



ACTION 4.1 – TRANSPORT SUR LES SURFACES URBAINES : PROCESSUS HYDROLOGIQUES QUANTITATIFS

CONTEXTE ET OBJECTIFS

Limiter les rejets dans les milieux récepteurs lors des événements fréquents est une problématique croissante dans le cadre d'une gestion moderne des eaux pluviales urbaines: la politique d'abattement des premiers millimètres de pluie dans des ouvrages à la source est de plus en plus prônée (AESN, 2015 ; Mouy et al., 2007), le recours à des ouvrages aval pour limiter les déversements par temps de pluie est de plus en plus fréquent (ASTEE-SHF, 2014), et l'arrêté de Juillet 2015 sur les performances des systèmes d'assainissement en France impose même cette limitation aux maîtres d'ouvrages des réseaux. Il s'avère donc nécessaire de pouvoir reproduire et prévoir les débits de ruissellement qui vont rejoindre les réseaux d'eaux pluviales lors d'événements pluvieux avec des hauteurs de pluie moyennes, voire réduites (période de retour inférieure à l'année). Les méthodes actuelles de calcul de ces débits utilisent des fonctions de productions développées initialement pour des événements exceptionnels (type orages) qui s'avèrent peu adaptées lors des événements fréquents (Berthier, 2001), et les acteurs opérationnels restent encore bien souvent démunis pour évaluer le ruissellement lors des pluies fréquentes. Il s'avère que les Surfaces Urbaines Revêtues (SURs), telles que les voiries et les toits, supposées « imperméabilisés » ont un réel comportement hydrologique avec des pertes au ruissellement non négligeables ; comportement qui reste encore méconnu et que les logiciels opérationnels actuels ont du mal à reproduire.

L'action « Processus hydrologiques quantitatifs sur les surfaces urbaines » cherche donc à mieux comprendre les processus hydrologiques sur les SURs, à étudier les capacités des outils actuels à bien reproduire ces processus, avec l'idée in-fine de proposer des améliorations pour mieux les reproduire. Elle est complémentaire de l'action 4.2 qui porte sur la compréhension et la reproduction des flux polluants sur les SURs, et plus spécifiquement sur les processus d'accumulation et de lessivage.

METHODOLOGIE

Les travaux menés sur le bilan hydrologique à l'échelle de SURs (toits, tronçons de voiries, parkings, ...) montrent un fort accroissement du ruissellement au détriment de l'infiltration et de l'évapotranspiration (voir Redfern et al. (2016) pour une synthèse). La littérature souligne toutefois que ses surfaces conservent un réel comportement hydrologique avec des pertes au ruissellement non négligeables à l'échelle de l'année et lors des événements pluvieux fréquents (voir aussi Ramier et al. (2011), Ragab et al. (2003a et b), Hollis et Ovensen, (1988a et b).

L'action menée a cherché à mieux comprendre les processus hydrologiques sur les SURs, en utilisant les deux outils complémentaires que sont l'observation et la modélisation. Cette recherche de compréhension a été réalisée à l'échelle de la surface individuelle (échelle locale) en se concentrant sur un tronçon de voirie du fait de l'importance des voiries dans le transfert des flux polluants. Elle a aussi été réalisée à l'échelle d'un bassin versant amont (échelle quartier), bassin versant qui intégrait le tronçon de voirie étudié (notion de bassins versants imbriqués, qui est une originalité pour étudier le comportement hydrologique des SURs).

L'action s'est déroulée dans le cadre du projet ANR Trafipollu (2013-2016 ; <https://sites.google.com/site/trafipollu/>), qui poursuivait l'objectif de développer les outils de modélisation de cartographies dynamiques des polluants générés par le trafic routier, et de l'opération de recherche Giemu (2015-2019) financée par l'Afb.

Les résultats obtenus ont été en majorité communs avec l'action 4.2 sur les flux polluants, en particulier sur la modélisation : il faut donc consulter les fiches de synthèse OPUR4 des thèses de Yi Hong et Saja Al Ali pour avoir la complétude des résultats. D'après ces travaux, les incertitudes sur la simulation des flux polluants sont plus importantes que les incertitudes qui affectent uniquement la simulation des flux hydriques, résultats que l'on retrouve dans la littérature. La figure 5 de la fiche de synthèse du travail d'Y.Hong montre par exemple sur quelques événements des résultats très satisfaisants en terme de débit simulé à l'exutoire du tronçon de voirie et du bassin versant amont. Il s'avère que ces résultats ne peuvent pas être généralisés pour tous les événements, comme le montre les autres résultats présentés dans cette fiche (tirés entre autre du stage de Master de M.Alhoujayri).

SITES EXPERIMENTAUX

Le site expérimental utilisé est celui du projet ANR Trafipollu, avec le suivi hydrologique de 2 bassins versants imbriqués constitué par un tronçon de voirie et un petit bassin versant amont. Il se situe en zone résidentielle dans la région parisienne, comprenant une route départementale (RD 34) à forte circulation (plus de 30,000 véhicules par jour). Il se trouve sur la commune du Perreux-sur-Marne, dans le département du Val de Marne à 12 km à l'est de Paris (Fig. 1a). A l'échelle locale, le bassin versant routier est constitué d'un tronçon de chaussée autour du boulevard d'Alsace Lorraine (RD 34), représentant une superficie de 0.27 ha (Fig. 1b), avec une pente moyenne de 2%. A l'échelle du quartier, le bassin-versant est délimité en considérant les données topographiques et les connections au réseau d'assainissement (Fig. 1c) : sa superficie couvre 12ha avec une pente moyenne de 2%, il est imperméabilisé à 52%.

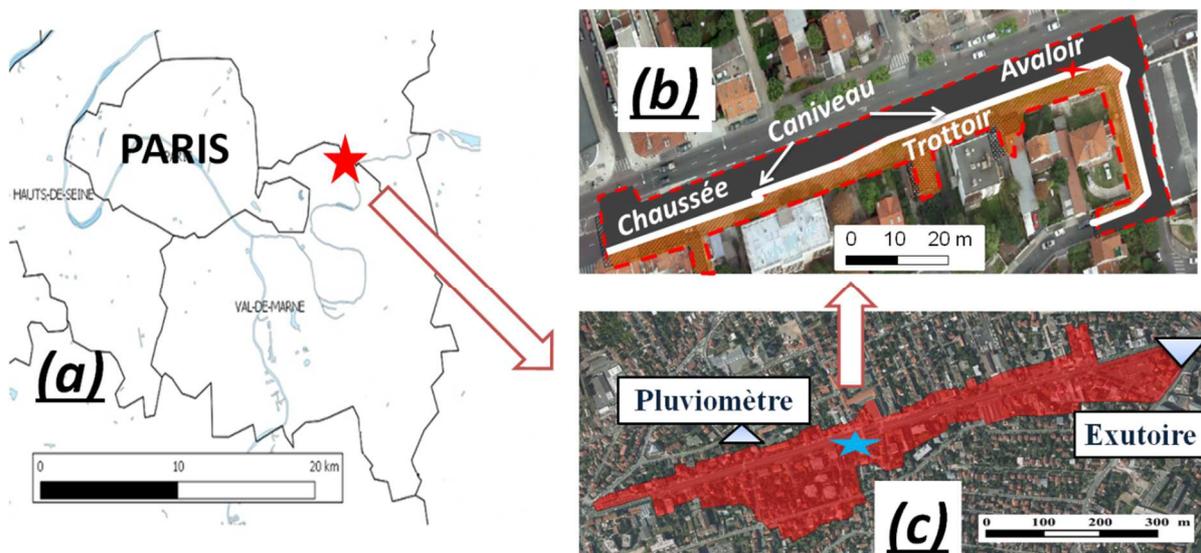


Figure 1 : Site d'étude: (a) la localisation du site; (b) le bassin-versant à l'échelle locale; (c) le bassin-versant à l'échelle du quartier (extrait de la fiche de synthèse OPUR4 du travail de thèse de Y.Hong)

Les données disponibles sont importantes et ont été l'objet de critiques et validations rigoureuses. Pour cette action, il est utilisé les données de pluie, d'ETP, et de débits aux 2 exutoires (avaloir du tronçon de voirie et exutoire du bassin versant) durant la période de Juin 2014 à Août 2015. Il a aussi été utilisé dans la thèse de Y.Hong une mesure de hauteur d'eau innovante qui s'est avérée fonctionner très correctement (capteur non-intrusif DSC111 de la marque Vaisala posté sur un mat).

Il était aussi prévu de tester des mesures complémentaires sur la RD34 qui n'ont pas pu être menées à bien, faute de financement dédié :

- la vitesse de ruissellement à l'aide d'un capteur développé par l'IRD utilisant le principe d'un traçage au chlorure de sodium ;
- l'infiltration au travers de l'enrobé, à l'aide d'un infiltromètre pour voirie ;

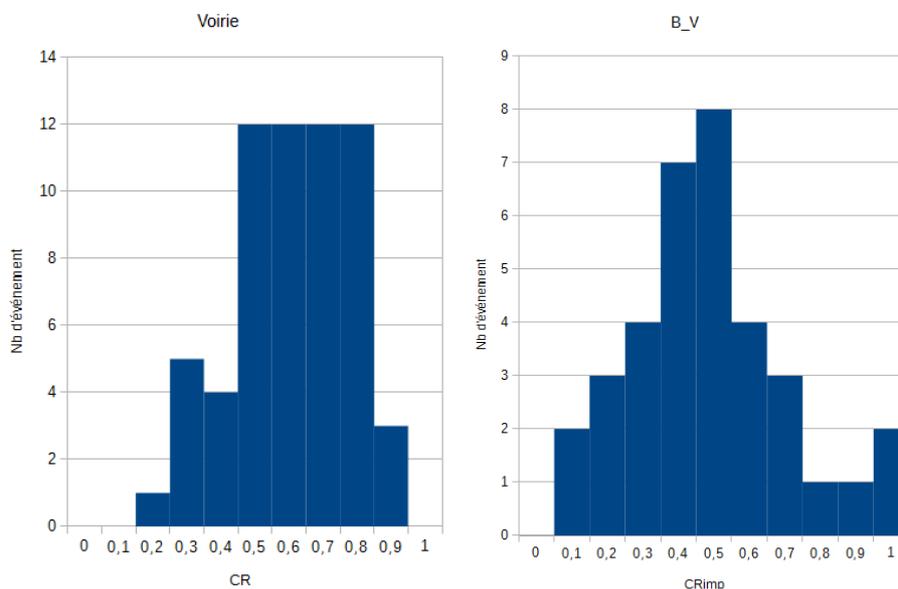
- l'évaporation lors du séchage, à l'aide d'une chambre d'évapotranspiration.

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Les pertes au ruissellement observées sur la voirie (échelle locale) et sur le Bassin Versant (BV, échelle du quartier) sont caractérisées à l'échelle de l'événement pluvieux avec 2 indicateurs: le coefficient de ruissellement (CR, rapport entre le volume de ruissellement à l'exutoire et le volume de pluie sur le bassin versant, sans unité) et les pertes exprimées en hauteur d'eau (P_e , différence entre la hauteur de pluie et la hauteur de ruissellement, en mm). A l'échelle du bassin versant, seules les surfaces imperméabilisées sont considérées : par exemple un CR égal à 1 signifie que toutes les surfaces imperméabilisées ruissellent à 100% (le CR à l'échelle du BV dans son entier est alors égal au coefficient d'imperméabilisation) ; cette transformation permet de comparer les critères de la voirie (qui est imperméabilisée à 100%) et du BV. Le travail de critique / validation des données a permis d'identifier 61 événements validés sur le tronçon de voirie et 35 événements sur le bassin versant, 26 événements étant communs.

Les distributions des CR sont assez différentes aux 2 échelles (Figure 1): sur la voirie, de nombreux événements ont des valeurs entre 0,5 et 0,8 avec une répartition homogène dans ces classes ; sur le bassin versant, la distribution est quasi normale, avec un pic autour de 0,5-0,6. Concernant les pertes en mm, les distributions sont plus proches, avec une majorité de valeurs entre 0 et 1mm.

Les variations des CR et P_e aux 2 échelles sont importantes d'un événement pluvieux à l'autre (Figure 2), tout en ayant des valeurs moyennes qui traduisent des pertes au ruissellement plutôt faibles : 0,67 et 0,53 pour les coefficients et 1,0 et 1,2 mm pour les pertes, respectivement pour la voirie et le bassin versant. Les faibles valeurs de pertes par rapport à celles relatées dans la littérature (Redfern et al., (2016) par exemple) peuvent s'expliquer par une pente forte sur les 2 sites (environ 2%), ce qui limite l'interception et favorise le bon drainage des surfaces.



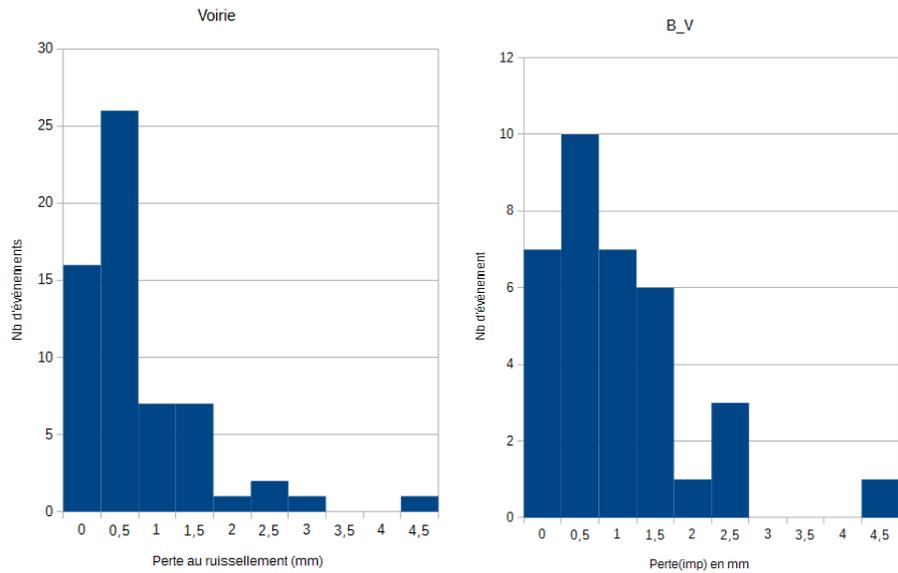


Figure 1 : Distributions des coefficient (en haut) et des pertes (en bas) de ruissellement à l'échelle de la voirie (à gauche) et du bassin versant (à droite)

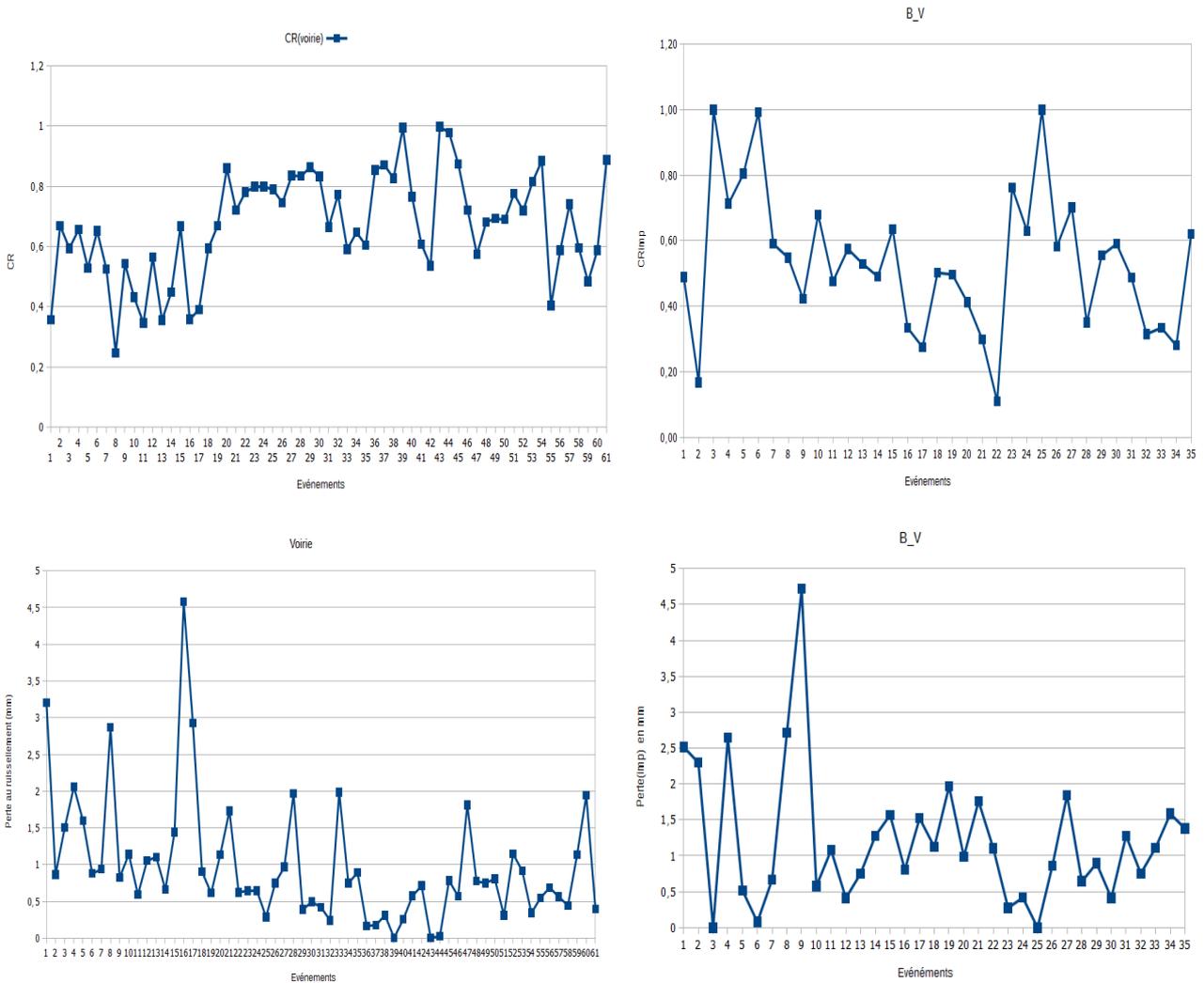


Figure 2 : Variations événementielles des coefficient (en haut) et des pertes (en bas) de ruissellement à l'échelle de la voirie (à gauche) et du bassin versant (à droite)

L'un des intérêts des 2 échelles imbriquées est de pouvoir confronter pour les mêmes événements, les pertes sur la voirie et le bassin versant la contenant. A partir des échantillons d'événements disponibles aux 2 échelles, 26 événements communs ont été identifiés. Il s'avère que les pertes sont très cohérentes d'une échelle à l'autre, avec non seulement une très bonne co-fluctuation des CR mais aussi des valeurs quasi-équivalentes des pertes en mm (Figure 3). Ce dernier constat peut paraître étonnant, et indiquerait que les pertes observées sur le tronçon de voirie sont très proches de celles observées sur les surfaces revêtues du bassin versant, qui comprend des voiries mais aussi des bâtiments.

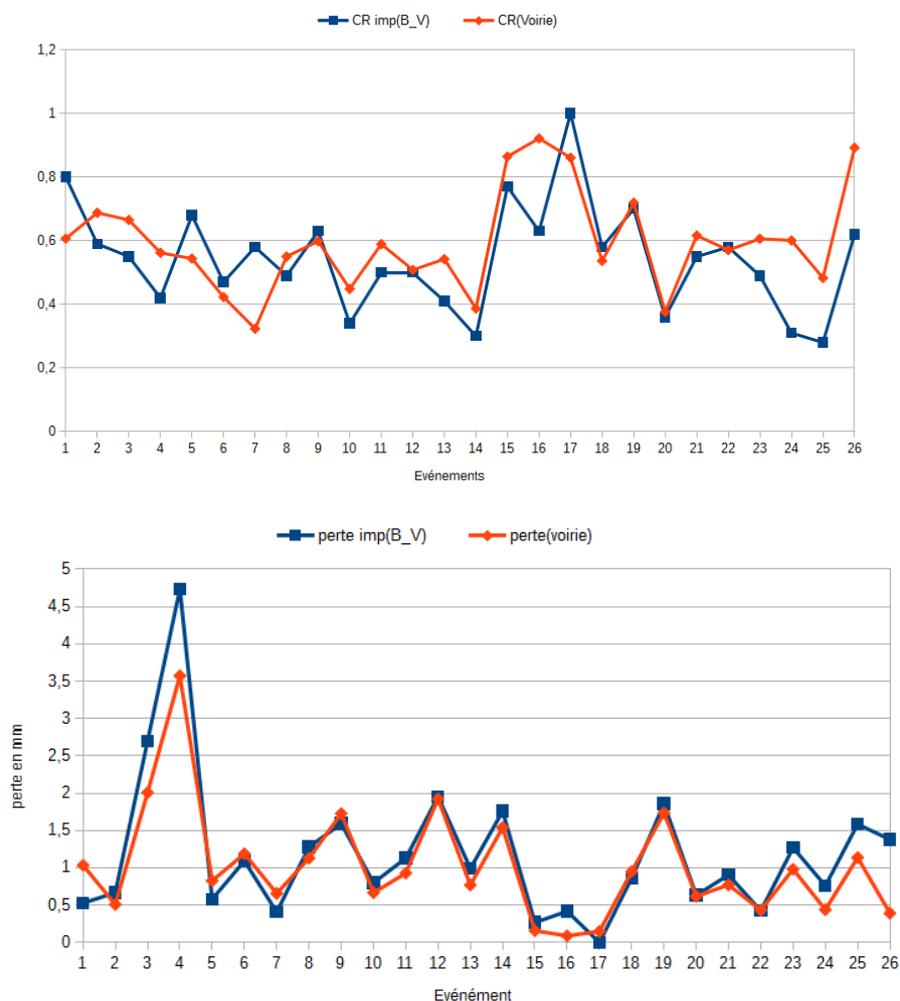


Figure 3 : Comparaison des coefficients (en haut) et des pertes (en bas) de ruissellement aux deux échelles spatiales sur l'échantillon d'événements communs

RESULTATS DE MODELISATION

L'objectif du travail de modélisation autour des données pluie-débit du projet TrafiPollu a été d'évaluer et comparer différentes approches en étudiant leur capacité à reproduire les pertes observées aux 2 échelles. Ce travail a déjà été réalisé dans la littérature, mais soit avec des modèles différents, soit avec un autre jeu de données (par exemple Berthier et al., 2001).

Les modèles utilisés ont été les suivants :

- un modèle statistique, basé simplement sur la régression linéaire multiple pour expliquer les variations des pertes à partir d'une série de variables supposées explicatives : la durée de l'événement, la pluie totale, l'intensité maximale, et la durée de temps sec précédent l'événement ;

- un modèle simple de pertes initiales et continues, en considérant les SURs revêtues comme des réservoirs et en supposant que le ruissellement est total dès lors que le réservoir est plein (il est nul sinon) ;
- le modèle SWMM, logiciel de référence en hydrologie urbaine et assainissement, avec une fonction de production de type réservoir et un ruissellement dépendant de la hauteur d'eau stockée estimé selon une loi d'hydraulique ;
- le modèle de recherche à base physique FullSWOF utilisé dans la thèse de Y.Hong (cf. la fiche de synthèse de la thèse).

Les conditions de paramétrisation de ces différents modèles sont détaillées dans le rapport de Master de M.Alhoujayri, ainsi que la totalité des résultats de comparaison. Les résultats sur le CR à l'échelle de la voirie sont présentés ici (Figure 4). Sans surprise, les modèles traditionnels et utilisés à l'heure actuel en opérationnel n'arrivent pas à reproduire la variabilité des CR observés : le modèle statistique est le pire, avec des CR simulés qui varient très peu autour de la moyenne ($R^2 = 0,04\%$ entre les séries observée et simulée) ; le modèle de pertes initiales et continues est un peu meilleur, avec une certaine variabilité qui est simulée mais qui reste peu corrélée avec les observations ($R^2 = 0,04\%$) ; le modèle SWMM se rapproche des coefficients observés, surtout en début de série, mais échoue quand même à représenter de façon satisfaisante les pertes ($R^2 = 0,1\%$). Il est à noter que SWMM a pu être testé sur un échantillon d'événements réduit car les données d'ETP, nécessaires en entrée, étaient limitées. La modélisation avec le modèle de recherche FullSWOF est beaucoup plus compliquée et lourde à mettre en œuvre et réalisée. Y.Hong l'a fait sur 6 événements pluvieux, et nous avons repris ses résultats. Le modèle arrive plutôt bien à reproduire la variabilité observée, même si elle s'avère réduite sur les 6 événements sélectionnés (avec des valeurs plutôt élevées, et donc des pertes réduites ; $R^2 = 57\%$). Les CR simulés sont aussi en valeur très proches de ceux observés.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'action 4.1 d'OPUR4 s'est appliquée à mieux comprendre et reproduire les processus hydrologiques sur les surfaces urbaines ; ses productions et résultats sont pour la plupart communs avec ceux de l'action 4.2 qui a traité des flux polluants. Les travaux ont été menés dans le cadre du projet ANR Trafipollu (2013-2016 ; <https://sites.google.com/site/trafipollu/>) et de l'opération de recherche Giemu financée par l'Afb. Ils se sont appuyés sur le suivi pluie-débit-pollution de deux bassins versants imbriqués : un tronçon de voirie et un bassin versant amont. Deux thèses ont ainsi été produites sur la modélisation des flux aux deux échelles (cf. les fiches de synthèse de Y.Hong et S.Al Ali). Un travail supplémentaire présenté ici s'est concentré sur l'estimation des pertes au ruissellement aux deux échelles, et sur la capacité des modèles actuels à les reproduire.

Bien que mieux connus et maîtrisés que les flux polluants, les flux hydriques restent encore difficiles à comprendre et reproduire sur les surfaces urbaines lors des événements fréquents. L'originalité des observations sur des bassins versants imbriqués a permis de montrer, sur ce cas d'étude, la cohérence entre les pertes sur une voirie et sur le bassin versant contenant cette voirie. Les pertes s'avèrent finalement assez réduites (1mm par événement en moyenne) et plus faibles que celles indiquées dans la littérature ; le fait que les sites soient significativement pentés (2%) peut expliquer ce constat. La capacité des modèles testés à reproduire les variabilités inter-événementielles des pertes sur les 2 sites s'avère très réduite, sauf pour le modèle de recherche FullSWOF qui détaille les écoulements de surface en 2D.

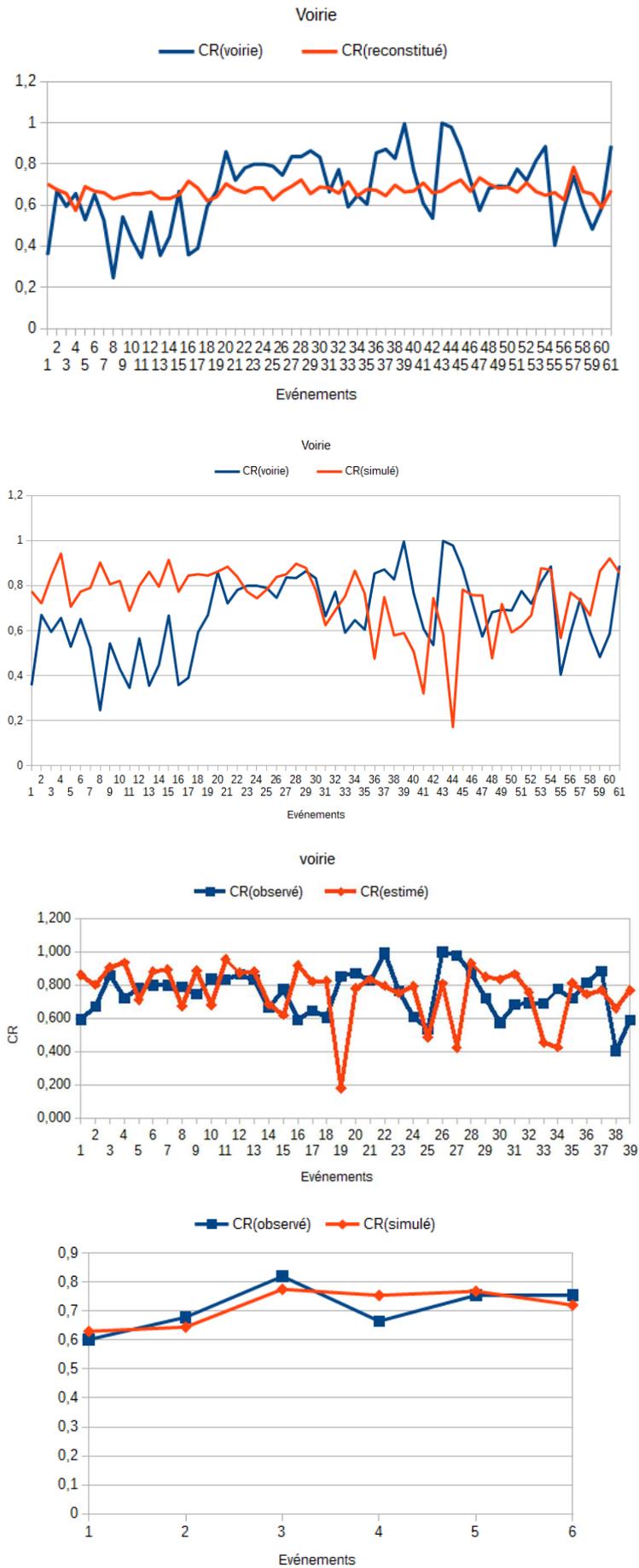


Figure 4 : CR observés (en bleu) et simulés (en rouge) à l'échelle de la voirie pour les différents modèles testés (de haut en bas) : modèle statistique, modèle de pertes initiales, modèle SWMM, et modèle FullSWOF

La question de la modélisation des flux polluants, et donc des flux hydriques, lors des événements fréquents a aussi été identifiée comme importante en cours de réalisation du programme OPUR4 : un séminaire d'échanges entre chercheurs et opérationnels sur les pratiques de modélisation de la qualité des eaux urbaines a ainsi été organisé le 24 Mai 2016. Un financement de la part de l'Afb a aussi été obtenu tardivement, et doit permettre encore d'avancer en 2018 et 2019 sur l'amélioration des fonctions de production du ruissellement lors des événements fréquents. Enfin, il a été acté la création d'un Groupe de Travail Thématique au sein de l'association Arceau autour des Usages et Développements des Modèles numériques ; le sujet de la modélisation des flux hydriques et de polluants devrait y être discuté.

Publications et Communications :

Voir les fiches de synthèse des thèses de Y.Hong et S.Al Ali.

Alhoujayri M., 2017 : Évaluation des fonctions de production du ruissellement lors des événements pluvieux fréquents, rapport de Master et d'Ingénieur, 40p.

Références :

- AESN, 2015. APPEL A PROJETS : « Gestion durable des eaux de pluie dans les projets d'aménagements urbains »
- ASTEE-SHF, 2014. Congrès: «Optimisation de la gestion des systèmes d'assainissement pour la protection des milieux aquatiques». Bordeaux, France.
- Berthier, E. , Rodriguez, F. , Andrieu, H. , et Rainbault, G. ,2001. Les limites du schéma à pertes initiales et coefficient de ruissellement pour la simulation des événements pluvieux courants , In Novatech , volume 2,869-876 , lyon
- Hollis, G.E. & Ovenden, J.C., 1988a. One year irrigation experiment to assess losses and runoff volume relationships for a residential road in hertfordshire, England. Hydrological Processes, 2(1), pp.61–74. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.3360020106> [Accessed July 30, 2017].
- Hollis, G.E. & Ovenden, J.C., 1988b. The quantity of stormwater runoff from ten stretches of road, a car park and eight roofs in Hertfordshire, England during 1983. Hydrological Processes, 2(3),
- Mouy, N., Duguet, P., and Laurent, C., 2007. Faisabilité hydraulique du zonage pluvial à Paris (in French) Lyon, France: NOVATECH.
- Ragab, R., Bromley, J., et al., 2003. Experimental study of water fluxes in a residential area: 1. Rainfall, roof runoff and evaporation: the effect of slope and aspect. Hydrological Processes, 17(12), pp.2409–2422. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.1250> [Accessed July 30, 2017].
- Ragab, R., Rosier, P., et al., 2003. Experimental study of water fluxes in a residential area: 2. Road infiltration, runoff and evaporation. Hydrological Processes, 17(12), pp.2423–2437. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1002/hyp.1251> [Accessed July 30, 2017].
- Ramier, D., Berthier, E. & Andrieu, H., 2011. The hydrological behaviour of urban streets: Long-term observations and modelling of runoff losses and rainfall-runoff transformation. Hydrological Processes, 25(14), pp.2161–2178.
- Redfern, T.W. et al., 2016. Current understanding of hydrological processes on common urban surfaces. Progress in Physical Geography, 40(5).

CONTACTS

Emmanuel Berthier, emmanuel.berthier@cerema.fr