



laboratoire eau environnement systemes urbains



UNIVERSITÉ  
— PARIS-EST



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

**Yi HONG**

Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (LEESU)  
Ecole des Ponts, Université Paris-Est, AgroParisTech

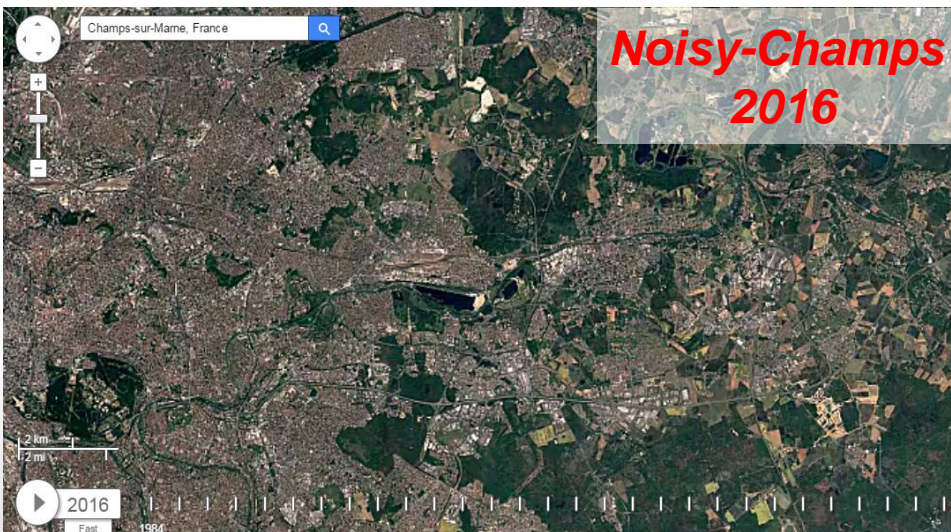
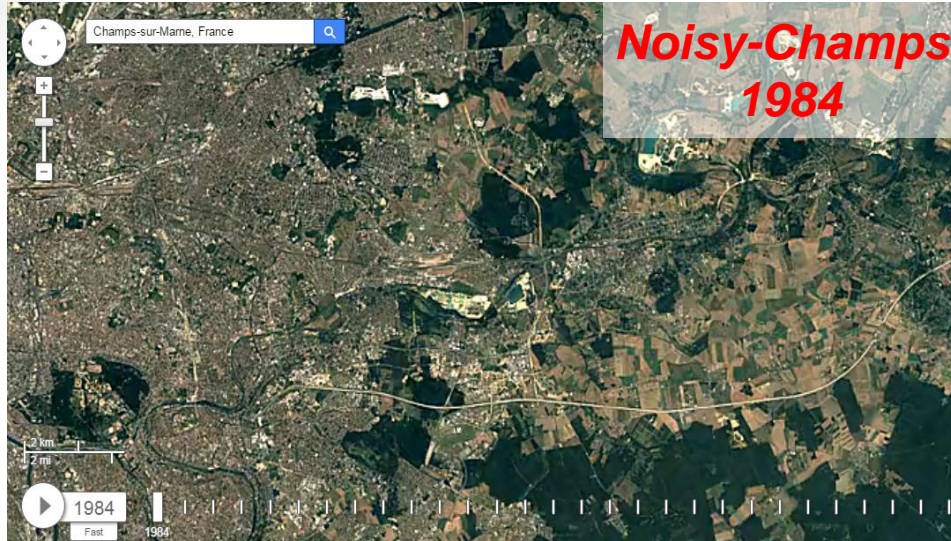
*yi.hong@leesu.enpc.fr*



# Plan de présentation

- **Introduction**
  - Contexte et problématique;
  - Etat de l'art de la modélisation hydrologique urbaine;
  - Objectifs.
- Modélisation à l'échelle locale
- Modélisation à l'échelle du quartier
- Conclusions et perspectives

# Urbanisation rapide



Surface imperméables;  
Réseaux d'assainissement;



- + Débits de pointe par temps de pluie;
- + Volumes de ruissellement;
- Temps de réponse du bassin;
- Infiltration vers la nappe;
- + Charges polluantes;
- Qualité des eaux.



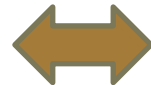
**Protéger les populations, la ville, les milieux aquatiques;**

**Contre les risques sanitaires, les inondations, les rejets polluants.**

# Les conséquences et les Enjeux de management



Risques  
d'inondation;

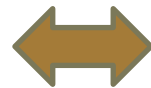


Distribution de  
l'eau hétérogène  
et évolué;

# Les conséquences et les Enjeux de management



Pollutions  
domiciles/  
Industrielles;

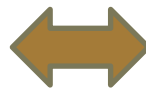


Planification,  
Capacité des  
réseaux;

# Les conséquences et les Enjeux de management



Pollutions des  
eaux  
pluviales;



Pollution diffuse,  
directement en  
milieu naturel;

# Modélisation !!!

M  
O  
D  
E  
L  
I  
S  
A  
T  
I  
O  
N

- Simulation de la distribution d'eau.
- Simulation des rejets domiciles/industriels.
- Simulation spatiale des émissions du trafic.
- Simulation spatiale des polluants liés aux entretiens.



# Classification des modèles hydrologiques

Relations  
entre les  
variables

Déterministe

Stochastique

Description des  
processus

Conceptuel  
ou à base  
Physique

Statistique

Période de  
simulation

Événementiel

Continu

Discrétisation  
spatiale

Distribué

Semi-  
distribué

Global

- ❑ Capable de représenter les **variations spatiales et temporelles**;
- ❑ Permet d'analyser les **processus physiques** (quantité et qualité) à l'échelle de la maille;
- ❑ Modulable;



# Avantages du modèle distribué

- **Identification des chemins cachés pour les flux des eaux/polluants;**
- **Localisation des endroits où le risque d'inondation est plus élevé, afin d'adapter les stratégies de management;**
- **Localisation des endroits où la charge des polluants est plus important, afin d'adapter les stratégies de management;**
- **Spatialisation des émissions de polluant venant de différentes occupations du sol, forte en modélisation de polluant diffuse;**
- **Couplage avec les autres modules de l'écosystème urbain. (e.g. Lacs, B.V. agricole etc.)**

# Modélisation de la qualité de l'eau en milieu urbain

- **Deux processus principaux de transfert des polluants**
  - Accumulation des particules sur les surfaces (*Build-up*);
  - Lessivage des solides en temps de pluie sur les surfaces (*Wash-off*).
- **Premiers modèles proposés en 1970s.**
  - Approche semi-distribuée: sous-bassins;
  - Description conceptuelle des processus pour l'accumulation et le lessivage (Sartor et al. 1974).
- **Performance limitée des modèles actuels**
  - Manque de données;
  - Manque de connaissances sur les processus

# Objectifs

- **Adapter** les **modèles d'érosion** utilisés traditionnellement au milieu naturel au transfert des polluants en zone urbaine pour simuler les flux de polluants routiers dans un environnement urbain à deux échelles spatiales (locale et quartier).

⇒ Modélisation des contaminants particuliers.

- **Analyser** les sorties de modèle obtenues pour **améliorer la connaissance** vis-à-vis de la production et du transfert des contaminant par temps de pluie.

⇒ Analyse spatiale et temporelle, scénarios de simulation.

# Plan de présentation

- Introduction
- **Modélisation à l'échelle locale**
  - Modèle FullSWOF-HR;
  - Site d'étude et bassin-versant local;
  - Résultats des simulations;
  - Analyse des processus physiques de lessivage.
- Modélisation à l'échelle du quartier
- Conclusion et Perspectives

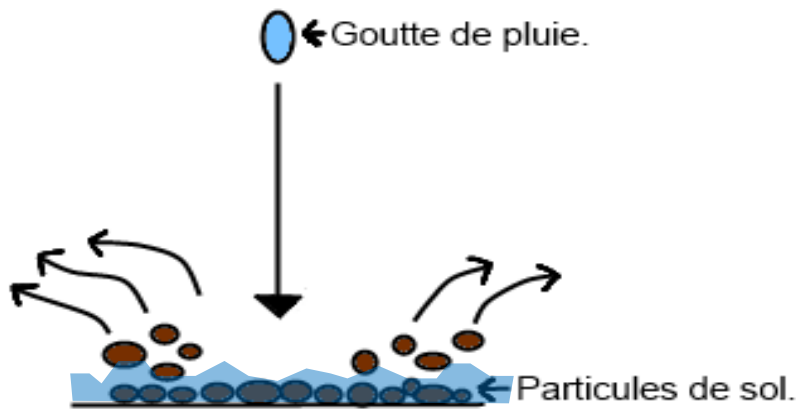


*Hong et al., 2016. Water Res. 102, 96–108.*

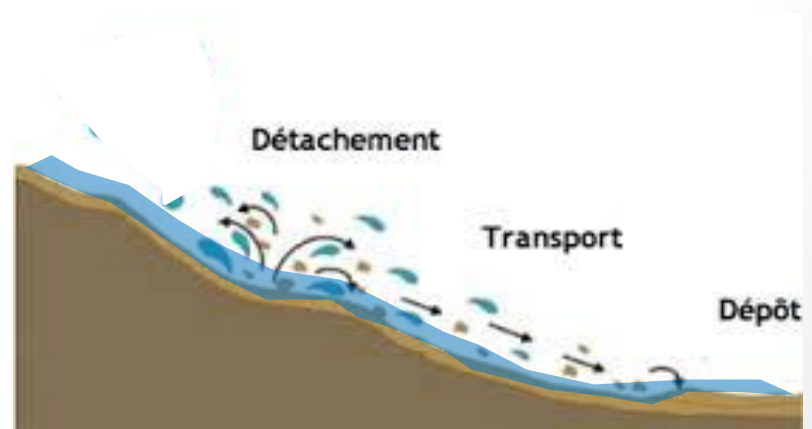
*Hong et al., 2016. Sci. Total Environ. 573, 924–936.*

# Modèle FullSWOF - HR

- Développé au sein du MAPMO à l'université d'Orléans (2014), écrit en C++;
- Equations de **Saint-Venant 2D** avec la méthode des **volumes finis** pour la modélisation quantitative;
- Adaptation du modèle de **Hairsine-Rose** (modèle d'érosion) au milieu urbain pour la modélisation qualitative;

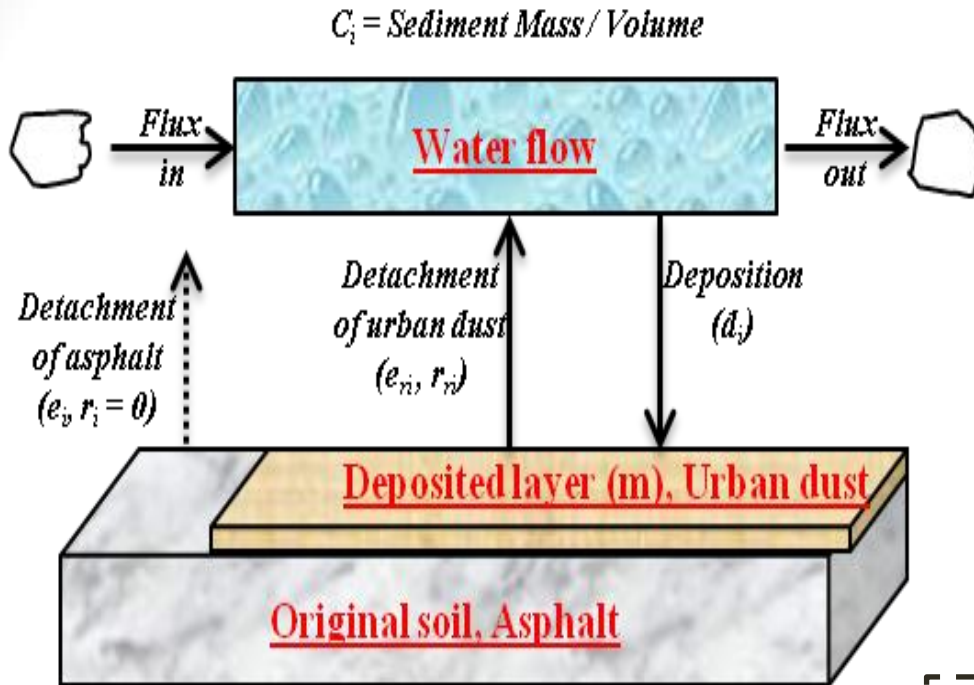


Effet des gouttes de pluie



Effet du ruissellement

# Modèle Hairsine-Rose



$$e_{ri} = \frac{m_i}{m_T} a_d P$$

$$r_{ri} = \frac{m_i}{m_T} \frac{\Omega_e}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} gh}$$

$e_{ri}$ : Le détachement par la pluie;  
 $r_{ri}$ : Le détachement par le ruissellement;

- $m_i/m_T$ : La proportion d'une classe de particules
- $a_d$ : La détachabilité des sédiments;
- $P$ : L'intensité de pluie;
- $\Omega_e$ : La puissance effective d'écoulement;
- $h$ : La hauteur d'eau.

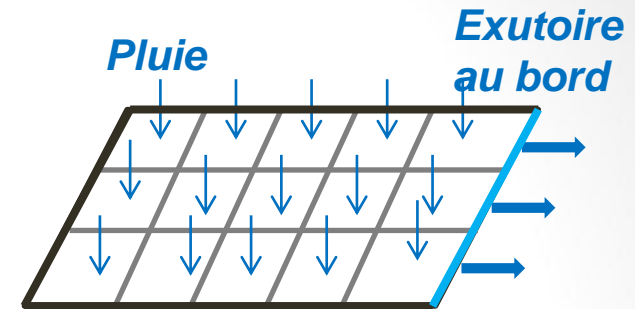
$$a_d = \begin{cases} a_{d0}, & h \leq h_0 \\ a_{d0} (h_0/h)^b, & h > h_0 \end{cases}$$

$$\Omega_e = F(\Omega - \Omega_0) \quad \Omega = \rho_w g S_f q_i$$

# Adaptations de FullSWOF au milieu urbain

## • FullSWOF original:

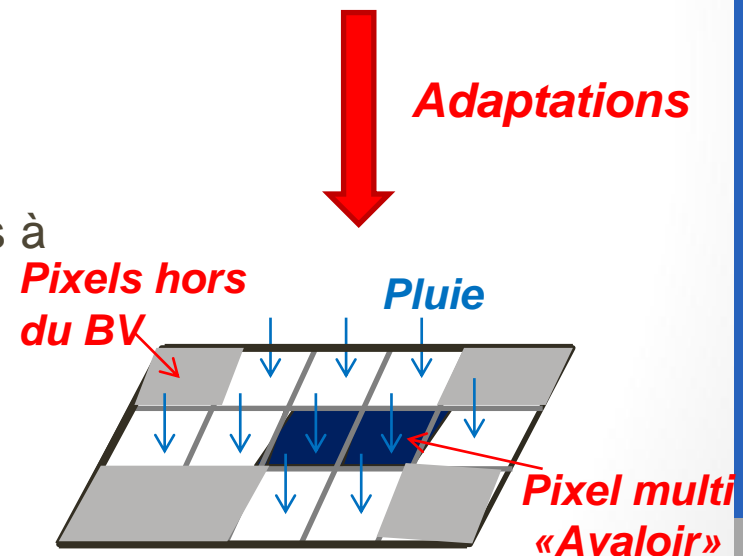
- Bassin-versant rectangulaire;
- Précipitations sur tous les points intérieurs;
- Calcul du ruissellement pour chaque pixel;
- Exutoire uniquement au bord du bassin;



**Schéma explicative du FullSWOF original**

## • Adaptations pour le milieu urbain:

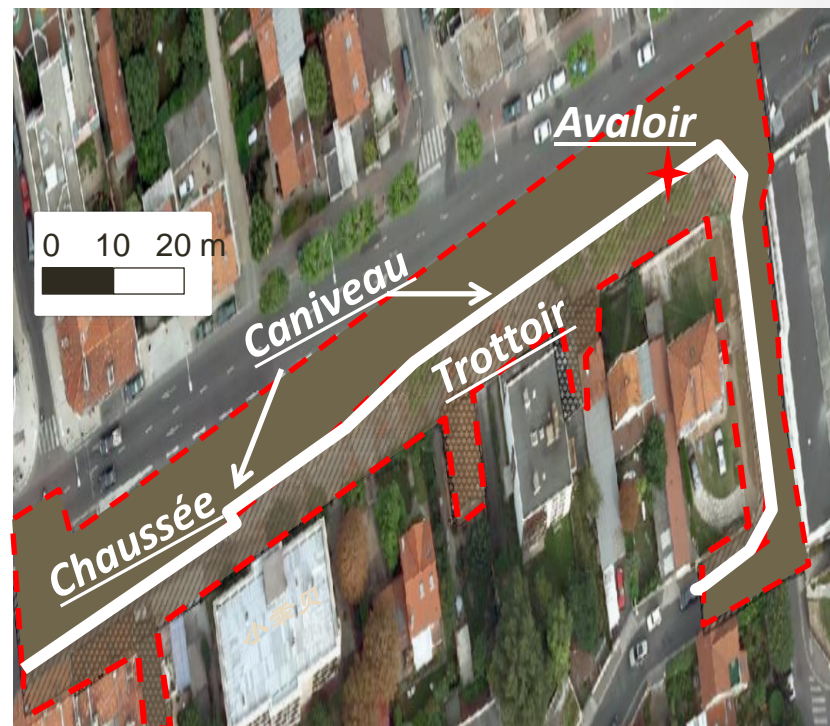
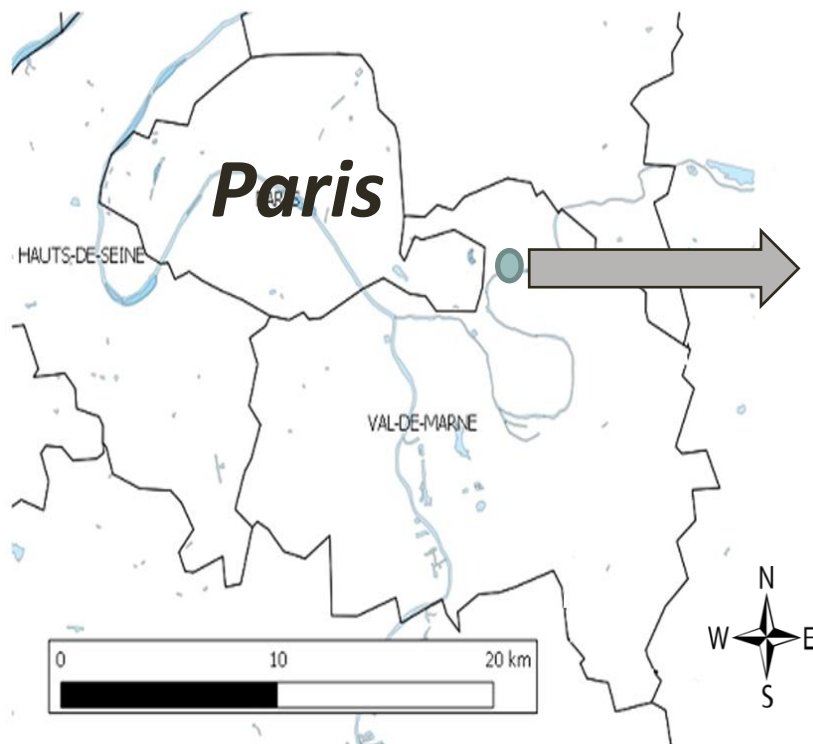
- Bassin versant de forme quelconque;
- Ajout de pixels « Avaloir », multi-exutoires à l'intérieur du bassin;
- Analyse possible des sorties de modèles selon les types d'occupation du sol.



**Schéma explicative du FullSWOF-urbain**

(Collaboration avec M-H LE)

# Site d'étude et bassin-versant local

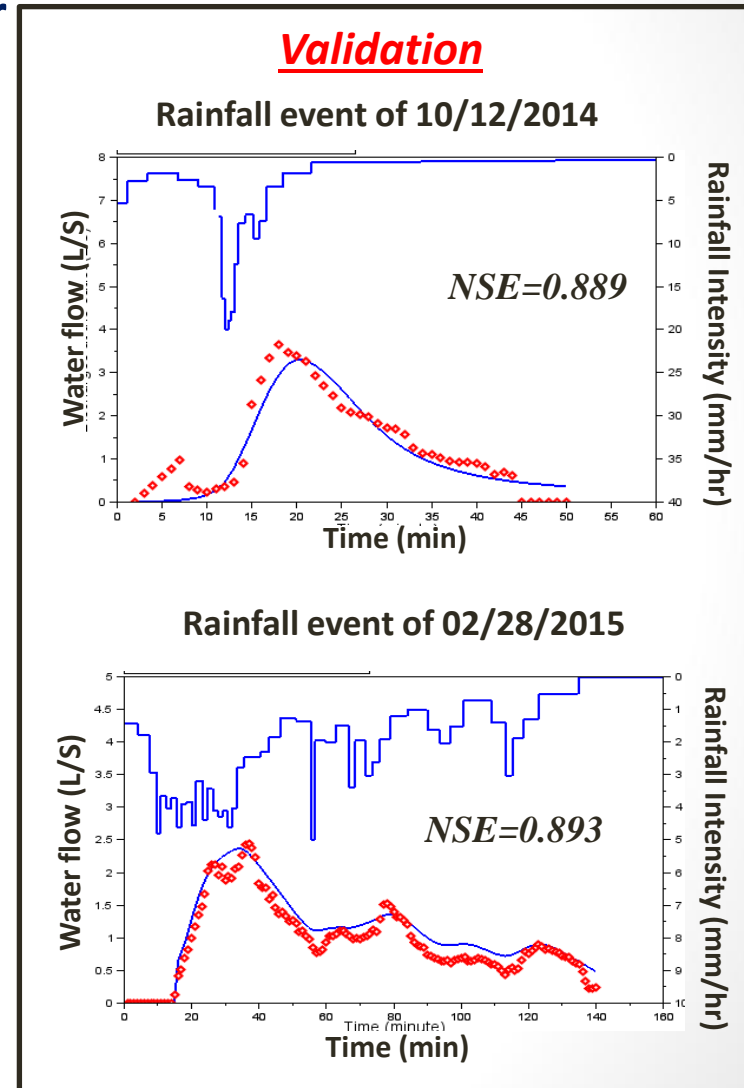
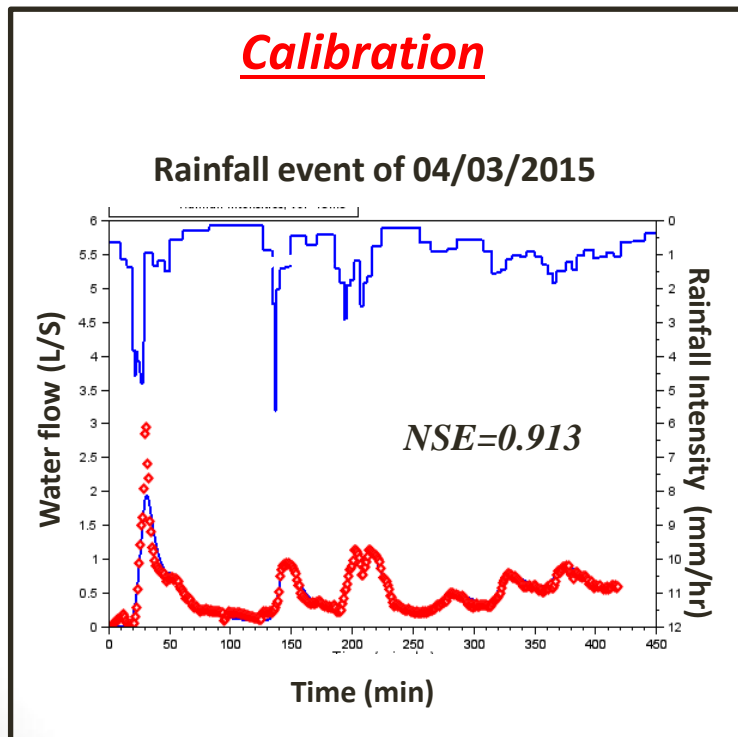


- Surface totale 2661 m<sup>2</sup>; Pente moyenne 2%;
- Données topographiques très haute résolution (10cm);
- 56 événements, mesures en continu de débit et de turbidité à l'avaloir, mesures de profondeur d'eau de ruissellement;



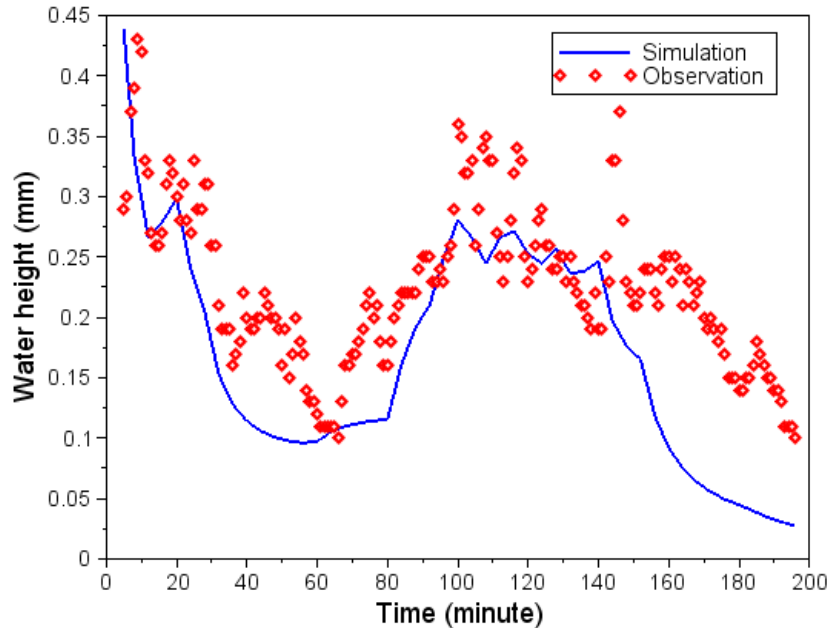
# Simulation des flux d'eau à l'avaloir

- Calibration sur 1 événement, validation sur les autres événements.
- Très haut niveau de performance, ( $NSE > 0.7$ ).

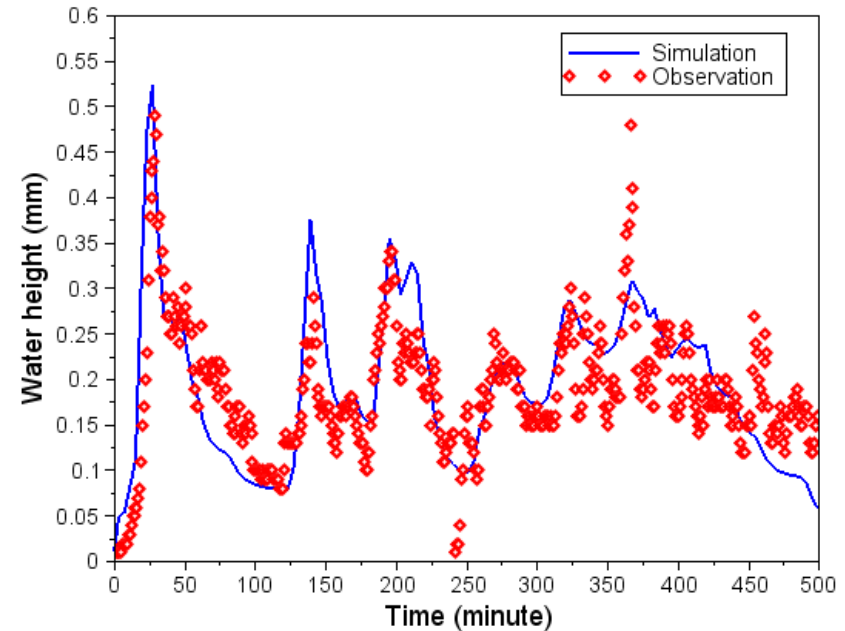


# Simulation de la hauteur d'eau sur la surface

Water height for the monitored location

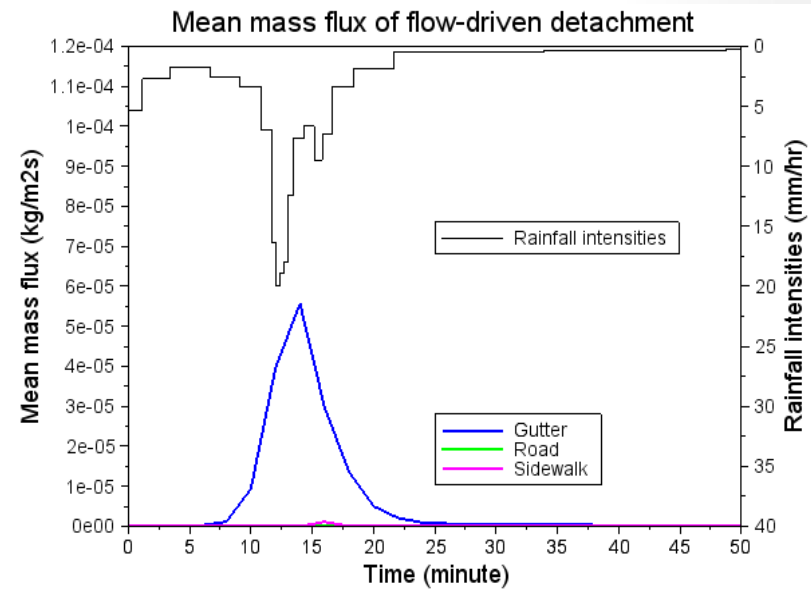
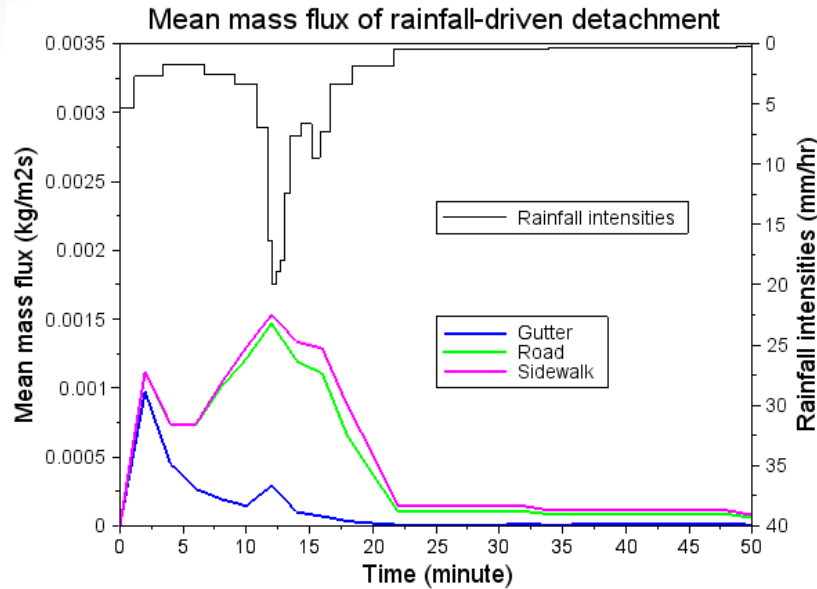


Water height for the monitored location

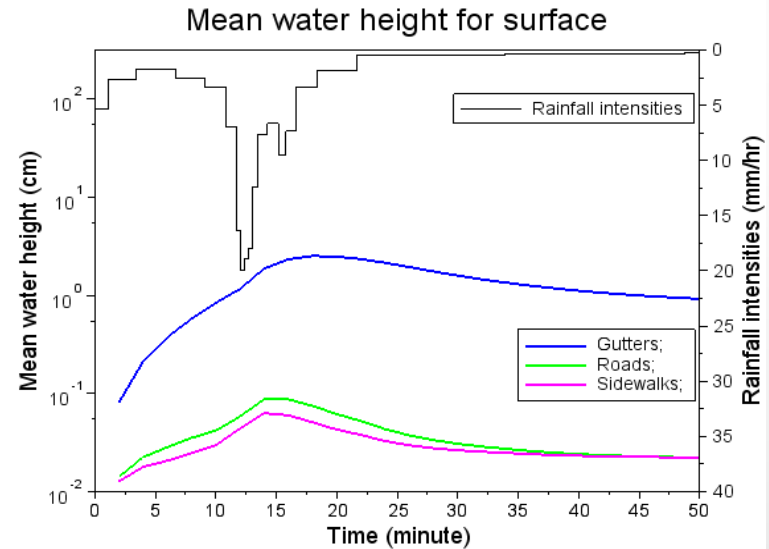


- **Les résultats de simulation très satisfaisants;**
- **Validation à l'échelle très fine de 0 – 0.5 mm.**

# Localisation des effets de détachement selon les processus



- Impact des gouttes de pluie >> Effet du flux d'eau;
- Détachement par flux d'eau se produit uniquement dans le caniveau.
- Détachement par les gouttes de pluie diminue avec l'augmentation des hauteurs d'eau;



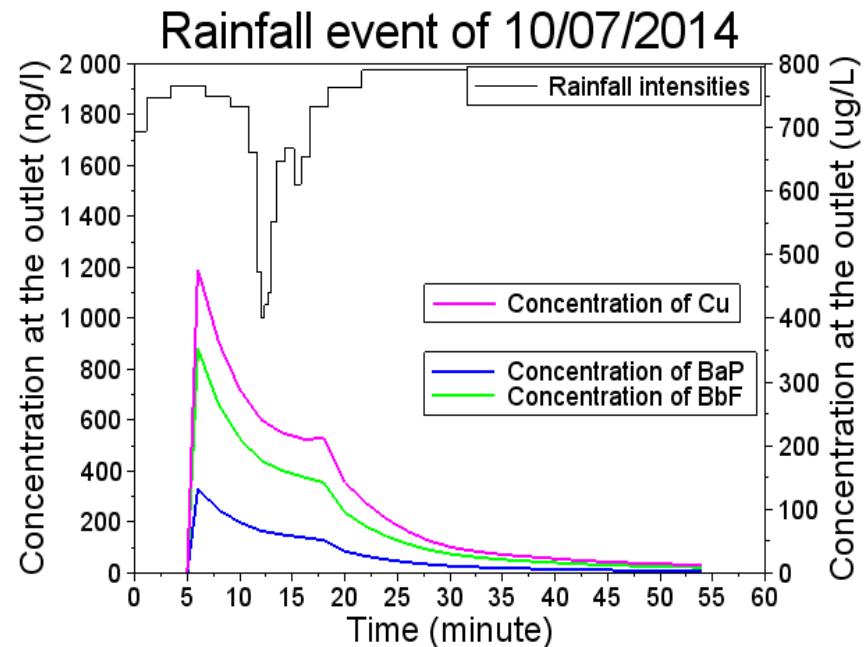
# Simulations des concentrations des contaminants à l'avaloir

- Prise en compte des teneurs des différentes classes de particules en métaux et en HAPs.
- Simulations des concentrations des contaminants.

## Teneur en contaminants

	Teneur en Cu (µg/g)	Teneur en BaP (ng/g)	Teneur en BbF (ng/g)
Particules (< 15µm)	384.7	275.2	725.3
Particules (15 – 125 µm)	369.1	160.3	489.4
Particules (125 – 400 µm)	147.3	75.1	269.6

## Simulations des contaminants



# Plan de présentation

- Introduction
- Modélisation à l'échelle local
- **Modélisation à l'échelle du quartier**
  - Développement du modèle LISEM - SWMM;
  - Données utilisées à l'échelle du quartier;
  - Configuration de modèle pour simuler les métaux et les HAPs;
  - Résultats de simulations.
- Conclusion et Perspectives



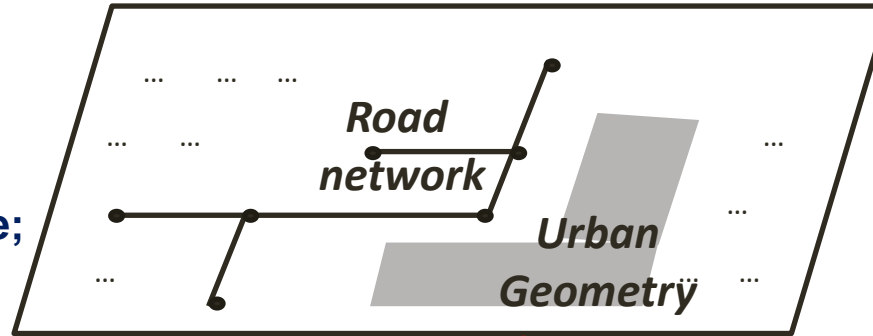
*Hong et al., 2016. Water 8, 606.*

*Hong et al., 2017 Environmental Model. Softw.*

# Modèle LISEM-SWMM

## Surface:

- Equation St-Venant 2D;
- Modèle Hairsine – Rose;
- Volumes finis, 8 directions;

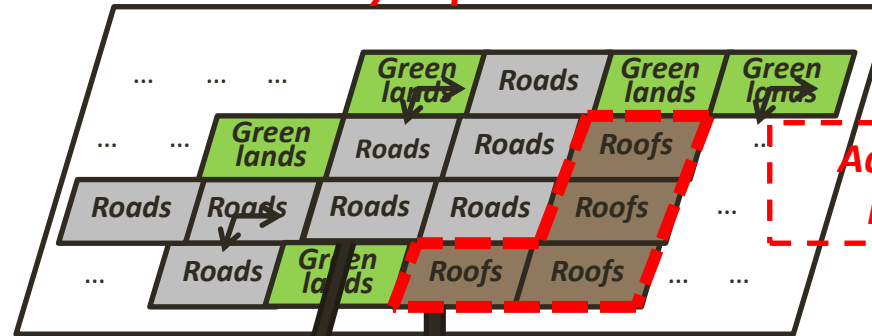


Air quality Component

**Atmospheric Dry deposition**

## Toiture:

- Réservoir non-linéaire;
- Equation exponentielle;

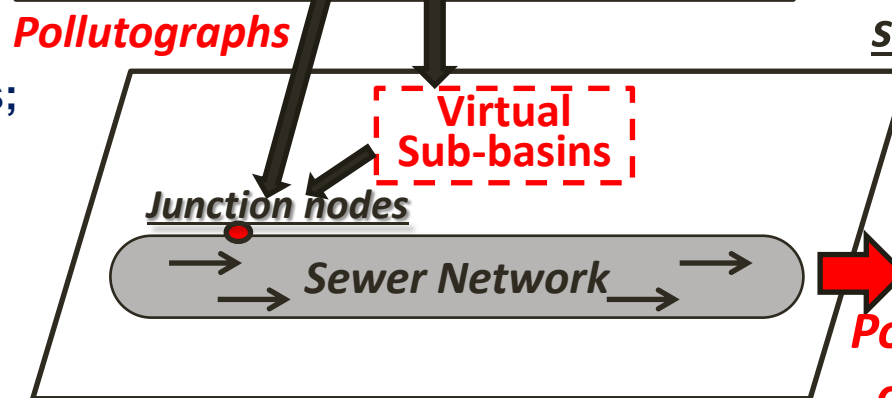


2D-Surface Component

**Adaptation au milieu urbain.**

## Réseau:

- Equation St-Venant 1D;
- Advection des polluants;
- Différences finies;

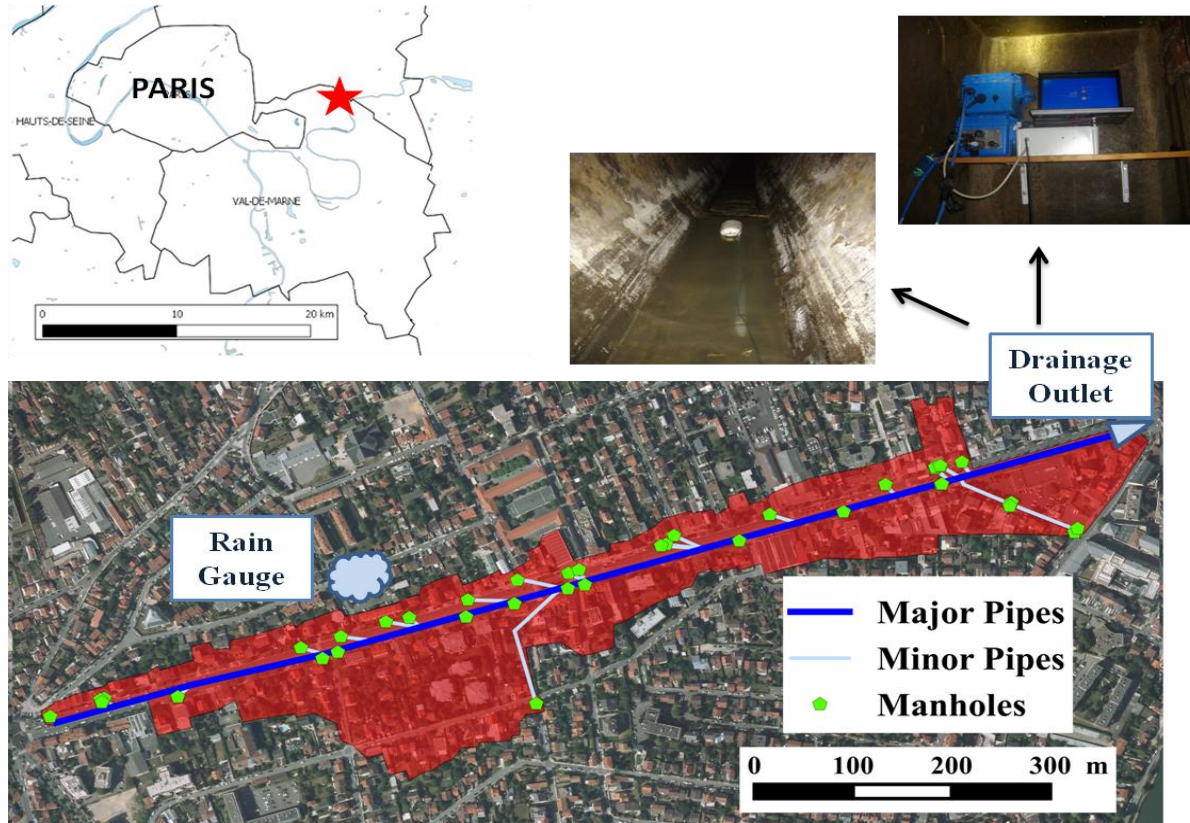


Roof and sewer network Component

**Pollutograph at the catchment outlet**

## Open-sources.

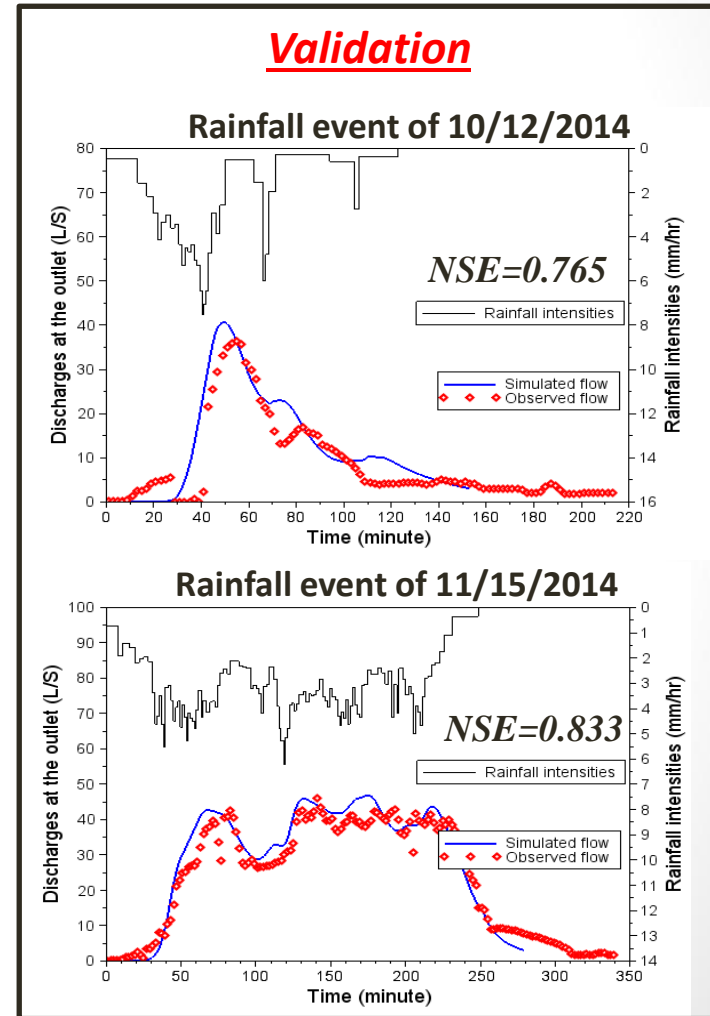
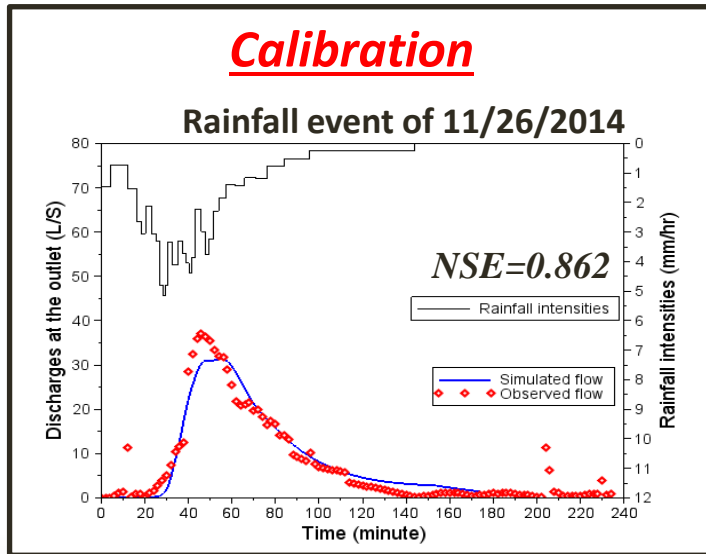
# Site d'étude et bassin versant à l'échelle du quartier



- Surface totale 11.5 ha; Pente moyenne 2%;
- Données de réseaux détaillées, 13 différentes classes d'occupation du sol;
- Mesures en continu de débit et de turbidité à l'exutoire du réseau.

# Simulations quantitatives

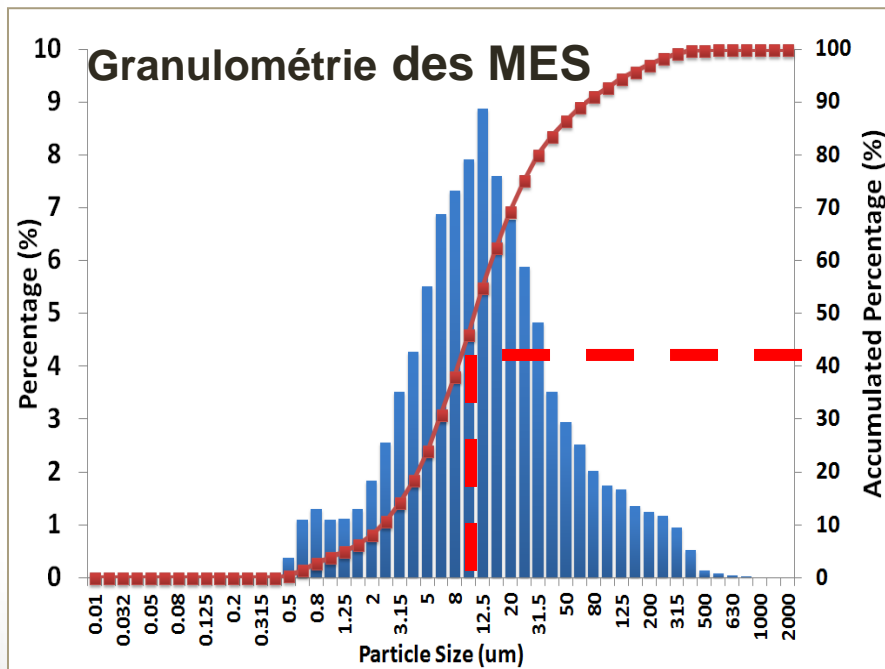
- Calibration sur 1 événement, validation sur une dizaine d'autres événements.
- Bon niveau de performance ( $NSE > 0.6$ ).





# Deux classes de particule pour la simulation qualitative

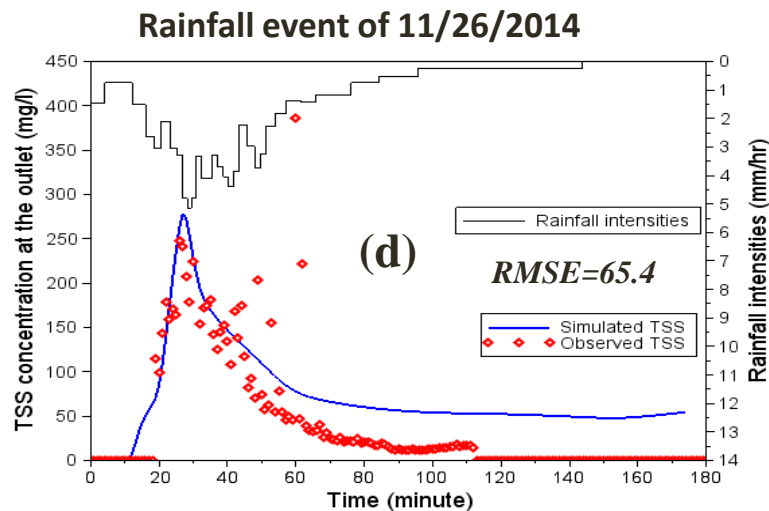
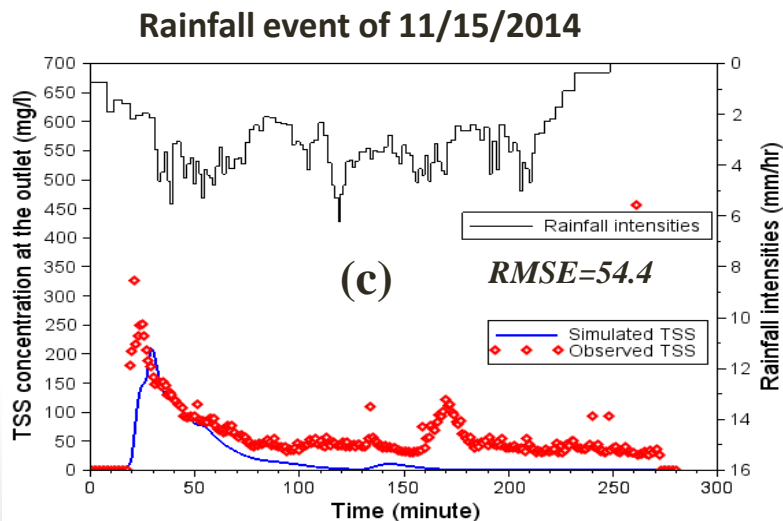
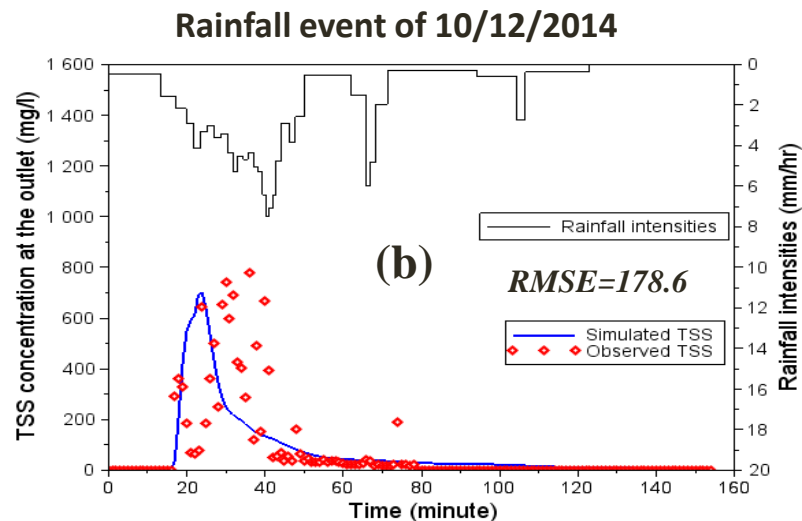
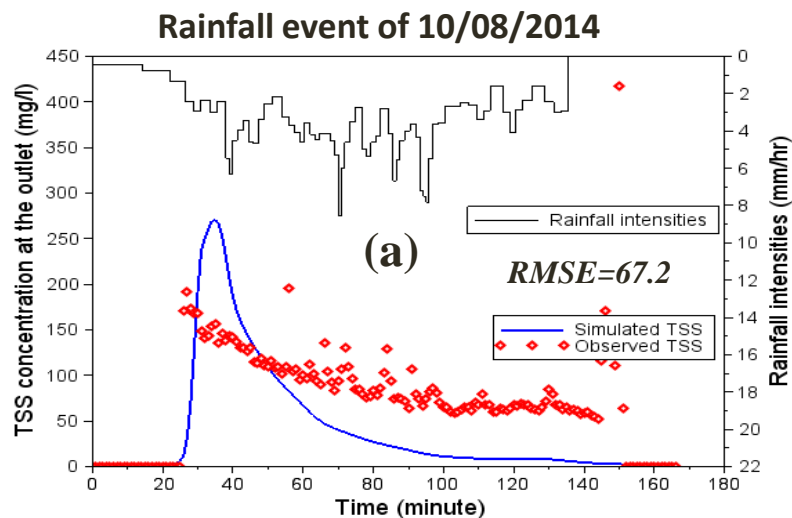
- **Classe I: Particules de dépôts atmosphériques PM10 ( $< 10 \mu\text{m}$ );**
- **Classe II: D'autres particules mobilisables lors des événements de pluie ( $> 10 \mu\text{m}$ ).**



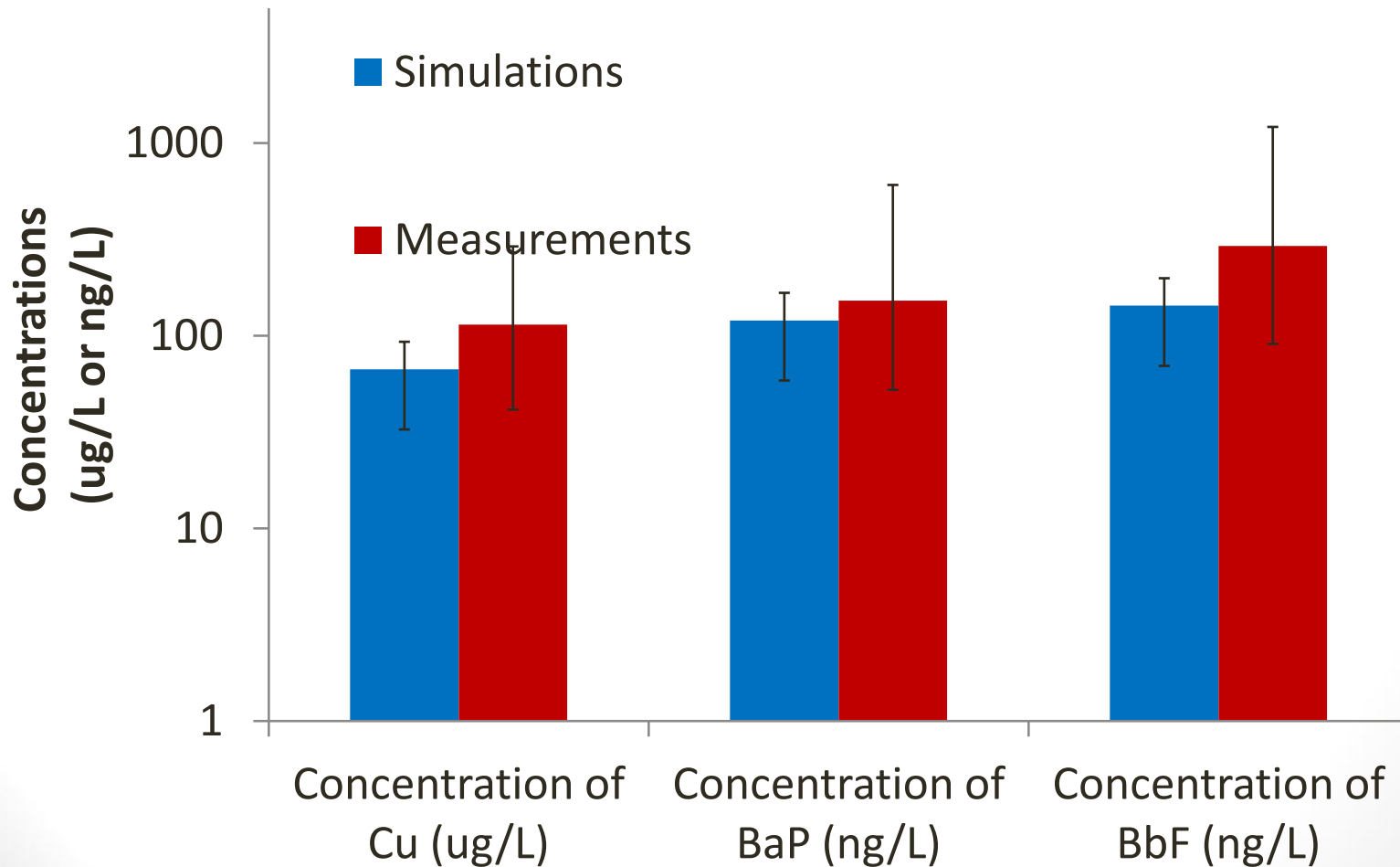
	D50 ( $\mu\text{m}$ )	Proportion (%)
Fine ( $< 10 \mu\text{m}$ )	5	45
Grossière ( $> 10 \mu\text{m}$ )	25	55

# Simulation de MES à l'exutoire

- Les paramètres sont calibrés pour chaque scénario;
- Niveau de performance acceptable;



## Simulations et observations des concentrations moyennes par événements de Cu, BaP, et BbF



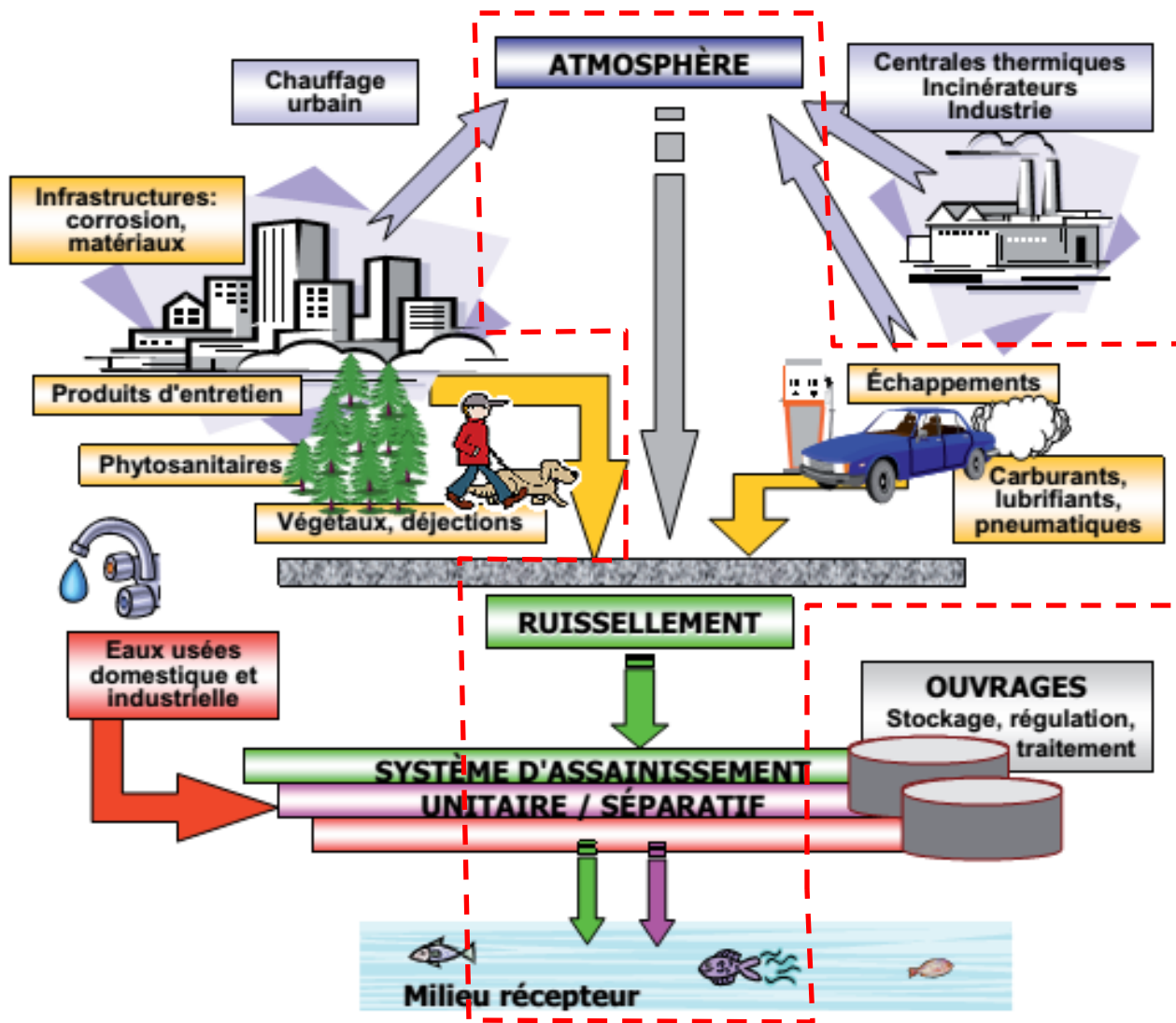
# Perspectives

- **Mise en place des nouveaux dispositifs d'expérimentations, sur des différents sites;**
- **Comparaisons des performances des modèles à base physique avec des modèles conceptuels;**
- **Adapter/appliquer nouveaux modèles à base physique pour résoudre des problèmes concrets (*par exemple, transfert des grosses solides dans les réseaux d'assainissement, l'air dans les réseaux, inondation dans la ville, qualité des eaux du lac etc...*)**
- **Les modèles à base physique ne sont pas des modèles opérationnelles directs, l'adaptation aux usages opérationnels.**

# Merci de votre attention!



# Pollution des eaux urbaines



(Opur 2009)

## Polluants liés au trafic routier:

- Particules et Matières en suspension (MES);
- Éléments Trace Métalliques (ETM);
- Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAPs).

## Modèles d'érosion au milieu naturel

Type  
« **USLE** »

$$A = RKLCSP$$

- + Largement utilisées, facile à appliquer;
- Basées sur les mesures empiriques, bassin naturel;
- e.g.: *Modèle RUSLE (USDA 1997)*.

Type  
« **Energie** »

$$\Omega = \rho g Q S$$

- + Capable de coupler avec les énergies de pluie;
- « Loi physique » contestable;
- e.g.: *Modèle Hairesine and Rose (1991)*.

Type  
« **Contrainte  
de  
cisaillement** »

$$\tau(y) = \mu \partial u / \partial y$$

- + Bien respecter les théories physiques;
- Manque des effets de gouttes de pluie;
- e.g.: *Modèle Wepp (USDA 1996)*.

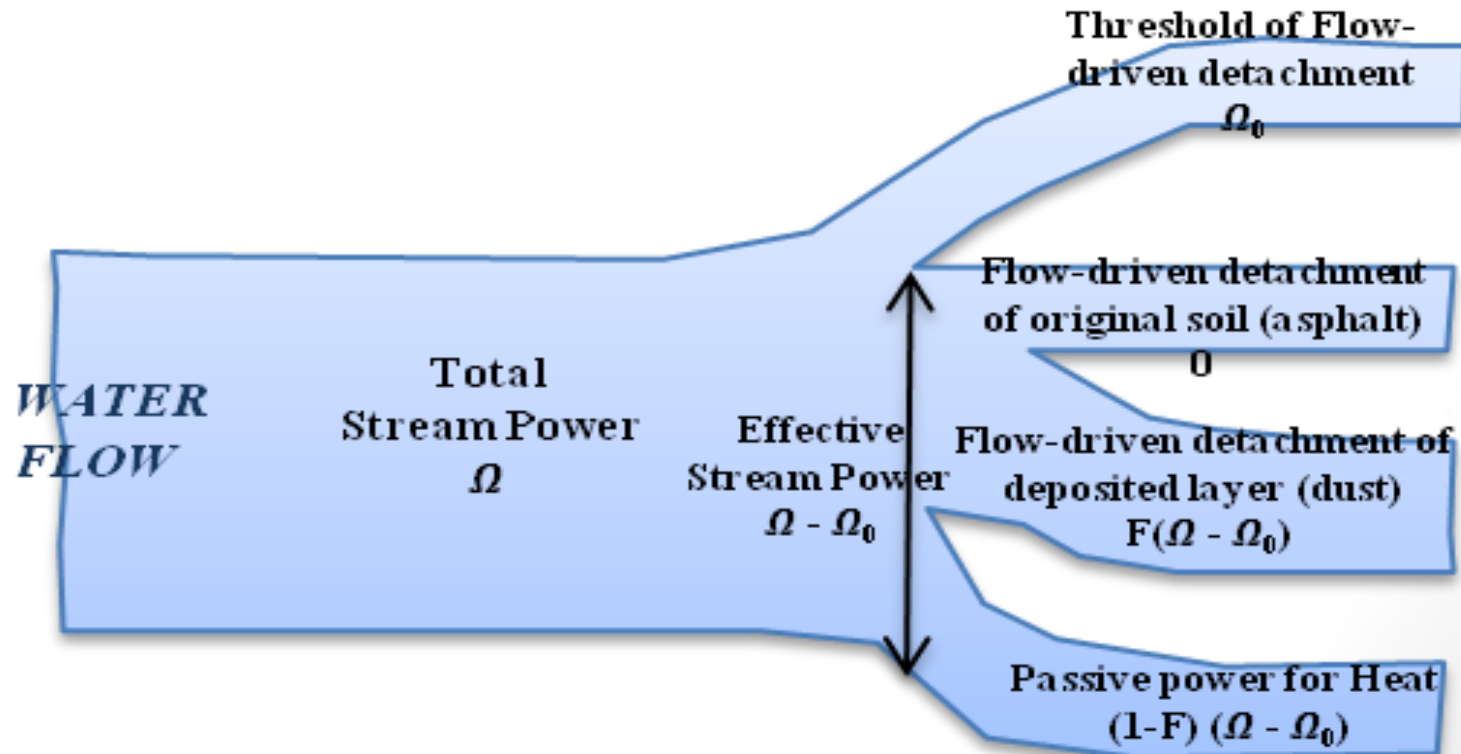
## Modèle Hairsine-Rose

$$e_{ri} = \frac{m_i}{m_T} a_d P$$

$$r_{ri} = \frac{m_i}{m_T} \frac{\Omega_s}{\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} gh}$$

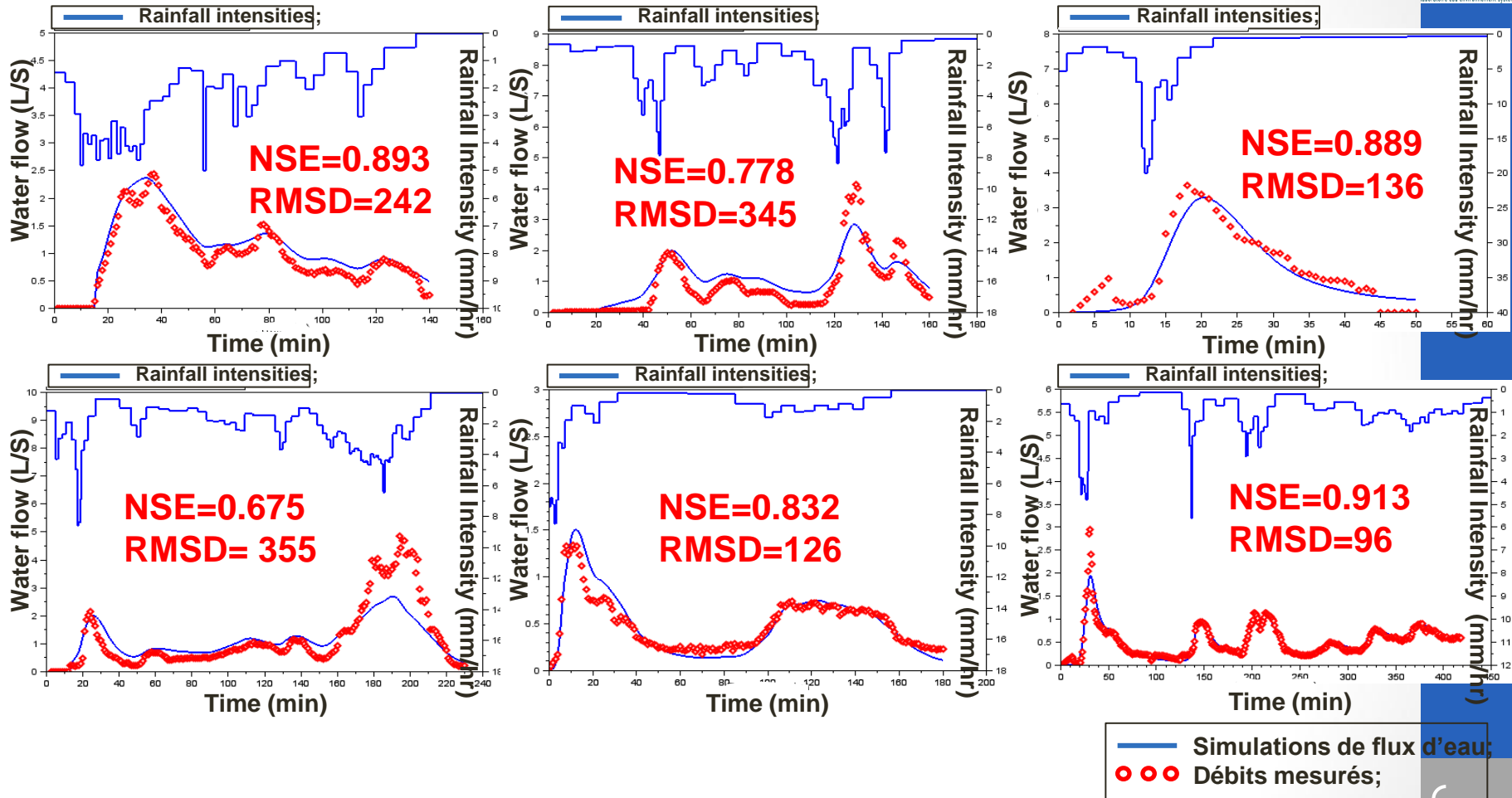
$$\Omega_e = F(\Omega - \Omega_0) \quad \Omega = \rho_w g S_f q$$

$$a_d = \begin{cases} a_{d0}, & h \leq h_0 \\ a_{d0} (h_0/h)^b, & h > h_0 \end{cases}$$



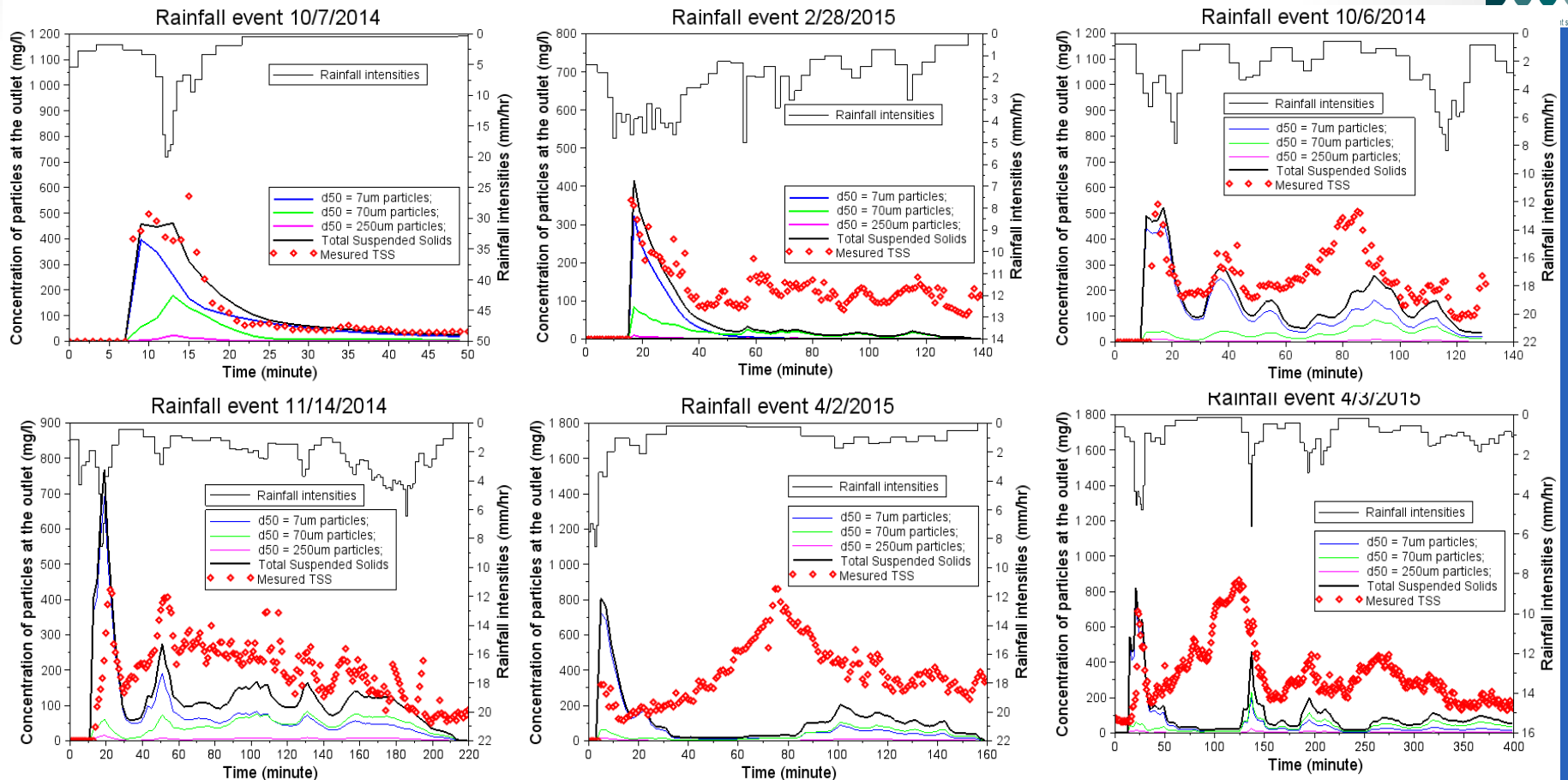


# Simulation des flux d'eau à l'avaloir



- Modèle calibré sur l'événement de 28/02/2015, et validé sur les autres 5 événements.

# Simulation de 3 classes de particules



- Simulation de 3 classes de particules;
- Concentrations de MEST sont comparées avec les mesures continues;
- La dynamique de MEST est correctement simulée,