l'événement pluvieux. La base de données utilisée est de longue durée (10 ans au pas de temps de la minute) et issue d'un bassin-versant bien renseigné. Les simulations sont effectuées en continu à l'aide du logiciel SWMM. Les critères d'évaluation sont de deux types :

- si l'objectif de l'étude est le dimensionnement, confrontation des quantiles de débit observé et simulé pour une large gamme de

durée (2 min - 24 h) et de période de retour (15 j - 3 ans) ;

- si l'objectif de l'étude est la prédiction, confrontation des débits observés et simulés sur les mêmes événements pluvieux.

Les deux paramètres de la fonction de production sont calés globalement sur plus de 1 000 événements pluvieux. Les performances de la fonction de production pour reproduire les quantiles de débit sont satisfaisantes (erreur de 10 à 20 %) quelle que soit la période de retour de l'événement. En termes de prédiction, la fonction de production est plutôt bonne sur les volumes mais rencontre des difficultés à reproduire les débits de pointe lors des événements pluvieux fréquents.