



OPUR : Observatoire des Polluants Urbains en Île de France
Thème de recherche : Vers une maîtrise à la source de la
contamination des eaux pluviales urbaines
Action de recherche n° 5.1

**MODELISATION DISTRIBUEE A BASE PHYSIQUE DU
TRANSFERT HYDROLOGIQUE DES POLLUANTS
ROUTIERS DE L'ECHELLE LOCALE A L'ECHELLE DU
QUARTIER**

Rapport final
Synthèse de thèse de doctorat de Yi Hong
3 Janvier 2017

- *Thèse réalisée au Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains, UMR MA 102, sous la direction de Monsieur Ghassan Chebbo et Madame Céline Bonhomme*



Modélisation distribuée à base physique du transfert hydrologique des polluants routiers de l'échelle locale à l'échelle du quartier.

Résumé

Le développement des réseaux séparatifs entraîne le transfert fréquent de polluants urbains vers les milieux récepteurs (plans d'eau, rivières, etc.). Afin de répondre aux questions liées à la gestion des eaux urbaines, l'amélioration des connaissances des processus physiques est nécessaire, tant au niveau des surfaces urbaines que les réseaux d'assainissement. Pour cela, la modélisation du transfert hydrologique des polluants en milieu urbain peut être un outil précieux. Dans ce contexte, l'objectif de cet article est de développer et d'exploiter de nouveaux outils de modélisation de flux de polluants afin d'améliorer la connaissance des processus liés aux polluants par temps de pluie, mais aussi de contribuer au développement d'une chaîne de modélisation dédiée au transfert des polluants liés au trafic routier en zone urbaine (chaîne de modélisation Trafic-Emission-Air-Eau). Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR "Trafipollu" et OPUR (Observatoire des Polluants Urbains en Ile-de-France), il bénéficie des résultats expérimentaux mis en œuvre dans ce projet pour la calibration et validation des modèles utilisés.

Mots clés:

Modélisation distribuée à base physique; Modélisation 2D-1D; Qualité des eaux pluviales urbaines; Polluants liés au trafic routier; Lessivage sur les surfaces urbaines;

1, Introduction

Aujourd'hui, 54% de la population mondiale vit dans les villes, une proportion qui devrait passer à 66% en 2050 (ONU, 2014). Cette forte tendance de l'urbanisation se traduit donc par une imperméabilisation importante des sols naturels, qui pourrait augmenter les charges polluantes, notamment pour les métaux lourds et les Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs); et dégrader de la qualité des milieux récepteurs (Fletcher, Andrieu, et al., 2013; Bressy, Gromaire, et al., 2012).

La maîtrise des polluants urbains, dans le but de préserver et de reconquérir la qualité des écosystèmes aquatiques, constitue un enjeu important pour les gestionnaires. Face à ces besoins, la mise au point de méthodes de surveillance et d'outils d'évaluation des flux de polluants s'avèrent nécessaires. Au vu de la multiplicité des phénomènes en jeu et de la difficulté de réalisation et du coût des campagnes de mesures exhaustives (en tous les points de déversement), la modélisation apparaît comme un outil fondamental pour la conception, la planification et la gestion en hydrologie urbaine.

Depuis les années 1970, de nombreux outils mathématiques de modélisation ont été développés afin de simuler la qualité de l'eau en milieu urbain (Fletcher, Andrieu, et al., 2013; Salvatore, Bronders, et al., 2015). Pourtant, la description des processus inclus dans les modèles d'aujourd'hui restent celle proposée par les pionniers (e.g. Sartor et al., 1974). Peu

de connaissances nouvelles sur les mécanismes de génération et de transport des polluants par temps de pluie ont été intégrées dans les outils de modélisation. D'autre part, après 40 ans d'expérience, il apparaît que très peu de modèles de la qualité de l'eau sont utilisés dans les zones urbaines par les opérationnels. L'insuffisance des connaissances des processus physique et l'insuffisance des données disponibles sont des raisons principales expliquent ce manque de confiance dans la modélisation de la qualité des eaux urbaines (Hong, Bonhomme, et al., 2016a).

Dans ce contexte, cet article vise à (i) améliorer la connaissance sur les processus dominants du transfert des contaminants par temps de pluie; (ii) développer le modèle intégré pour simuler les flux de polluants dans les milieux urbains. Afin de répondre à ces objectifs, deux différentes méthodes de modélisations ont été séparément développés et exploités à l'échelle locale et à l'échelle du quartier du milieu urbain. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet ANR "Trafipollu" et bénéficie des résultats expérimentaux mis en œuvre dans ce projet pour l'implémentation, la calibration et la validation des modèles utilisés.

2, Matériels et méthodes

2,1 Site d'étude

Le site d'étude est une zone résidentielle dans la région parisienne, qui contient une partie d'une route départementale (RD 34) à fort débit de circulation (plus que 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), représente une surface de 2661 m² (Fig. 1b). A l'échelle du quartier, Le bassin-versant est délimité en considérant les données topographiques (jusqu'au 20 cm de résolution) et les connections au réseau d'assainissement (Fig. 1c). La surface du bassin est égale à 0.12 km², et la pente moyenne du bassin est égale à 2%.

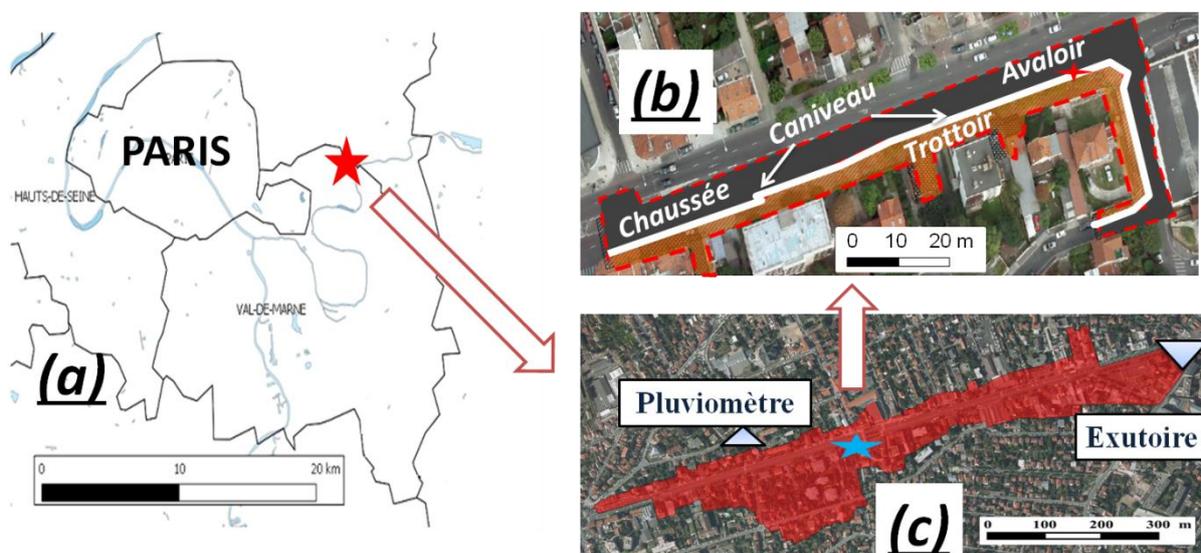


Fig. 1 Site d'étude: (a) la localisation du site; (b) le bassin-versant à l'échelle locale; (c) le bassin-versant à l'échelle du quartier

2,2 Description des données

Dans le cadre du projet Trafipollu, un pluviomètre a été installé sur le toit de la piscine Belvaux qui se situe à côté du boulevard d'Alsace Lorraine. 56 événements ont été observés pendant la période du 20/09/2014 au 27/04/2015. Les caractéristiques des pluies dans la région parisienne ont été analysées selon les aspects tels que la hauteur de pluie, l'intensité moyenne, la durée d'événement, et le temps sec. Les statistiques des pluies ont été présentées dans la Fig. 2. Parmi ces événements de pluie, 6 événements représentatives ont été sélectionnés afin d'analyser la performance de modèle à l'échelle locale ainsi à l'échelle du quartier.

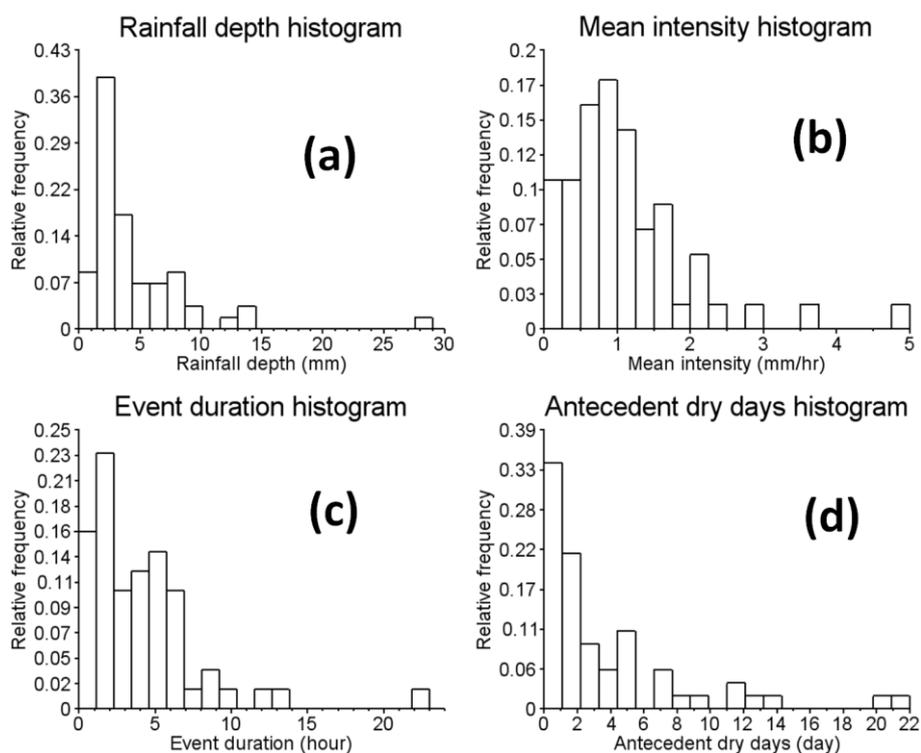


Fig. 2 Statistiques sur les événements de pluie dans la région parisienne. (a) la hauteur de pluie; (b) l'intensité moyenne; (c) la durée d'événement; (d) le temps sec.

A l'échelle locale, les données détaillées du bassin versant, telles que les données topographiques de résolution centimétrique, les données pluviométriques de résolution à 0.1 mm, les masses de dépôts secs sur les surfaces urbaines, et les analyses granulométriques des matières en suspension (MES) dans l'eau de ruissellement sont mesurées et collectées. Des mesures en continu de débits et de turbidité sont mises en place dans un avaloir qui représente l'exutoire du bassin versant local. Les descriptions de ces données peuvent être référencées dans (Hong, Bonhomme, et al., 2016a).

A l'échelle du quartier, en collaboration avec l'IGN, le Cerema, l'IFSTTAR, l'AirParif, le Cerea, le Conseil et la ville du Perreux-sur-Marne, les données détaillées ont été collectées et analysées. Au total, les données topographiques de résolution à 5m, les données

d'occupation du sol de 13 différentes classes, l'information fine des réseaux d'assainissement, les données pluviométriques de résolution à 0.1 mm, les masses de dépôts secs sur les surfaces urbaines, les analyses granulométriques des matières en suspensions (MES) dans l'eau de ruissellement, ont été mesurées et collectées. Des mesures en continu de débits et de turbidités ont été mises en place dans l'exutoire des réseaux d'assainissement séparatifs. Les concentrations de HAPs et de métaux dans les réseaux sont obtenues à partir des prélèvements dans un avaloir du bassin versant. Les explications des données sont décrit en (Hong, Bonhomme, et al., 2017).

2.3 Modèle FullSWOF

Le code FullSWOF (volumes finis, schéma numérique d'ordre 2) (Delestre, Cordier, et al., 2014) développé lors de l'ANR Méthode au MAPMO (Le Laboratoire de Mathématiques - Analyse, Probabilités, Modélisation) a été utilisé pour la modélisation à l'échelle locale. Dans le cadre du travail, nous avons collaboré avec le développeur du code (Minh Le Hoang, Laboratoire St-Venant) pour introduire un module sédimentaire (Hairsine and Rose, 1992a; Hairsine and Rose, 1992b) (H-R), adapté pour la première fois au contexte urbain. Ces avancées ont permis de mettre au point une nouvelle génération de modèles hydrologiques pour les polluants des bassins versants urbains. Elles ont notamment permis de constater séparément les effets d'arrachement liés aux gouttes de pluie et à l'entraînement par l'advection. Le schéma du modèle FullSWOF-HR est présenté dans le Fig. 3. L'équation générale pour calculer les processus physiques de lessivage sont illustrées dans Eq. 1, les détails des calculs sont représentés dans (Hong, Bonhomme, et al., 2016b).

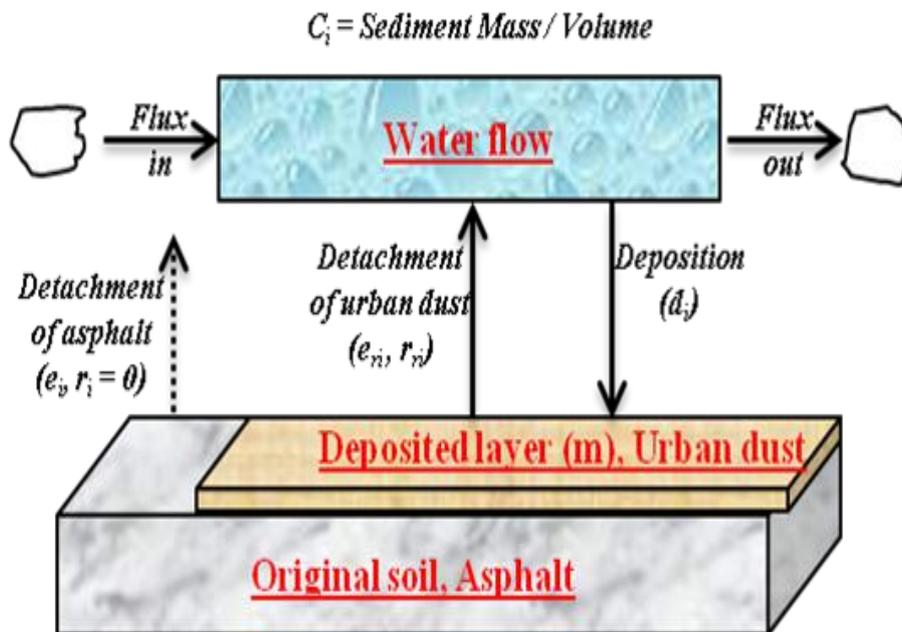


Fig. 3 Schéma du modèle FullSWOF-HR pour la modélisation fine des différents processus physiques du lessivage en milieu urbain.

$$\frac{\partial hc_i}{\partial t} + \frac{\partial qc_i}{\partial x} = e_{ri} + r_{ri} - d_i \quad (1)$$

Où,

- C_i : La concentration d'une classe de particule dans le flux d'eau;
- h : La hauteur d'eau;
- t : Le pas de temps de simulation;
- x : Le pas d'espace de simulation;
- q : Le débit du flux d'eau;
- e_{ri} : Le taux de détachement par les gouttes de pluie;
- r_{ri} : Le taux de détachement par le ruissellement;
- d_i : Le flux de déposition;

2,4 Plateforme LISEM-SWMM

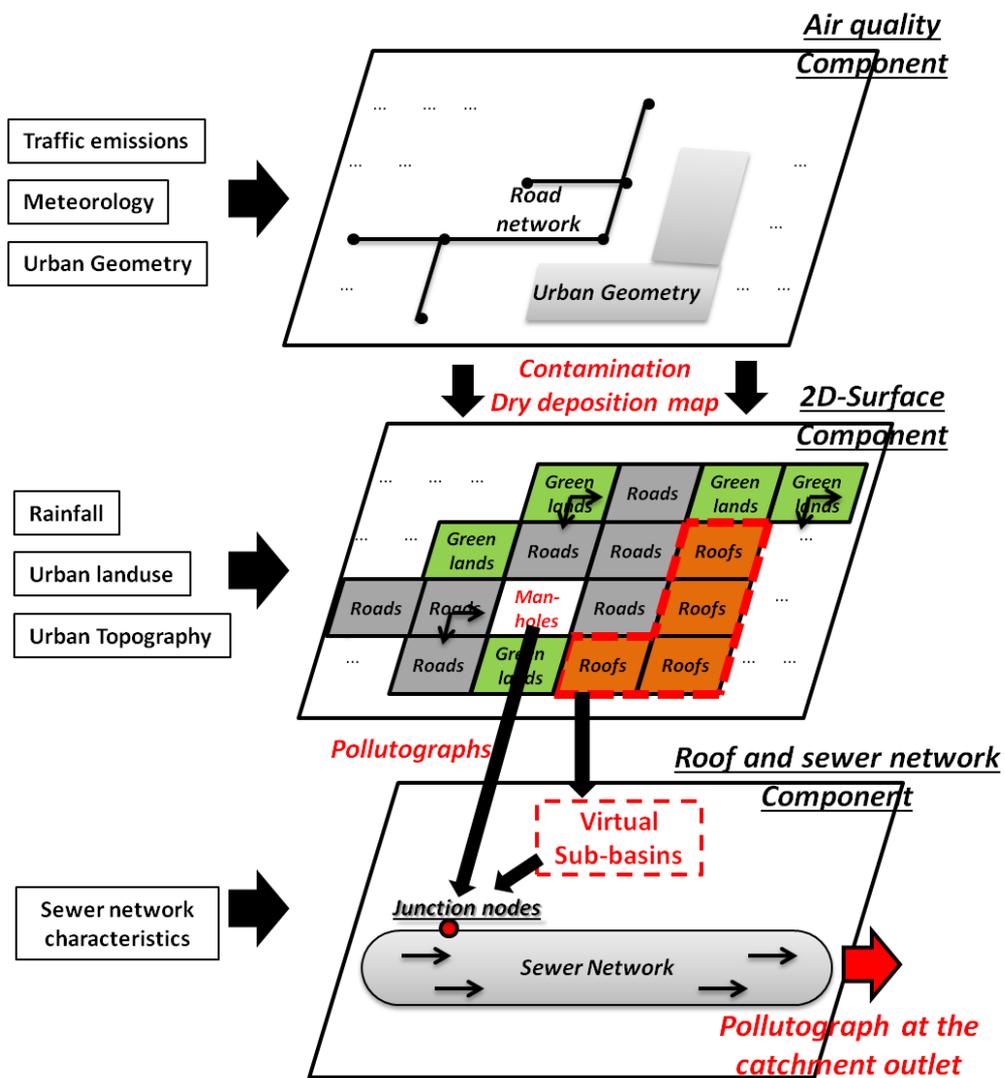


Fig. 4 Schéma de la plateforme LISEM-SWMM pour la simulation intégrée du transfert de polluants dans l'air, sur la surface et dans les réseaux.

Afin de simuler la quantité et la qualité des eaux pluviales urbaines à l'échelle du quartier, une plateforme de modélisation intégrée, 2D/1D, "LISEM-SWMM" (Hong, Bonhomme, et al., 2017) est développée en couplant le modèle 2D à base physique LISEM (De Roo, Wesseling, et al., 1996) avec le modèle de réseau 1D SWMM (Rossman, 2010). En lien avec le CERIA (ENPC, France) et l'université de Twente (Pays-Bas), cette plateforme intégrée nous permet de coupler les processus de déposition des polluants atmosphériques, de transferts des eaux et des contaminants sur la surface (2D) et dans les réseaux (1D). Le schéma de la plateforme LISEM-SWMM est présenté dans le Fig. 4, les détails des calculs sont décrit dans (Hong, Bonhomme, et al., 2017).

2,5 Evaluation de performance

Afin d'évaluer la performance de la modélisation, le coefficient RMSE (racine de l'erreur quadratique moyen) a été appliqué pour calculer les écarts entre les valeurs simulées et les mesures. L'équation de RSME est présenté dans l'Eq. 2. Par conséquent, le plus faible RMSE implique la plus petite différence entre les simulations et les observations, dont la meilleur performance du modèle.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Sim_t - Obs_t)^2}{n}} \quad (2)$$

Où n est le nombre total des mesures comparées, t est le nombre des valeurs variant de 1 à n , Sim_t est la valeur simulée, et Obs_t est la valeur observée.

3, Résultats et discussion

3,1 Simulation des flux d'eau

Des simulations précises de flux d'eau sont nécessaires pour les calculs de processus de transferts de polluants. Pour les simulations à l'échelle locale, les paramètres du débit d'eau sont calibrés en comparant les débits simulés et les mesures à l'avaloir du bassin routier. De même, les paramètres du débit d'eau pour les simulations à l'échelle du quartier sont calibrés par rapports aux observations à l'exutoire des réseaux. Pour chaque échelle, le modèle a été calibré sur un événement de pluie, et validé sur les autres événements. En plus, en bénéficiant des données laser de l'hauteur d'eau sur la surface, l'hauteur de l'eau simulée a été comparée avec les mesures sur le point de télédétection à l'échelle locale. Quelques exemples de simulations de flux d'eau sont illustrées dans la Fig. 5. Selon les résultats, la performance de modèles à tout les deux échelles est très satisfaisante pour la modélisation de flux d'eau. Ainsi, ces résultats ont montrés que ces approches de modélisation sont capables de représenter les variations spatiales et temporelles de flux d'eau sur la surface urbaine. Il est donc justifié que la modélisation distribuée à base physique puisse servir à l'analyse des processus physique de lessivage des pollutant en milieu urbain.

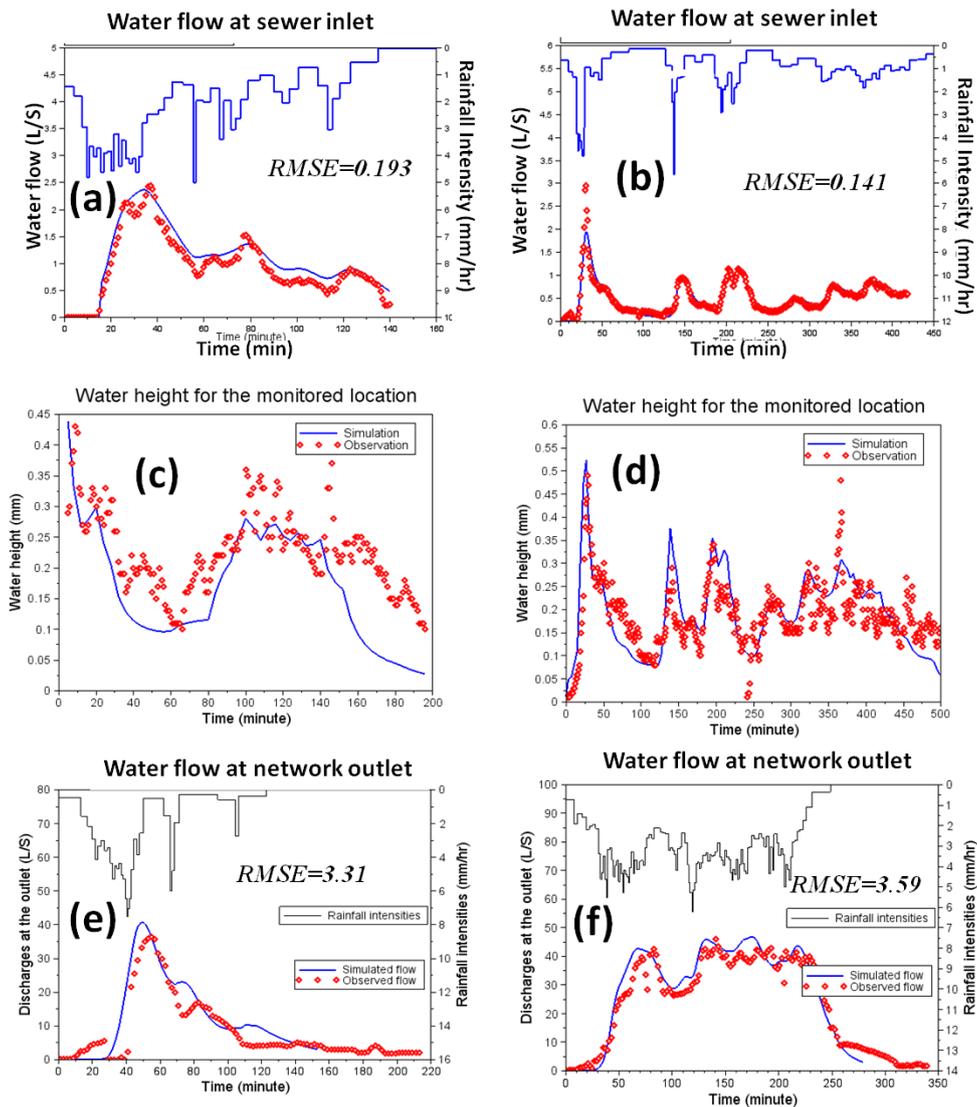


Fig. 5 Exemples de simulations de flux d'eau: (a) et (b), simulations de débits d'eau à l'avaloir à l'échelle locale; (c) et (d), simulations d'hauteurs d'eau sur la surface à l'échelle locale; (e) et (f), simulations de débits d'eau à l'exutoire de réseaux à l'échelle du quartier. Les valeurs simulées sont des lignes bleues, les mesures sont des points rouges, l'intensité de pluie est tracée dans la partie en haut.

3,2 Simulation des Matières En Suspension (MES)

Bénéficiant d'un grand nombre de données détaillées collectées dans le cadre du projet, certains paramètres d'entrée des modèles, telles que les masses de dépôts des particules pendant le temps sec et les caractéristiques des polluants ont été estimés selon les mesures. Les autres paramètres sont calibrés en comparant les concentrations de MES simulées avec les mesures, à l'avaloir du bassin routier pour l'échelle locale, et à l'exutoire des réseaux pour l'échelle du quartier. Quelques exemples de résultats sont présentés dans le Fig. 6. Selon la figure, la performance du modèle est convaincante par rapport aux littératures.

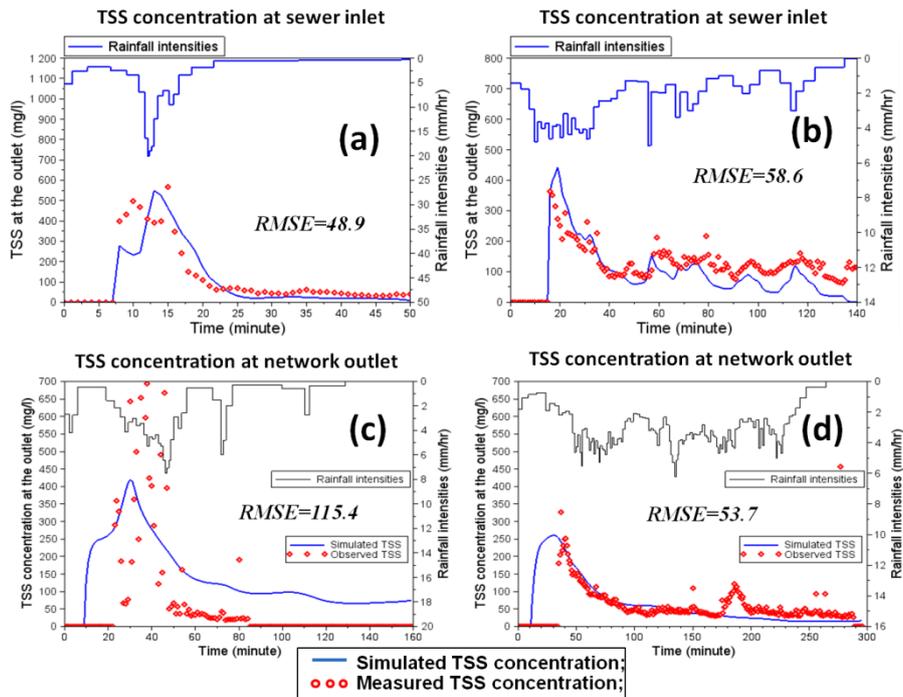


Fig. 6 Exemples de simulations des Matières En Suspension (MES): (a) et (b), simulations de concentration de MES à l'avaloir à l'échelle locale; (c) et (d), simulations de concentration de MES à l'échelle du quartier. Les valeurs simulées sont des lignes bleues, les mesures sont des points rouges, l'intensité de pluie est tracée dans la partie en haut.

3.3 Processus physique du lessivage des polluants sur la surface

A l'échelle locale, le travail de modélisation à base physique couplant avec les données topographiques en haute résolution (10 cm), ainsi que la validation spatiale des flux d'eau, a permis des avancées notables concernant les processus de lessivage sur les surface urbaines. Dans cette section, nous analysons les sorties du modèle pour indiquer des rôles de détachement par la pluie et par les ruissellements dans les processus de lessivage des particules sur les surfaces de bandes roulées, de caniveaux, et de trottoirs. Les résultats sont présentés dans le Fig. 7:

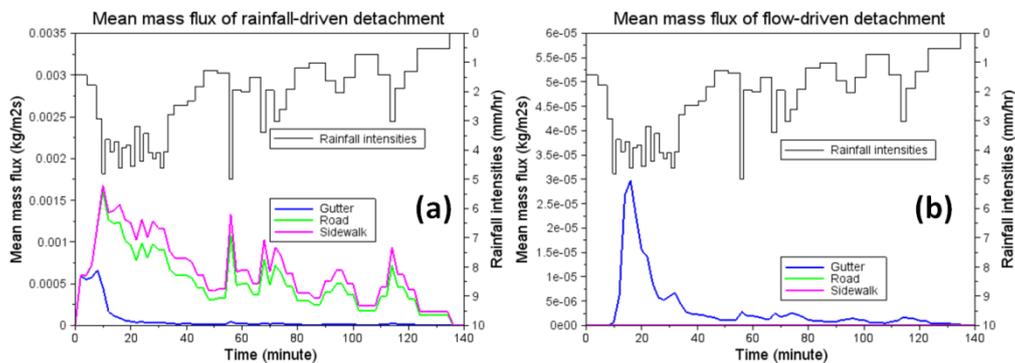


Fig. 7 Les flux de masse de détachement causés par la pluie (a) et par le ruissellement (b). Sur les surfaces de caniveaux (ligne bleue), de bandes roulées (ligne verte), et de trottoirs (ligne rosé); l'intensité de pluie est tracée dans la partie en haut.

D'après ces résultats, nous pouvons indiquer que les impacts de gouttes de pluie sont des effets dominants pour les processus de lessivage, alors les détachements causés par le ruissellement se produisent uniquement sur les surfaces de caniveaux quand les flux d'eau sont assez importants (facteur 100 en masse entre le détachement par la pluie et par l'advection liée au ruissellement). De plus, le processus dominant sur la bande roulée et le trottoir est l'arrachage par les gouttes de pluie alors que dans le caniveau l'entraînement par le flux est dominant.

3,4 Simulation des métaux et des HAPs

A l'échelle du quartier, la prise en compte de la concentration en HAP et métaux des particules, selon leur taille, permet de tracer l'évolution de la concentration en HAP et métaux à l'exutoire du bassin versant urbain, tout en distinguant les classes de particules concernées. De plus, la plateforme LISEM-SWMM a été implémentée dans le cadre de deux scénarios : un scénario de modélisation des polluants à l'exutoire des bassins versants basé sur la connaissance des données d'entrée du bassin versant issus des campagnes de mesure, un scénario présentant en données d'entrée les données de dépôts issues de la modélisation de qualité de l'air d'Airparif pour les particules les plus fines et les données issues des mesures pour les particules plus grossières. Les simulations et les observations des concentrations moyennes par événements de Cuivre (Cu), et deux groupes de HAPs (BaP et BbF) sont comparées dans ce travail (Fig. 8):

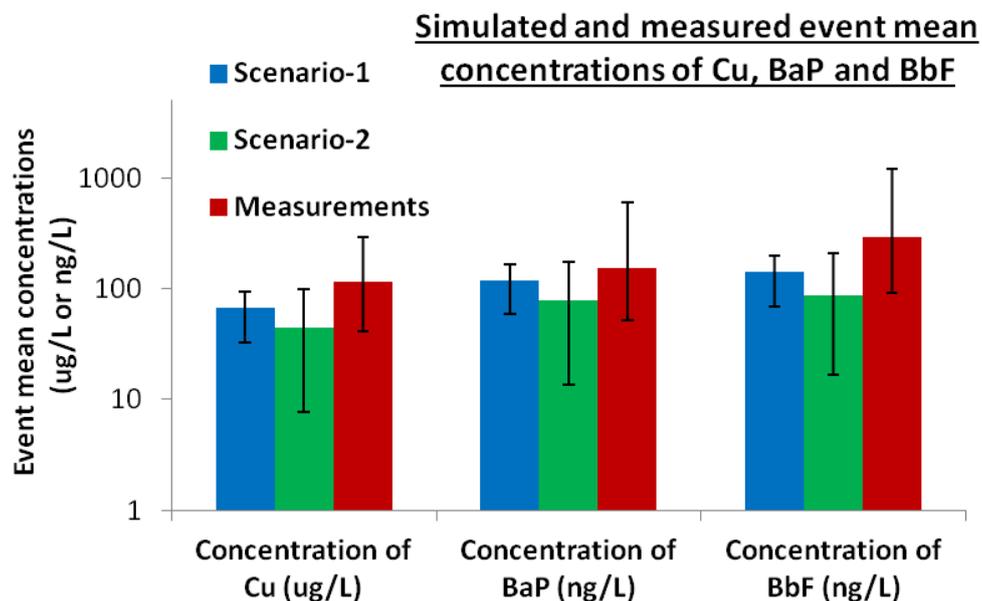


Fig. 8 Simulations et observations des concentrations moyennes par événements de Cu, BaP et BbF

Selon la figure, les résultats montrent que l'emploi de modèles totalement distribués pour la qualité des eaux urbaines peut arriver à reproduire de manière très fine les dynamiques des particules, des hydrocarbures et des métaux. Par contre, les données recueillies à l'exutoire

ne permettent pas clairement de distinguer la pertinence de l'utilisation de données distribuées par rapport à des données moyennées spatialement. Même si à ce stade la plateforme développée nécessite des améliorations pour adapter aux utilisations dans le champ opérationnel, c'est la première fois que de tels développements sont réalisés, ce qui renforce la dimension innovante de la plateforme LISEM-SWMM.

4, Conclusions et perspective

Dans ce travail, nous avons réussi à développer et d'exploiter de nouveaux outils de modélisation de flux de polluants afin d'améliorer la connaissance des processus liés aux polluants par temps de pluie, mais aussi de contribuer au développement d'une chaîne de modélisation dédiée au transfert des polluants liés au trafic routier en zone urbaine (chaîne de modélisation Trafic-Emission-Air-Eau). La performance des modèles est très satisfaisante pour la modélisation des flux d'eau et de polluants, à l'échelle locale ainsi à l'échelle du quartier du milieu urbain. Les différentes analyses de sensibilité conduites aux deux échelles ont mis en évidence l'influence des vitesses de chute des particules à l'échelle locale, ainsi que l'occupation du sol à l'échelle du quartier. L'analyse de processus physique du lessivage des polluants sur les surfaces urbaines montre que le détachement par les gouttes de pluie est prépondérant sur les surfaces urbaines observées, et le processus dominant sur la bande roulée et le trottoir est l'arrachage par les gouttes de pluie alors que dans le caniveau l'entraînement par le flux est dominant. Au niveau du quartier, l'utilisation de données entièrement distribuées provenant de sorties de modèles atmosphériques n'est pas déterminante pour la dynamique des polluants à l'exutoire du bassin versant.

Les travaux réalisés relèvent d'un certain nombre de questions qui pourraient faire l'objet de recherches futures. Tout d'abord, il faudrait approfondir l'évaluation de ce type de modèle en acquérant des données sur la variabilité spatiale et temporelle des particules (tailles, vitesses de chute). De plus, à l'échelle du quartier, il serait important d'évaluer les résultats de concentrations en micropolluants obtenue, et sur des sites de caractéristiques différentes. Par ailleurs, la comparaison des résultats obtenus dans ce travail à ceux qu'on pourrait obtenir avec d'autres modèles plus conceptuels permettrait d'identifier la réelle plus-value du travail.

Compte tenu de la longueur des calculs et de la quantité de données nécessaires pour la mise en œuvre, il serait important d'évaluer l'intérêt de ce type de modèles à l'échelle des agglomérations urbaines. Dans le cadre du programme OPUR, observatoire des polluants urbains en Ile de France, des réunions de concertation entre chercheurs et opérationnels devraient permettre d'identifier les adaptations et les simplifications à apporter éventuellement pour passer à plus grande échelle. Actuellement, la lourdeur associée à l'utilisation de ce type de modèles pourrait constituer un obstacle à une utilisation opérationnelle, sans la mise en place d'une expertise des chercheurs qui ont participé au développement.

5, Remerciements

Cette étude à été conduite dans le cadre de l'Observatoire de Polluants Urbains de la région Parisienne (OPUR) et le projet ANR "Trafipollu". Les auteurs remercient vivement les différents partenaires du projet Trafipollu de nous avoir fourni des données. En particulier B. Soleilhan (IGN) et V. Bousquet (IGN-Conseil) pour les données SIG; F. Mahe et F. Dugay (AirParif), C. Seigneur et Y. Roustan (CEREA) pour les données atmosphériques; B. Béchet (IFSTTAR), D. Ramier (CEREMA), M. Saad et P. Dubois (LEESU) pour les données mesurées.

6, Bibliographie

- Bressy, A., Gromaire, M.-C., Lorgeoux, C., Saad, M., Leroy, F., and Chebbo, G. (2012) Towards the determination of an optimal scale for stormwater quality management: Micropollutants in a small residential catchment. *Water Research*, **46**(20), 6799–6810.
- Delestre, O., Cordier, S., Darboux, F., Du, M., James, F., Laguerre, C., Lucas, C., and Planchon, O. (2014) "FullSWOF: A Software for Overland Flow Simulation" in P. Gourbesville, J. Cunge, and G. Caignaert (eds.), *Advances in Hydroinformatics*. Singapore, Springer Singapore, 221–231. [online] http://link.springer.com/10.1007/978-981-4451-42-0_19 (Accessed February 5, 2015).
- Fletcher, T. D., Andrieu, H., and Hamel, P. (2013) Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*, **51**, 261–279.
- Hairsine, P. B. and Rose, C. W. (1992a) Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 1. Sheet flow. *Water Resources Research*, **28**(1), 237–243.
- Hairsine, P. B. and Rose, C. W. (1992b) Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 2. Rill flow. *Water Resources Research*, **28**(1), 245–250.
- Hong, Y., Bonhomme, C., Bout, B. V. den, Jetten, V., and Chebbo, G. (2017) Integrating atmospheric deposition, soil erosion and sewer transport models to assess the transfer of traffic-related pollutants in urban areas. *Environmental Modelling & Software*, **96**, 158–171.
- Hong, Y., Bonhomme, C., Le, M.-H., and Chebbo, G. (2016a) A new approach of monitoring and physically-based modelling to investigate urban wash-off process on a road catchment near Paris. *Water Research*, **102**, 96–108.
- Hong, Y., Bonhomme, C., Le, M.-H., and Chebbo, G. (2016b) New insights into the urban washoff process with detailed physical modelling. *Science of The Total Environment*, **573**, 924–936.
- ONU (2014) *Perspectives de l'urbanisation mondiale*, L'Organisation des Nations unies.

- De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., and Ritsema, C. J. (1996) Lisem: A Single-Event Physically Based Hydrological and Soil Erosion Model for Drainage Basins. I: Theory, Input and Output. *Hydrological Processes*, **10**(8), 1107–1117.
- Rossman, Lewis A. (2010) *Storm water management model user's manual version 5.0*, Cincinnati, OH 45268, National risk management research and development U.S. environmental protection agency.
- Salvadore, E., Bronders, J., and Batelaan, O. (2015) Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, **529**, **Part 1**, 62–81.
- Sartor, J. D., Boyd, G. B., and Agardy, F. J. (1974) Water Pollution Aspects of Street Surface Contaminants. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, **46**(3), 458–467.