



**HAL**  
open science

## Conception et validation d'un modèle conceptuel de matières en suspension sur dix bassins versants urbains

A. Otfinowska, T. Leviandier, Y. Takakura

### ► To cite this version:

A. Otfinowska, T. Leviandier, Y. Takakura. Conception et validation d'un modèle conceptuel de matières en suspension sur dix bassins versants urbains. NOVATECH 2007 - 6ème Conférence sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie / 6th International Conference on sustainable techniques and strategies for urban water management, Jun 2007, Lyon, France. pp.555-562. hal-03285236

**HAL Id: hal-03285236**

**<https://hal.science/hal-03285236>**

Submitted on 13 Jul 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Conception et validation d'un modèle conceptuel de matières en suspension sur dix bassins versants urbains**

Design of a conceptual model of suspended sediments with validation on sewage systems data from ten urban catchments

Otfinowska A.\*, Leviandier T.\*\*, Takakura Y.\*\*\*

\* Centre d'Ecologie Végétale et d'Hydrologie (ULP-ENGEES)  
1 quai Koch BP 61039 67070 Strasbourg  
[anna.otfinowska@engees.u-strasbg.fr](mailto:anna.otfinowska@engees.u-strasbg.fr)

\*\* Centre d'Ecologie Végétale et d'Hydrologie (ULP-ENGEES)  
1 quai Koch BP 61039 67070 Strasbourg  
[thierry.leviandier@engees.u-strasbg.fr](mailto:thierry.leviandier@engees.u-strasbg.fr)

\*\*\* Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection (UMR CNRS-ULP 7005), BP 10413 F- 67412 Illkirch Cedex  
[yt@mephot.u-strasbg.fr](mailto:yt@mephot.u-strasbg.fr)

### **RESUME**

Les matières en suspension (MES) peuvent être considérées comme les principaux vecteurs et *traceurs* de la pollution des rejets urbains par temps de pluie (RUTP) car de nombreux polluants, notamment les métaux lourds, sont absorbés par les particules organiques ou minérales entraînées par les eaux pluviales.

Nous proposons une modélisation de la concentration et des flux des MES à l'exutoire d'un bassin versant urbain ou d'un réseau d'assainissement, en choisissant le calage des états initiaux dans la simulation événementielle. Les modèles utilisés pour la modélisation hydraulique et qualitative sont des modèles conceptuels globaux qui nécessitent pour leur calage un nombre limité de données et sont économes en paramètres. La base de données comprenant plusieurs bassins urbains, nous a permis des estimations de paramètres robustes et la validation du modèle des MES.

### **ABSTRACT**

Suspended solids (SS) can be considered as principal vectors and tracing elements of urban wet weather effluent (UWWE) because numerous polluting agents such as heavy metals are absorbed by organic or mineral particles dragged along by rain waters.

We propose a modelization of the SS concentration and flow at the outlet of a urban watershed or a sewerage system where the initial states are fitted with an event based simulation. The qualitative hydrological models are conceptual and lumped. They only need a small set of data for adjustment and validation and are low-cost in terms of parameters.

### **MOTS CLES**

Model conceptual ; model calibration ; validation ; sewage systems suspended sediments.

## 1 INTRODUCTION

### 1.1 Contexte de l'étude

Actuellement, dans le cadre des préoccupations environnementales, on prend de plus en plus conscience de l'importance de la pollution véhiculée par le ruissellement pluvial et rejetée directement dans le milieu naturel. Cette pollution apparaît lors d'événements pluvieux courants et son impact est d'autant plus important que la pluie est intense. L'arrêté du 22 décembre 1994 relatif à la surveillance des ouvrages de collecte et de traitement des eaux usées, impose une estimation des volumes et masses déversées et recommande l'utilisation de matériels de mesure pour estimer les charges volumiques et les charges massiques des matières en suspension (MES) rejetées par temps de pluie dans le milieu récepteur. Cependant, le système de surveillance et la maintenance des capteurs représentent un coût financier élevé. Dans ce contexte, vu que dans la réglementation il n'y a pas d'obligation sur les moyens à mettre en œuvre pour estimer la charge polluante, certains auteurs (Musso, 1997; Cabane, 2001; Rossi et al., 2005) proposent d'effectuer l'estimation des rejets urbains par temps de pluie (RUTP) avec des outils combinant la métrologie et la modélisation. Toutefois, les études (Kanson, 2004) portant sur les incertitudes dans les paramètres et dans les réponses des modèles de calcul des flux polluants (MCFP) couramment utilisés dans les logiciels actuels comme CANOE, Hydroworks, SWMM, MouseTrap, FLUPOL, HORUS révèlent un pouvoir prédictif et une efficacité de ces modèles à reproduire des pollutogrammes encore limités. De plus, une enquête (Cabane et al., 2002) portant sur l'utilisation des MCFP réalisée en France montre que ces modèles ne sont pas encore fréquemment utilisés par les bureaux d'études. Ainsi, l'insuffisance de données expérimentales nécessaire pour le calage d'un modèle complexe et une connaissance limitée des processus en jeu, semblent actuellement la principale cause de difficulté d'utilisation des MCFP pour l'estimation des RUTP.

### 1.2 Objectifs de l'étude

L'objectif de ce travail est d'élaborer à l'aide de la modélisation et de données limitées un outil permettant une évaluation satisfaisante des RUTP, peu onéreux, facile à appréhender et à appliquer, donnant des résultats au moins comparables à ceux obtenus par des modèles plus complexes dans certains domaines d'application.

Nous proposons une modélisation de la concentration et des flux des MES à l'exutoire d'un bassin versant urbain ou d'un réseau d'assainissement, en choisissant le calage des états initiaux dans la simulation événementielle. Les modèles utilisés pour la modélisation hydraulique et qualitative sont des modèles conceptuels globaux se caractérisant par une parcimonie des paramètres qui nécessitent pour leur calage un nombre limité de données. L'utilisation de l'approche globale est justifiée par le fait que certains phénomènes impliqués dans les RUTP ne sont pas encore complètement compris et que d'autres ne sont pas mesurables directement, ce qui est le cas en particulier des stocks de matière déjà présents au début d'un événement pluvieux et des MES remises en circulation lors de l'événement pluvieux dans le réseau.

## 2 METHODOLOGIE

### 2.1 Choix des modèles et leur adaptation aux bassins urbains

Nous avons choisi pour la modélisation hydraulique et qualitative des modèles qui ont été validés préalablement sur les bassins naturels. Nous les avons adaptés pour leur utilisation en bassins urbains, présentant un caractère intermittent.

Pour la transformation de pluie en débit, nous proposons le modèle GR4 (Edijatno et al., 1999 ; Perrin, 2000) qui a été largement utilisé en France et qui est adapté à la prévision opérationnelle. Ce modèle modifié, que nous avons appelé GR(3)mn, reste un modèle simple, qui nécessite le calage d'un seul paramètre (état initial du réservoir-sol) et qui permet de répondre aux contraintes d'une modélisation événementielle. Il fonctionne à pas de temps fin (5min), ce qui est d'autant plus important dans le contexte de la modélisation de processus hydrologiques dans le réseau d'assainissement, notamment de la modélisation de pollutogrammes de MES.

Pour la modélisation qualitative, nous avons choisi un modèle conceptuel global à quatre paramètres. L'analyse des différentes configurations des paramètres du modèle et l'analyse de la sensibilité des paramètres ont permis de modifier ce modèle initial, en rendant la structure du modèle plus simple et en réduisant à trois le nombre de paramètres.

$$\frac{dS}{dt} = AeQ^{1.8} - CQ^{1.8}S^2$$

*Q (l/s) - débit ; dt (h) - pas de temps de calcul ; S (kg) - stock de MES ;  
paramètres : Ae ((kg/h)\*(s/l)<sup>1.8</sup>), C ((kg<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>)\*(s/l)<sup>1.8</sup>)*

Ce modèle des MES peut fonctionner à pas de temps variable aussi bien qu'à pas de temps fixe et permet une description des pollutogrammes à l'échelle d'un événement.

## 2.2 Base de données utilisée

Les données utilisées proviennent de la base QASTOR (Saget, 1994) qui est une première base de données relative à la qualité des rejets urbains, caractérisant la qualité des rejets d'un réseau par temps de pluie à l'exutoire d'un bassin urbain. Elle rassemble des mesures issues de campagnes de longue durée sur des bassins versants différents et contient des données qui ont été vérifiées, critiquées et validées. Dans cette étude, le modèle GR(3)mn a été appliqué sur 6 bassins urbains de taille de 26 ha jusqu'à environ 100 ha, et le modèle des MES sur 11 bassins de taille de 26 ha à 1114 ha. Il s'agit de 7 sites séparatifs, 3 sites séparatifs dans lesquels une présence des eaux usées par temps sec a été observée, et 1 site mixte (séparatif et unitaire).

## 2.3 Définition des conditions initiales

Pour le fonctionnement des modèles en événementiel, les conditions initiales du système doivent être déterminées. Chacun de deux modèles retenus comprend deux paramètres des états initiaux qui dans un premier temps ont été optimisés pour chaque événement en utilisant une optimisation hiérarchisée ; pour chaque jeu unique de paramètres fixes du modèle pour un bassin versant, les paramètres des états initiaux ont été optimisés pour chaque épisode. Ensuite, dans chaque modèle un des deux paramètres des états initiaux a été défini par une valeur constante, étant une médiane des valeurs de ce paramètre préalablement optimisées pour chaque événement. Les valeurs de ces paramètres fixes sont identiques sur tous les bassins. Ainsi, chaque modèle comprend un seul paramètre à optimiser par épisode et nécessite peu de données pour son calage.

## 2.4 Calage des modèles étudiés

Pour le calage des paramètres, trois méthodes d'optimisation ont été utilisées: la méthode de Rosenbrock, la méthode du Simplex (Nelder et Mead, 1965) et une méthode consistant à explorer la forme de l'hypersurface de la fonction objectif calculée pour différents vecteurs des paramètres.

Cette dernière méthode a été établie à partir de la méthode Uniform Random Sampling (Duan et al., 1992 ; Nascimento, 1995) (globale, semi-automatique) et comporte la visualisation de la forme de l'hypersurface de la fonction objectif. Cette méthode en donnant des indications sur la localisation de la surface de l'optimum de la fonction objectif (sans préciser exactement l'optimum), permet de bien déterminer le point de départ des méthodes locales appliquées par la suite et permet également d'étudier la sensibilité des paramètres.

Afin de choisir un critère pour le calage des paramètres des modèles et pour l'évaluation de la performance de la modélisation en calage et en validation, la performance du modèle des MES a été étudiée en fonction des six critères différents appliqués pour l'optimisation : critère de Nash calculé sur le logarithme des MES ; critère de Nash calculé sur les racines carrées des MES ; critère basé sur le coefficient de concordance (index of agreement) ; critère relatif d'erreur absolue ; critère relatif d'erreur absolue, transformation avec une puissance 1/5. Le critère retenu comme fonction objectif pour le calage des paramètres et pour l'appréciation de la performance des modèles est le critère de Nash, à l'exception de l'estimation de la masse totale par événement qui a été évaluée par le critère d'erreur absolue.

### 2.5 Validation partielle des modèles

La validation porte sur l'application des modèles sur les données qui n'ont pas été utilisées lors de calage des modèles. Toutefois, comme nous nous plaçons dans la modélisation événementielle, mais destinée à entrer dans une modélisation stochastique (voir paragraphe 5), nous nous autorisons pour la méthode de validation à réaliser un calage partiel portant sur un seul paramètre.

## 3 RESULTATS ET DISCUSSION

Dans un premier temps, les paramètres du modèle GR(3)mn ont été optimisés sur au moins 40 épisodes pluvieux par bassin. Toutefois, nous avons vérifié si un nombre très limité d'épisodes (une dizaine) peut être suffisant pour déterminer les valeurs des paramètres du modèle GR(3)mn tout en préservant une bonne performance du modèle. On peut observer que malgré le fait que la qualité de simulation a légèrement diminué, celle-ci reste suffisamment bonne pour permettre une estimation satisfaisante de la concentration et du flux des MES pour la majorité des événements des différents bassins versants. Dans l'application du modèle GR(3)mn en calage et en validation, nous avons obtenu des résultats satisfaisants avec le critère de Nash calculé sur tous les épisodes d'un bassin versant donné, d'environ 90 %.

Les paramètres du modèle des MES ont été optimisés sur la concentration ainsi que sur le flux de MES et cela en fonction du débit observé et du débit modélisé par le modèle GR(3)mn. L'analyse de la sensibilité des paramètres a montré que le paramètre C du modèle est peu sensible, que l'un des paramètres des états initiaux « Sini » est relativement sensible, mais qu'il peut être constant pour un bassin donné, car il n'influence que le début de l'événement. Ainsi, même s'il est mal estimé, la masse totale par événement reste bien évaluée dans la majorité des épisodes, ce qui entraîne l'optimisation d'un seul paramètre par chaque événement. Le modèle des MES se montre cohérent, car les paramètres du modèle obtenus lors du calage sur la concentration des MES permettent une bonne reconstitution des flux de MES. Enfin, il apparaît robuste, car les résultats obtenus lors de sa validation (avec l'optimisation nécessaire d'un des trois paramètres pour chaque événement) sur 9 bassins versants sont tout à fait satisfaisants (voir tableaux 1).

Site	Description	Surface (ha)	Nash calculé sur la concentration	Nash calculé sur le flux	Critère d'erreur absolue calculé sur la masse totale par événement
Maurepas	séparatif	26,7	97 %	90 %	96 %
Ulis Nord	séparatif avec eaux usées	43,1	98 %	98 %	78 %
Aix Zup	séparatif	25,6	96 %		81 %
Aix Nord	séparatif	92	94 %	93 %	93 %
Marne Sainte Boudile	mixte (séparatif et unitaire)	1145	70 %	89 %	89 %
Marne Chesnay	séparatif avec eaux usées	560	89 %	91 %	90 %
Marne Grammont	séparatif avec eaux usées	144	94 %	89 %	92 %
Marne Malnoue	séparatif	185	89 %	96 %	72 %
Marne Centre Urbain	séparatif	226	82 %	80 %	92 %
Vélizy Ouest	séparatif	53,2	90 %	99 %	87 %
Ulis Sud	séparatif	69,1	88 %	83 %	74 %

Tableau 1. Valeurs du critère de Nash calculé sur la concentration et le flux, valeurs du critère d'erreur absolue calculé sur la masse totale, pour les 9 bassins étudiés en validation avec recalage d'un seul paramètre.

BV n° 1 Episode 108  
Validation du modèle de concentration des MES. Concentration calculée en fonction du :  
A - débit observé (Mes(Qobs)), B - débit calculé (MES(Qcal)) par le modèle GR(3)mn

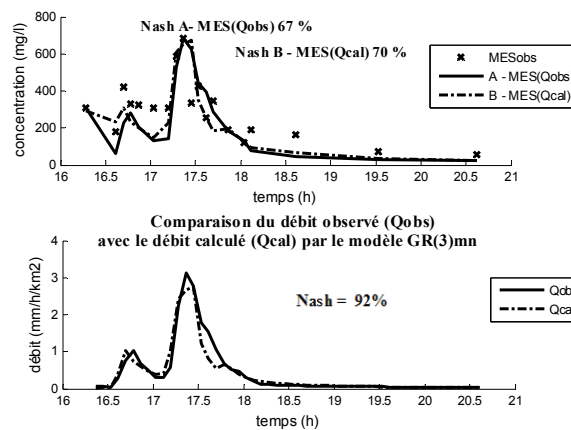


Figure 1. Ajustement de la concentration des MES (en haut) et du débit (en bas) en validation partielle. Concentration calculée en fonction du débit observé et calculé par GR(3)mn.

Dans l'application du modèle des MES uniquement en fonction du débit observé nous avons obtenu des résultats au-dessus de la valeur de 80 % du critère de Nash calculé sur tous les épisodes d'un bassin versant, pour la concentration et au-dessus

de 90 % pour le flux de MES, cela pour tous les bassins étudiés. L'estimation de la masse totale par événement à partir de la concentration ponctuelle ainsi modélisée a donné des résultats également satisfaisants au-dessus de 80 % pour la majorité de bassins étudiés.

Les figures 1 et 2 présentent, sur l'exemple d'un épisode modélisé, des résultats en validation obtenus pour la concentration (figure 1) et pour le flux des MES (figure 2). Sur chaque figure, la figure en bas illustre le débit calculé par le modèle GR(3)mn.

Toutefois, cette qualité se dégrade, tout en restant convenable, si on remplace le débit observé constituant l'entrée du modèle des MES par le débit modélisé par le modèle GR(3)mn. En fait, la qualité de simulation des concentrations ponctuelles effectuée sur le débit modélisé dépend de façon importante de la fiabilité du modèle à l'aide duquel le débit a été calculé. En ce qui concerne l'estimation de la masse totale par événement, elle est également (d'après les valeurs obtenues par le critère d'erreur absolue) sensible à la qualité de l'estimation de débit, mais dans un moindre degré que la concentration des MES, cela malgré le fait que le débit intervient aux deux niveaux de l'estimation de la masse totale : au niveau du calcul de la concentration et de celui du volume.

Grâce à la base de données provenant de plusieurs bassins versants (11), nous avons pu établir des estimations de paramètres robustes et obtenir des distributions de paramètres communs à tous les bassins et par bassin. Cependant, le fait qu'un des trois paramètres du modèle des MES, doive être optimisé pour chaque épisode, exclut une application du modèle en prévision.

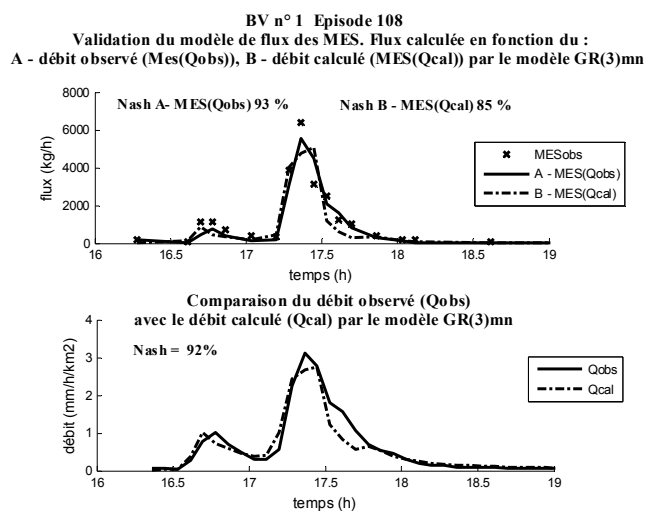


Figure 2. Ajustement du flux des MES (en haut) et du débit (en bas) en validation partielle. Concentration calculée en fonction du débit observé et calculé par GR(3)mn.

Toutefois, le modèle permet de reconstituer le pollutogramme de l'événement entier à partir de quelques mesures ponctuelles de la concentration ou du flux. Il semble intéressant de rechercher combien de mesures seraient suffisantes pour déterminer la valeur de ce paramètre, afin de bien reconstituer la concentration ponctuelle durant l'événement pris dans sa totalité, ce qui permettra de bien évaluer la charge totale par événement.

Par ailleurs, pour des applications ne s'intéressant pas aux événements individuels, mais à la population d'événements, on peut considérer que le problème est résolu, ou du moins simplifié en résumant toute la variabilité, autre que celle de la pluie, dans la distribution des états initiaux du modèle pluie-débit et du modèle des MES qui suivent respectivement une loi uniforme et une loi de Weibull.

#### 4 CONCLUSION

Le recalage du modèle à chaque événement, s'il est acceptable dans l'optique d'une modélisation stochastique, révèle tout de même une lacune dans la compréhension des phénomènes mise en jeu. L'application du modèle de MES révèle que ce n'est pas le stock initial inconnu qui est principalement en cause, mais l'influence du débit qui semble varier d'un événement à l'autre. Ceci conduit à préconiser des recherches sur le comportement interne des solides dans le réseau, avant de s'intéresser aux phénomènes de temps sec.

L'orientation vers une modélisation en continu des événements permettrait de mieux percevoir pas seulement la question des états initiaux, mais surtout la question de l'apport des MES durant l'événement lié au concept d'accumulation et de remise en circulation des polluants dans le réseau par temps de pluie. Les études en continu et sur une période d'au moins une année permettraient aussi de vérifier s'il est possible d'expliquer la variation du paramètre  $A_e$  en fonction des changements saisonniers.

On peut conclure qu'il est nécessaire de poursuivre nos efforts au niveau de la fiabilité et de la disponibilité des données (notamment celles concernant le comportement des polluants dans le réseau) ainsi qu'au niveau de la compréhension des processus mis en jeu dans le réseau d'assainissement. De plus, le couplage de la modélisation avec la mesure semble une des solutions les moins coûteuses d'autosurveillance de réseaux, car il apparaît qu'à l'aide d'un modèle simple, il est possible d'évaluer la charge en MES par événement avec l'incertitude comparable à celle des modèles complexes.

#### 5 PERSPECTIVES

Les deux modèles présentés dans cette communication ont été choisis et élaborés dans la perspective d'élaboration d'un modèle probabiliste de flux de MES dont la mise en œuvre consiste simplement en une combinaison des modèles GR(3)mn et de MES avec un modèle stochastique de pluie.

En effet, parmi les données hydrologiques les chroniques de pluie permettent, en apportant une information intéressante, une analyse statistique plus fiable que celle effectuée directement sur le débit, car elles sont généralement plus longues, plus indépendantes dans leurs réalisations successives, et moins influencées par l'aménagement urbain que les variables qui intéressent directement les gestionnaires comme le flux de MES et de polluants.

Notre idée consiste à utiliser cette information pluviométrique dans le modèle pluie-débit et le modèle de flux des MES, afin d'obtenir, dans un premier temps, la fonction de densité de probabilité des débits à partir de celle des pluies et, dans un deuxième temps, une fonction de densité de probabilité de flux des MES. La pluie peut être décrite par le modèle stochastique CECP (Leviandier, 2000), qui permet d'effectuer un découpage de l'épisode pluvieux en sous-épisodes d'intensité constante, en prenant en compte simultanément l'intensité et son déroulement dans le temps, afin d'obtenir une pluie que nous appelons « simplifiée » car elle est composée de quatre ou cinq sous-épisodes d'intervalles différents.



Cette pluie va constituer l'entrée du modèle pluie-débit couplé avec le modèle des MES. Le débit et le flux de MES calculé en fonction de la pluie décrite de cette manière, ne dépend que de la pluie totale, des temps de partage (une forme donnée de la pluie) et des conditions initiales. La forme de la pluie (hyétogramme), et en conséquence celle du débit (hydrogramme) sont caractérisées par l'intermédiaire du modèle CECP. Ainsi, la probabilité de dépasser un certain débit est égale à la probabilité de dépasser la pluie totale à une forme donnée, caractérisée par les temps de partage, générant ce débit.

De même façon, la probabilité de dépasser un certain seuil de pollution (exprimé par le flux ou la concentration des MES ou encore par la masse totale des MES par événement) est égale à la probabilité conditionnelle de dépasser la pluie totale générant cet événement, dans des conditions données, caractérisées par les états initiaux (décrits par les lois de probabilité).

Les recherches en cours visent la comparaison avec les estimations de distributions ajustées sur des flux observés, et le comportement du modèle aux fréquences non observées.

## BIBLIOGRAPHIE

- Cabane, P. (2001). Incertitudes associées à l'estimation des rejets de temps de pluie des réseaux d'assainissement unitaires. Thèse, Institut National des Sciences appliquées de Lyon. 445 p.
- Cabane, P. Gromaire M.C., Chebbo G. (2002). Enquête sur l'utilisation des modèles de calcul de flux polluants en assainissement. Rapport interne. CERREVE, URGC Hydrologie Urbaine, UMR 5569 Hydrosiences Montpellier. 106 p.
- Duan, Q., Sorooshian, S. et al. (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models." *Water Resources Research* 28(4), p 1015 - 1031.
- Edijatno, Nascimento N.O., et al. (1999). "GR3J : a daily watershed model with three free parameters." *Hydrological Sciences Journal*, 44(2), 263-278.
- Duan, Q., Sorooshian, S. et al. (1992). "Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models." *Water Resources Research* 28(4), p 1015 - 1031.
- Kanso A., Chebbo G., Tassin B., (2004). Application of MCMC – GSA model calibration method to urban runoff quality modelling. 4th Int. Conf. on Sensitivity Analysis of Model Output, SAMO 2004. Santa Fe – USA. Submitted for J. of Reliability Engineering & System Safety.
- Leviandier, T., Lavabre, J. et al. (2000). "Rainfall contrast enhancing clustering process and flood analysis." *Journal of Hydrology* (240), p 62-79.
- Nascimento, N. O. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropiques sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. Thèse, CERGRENE/ENPC, Paris. 550 p.
- Nelder, J. A., Mead, R. (1965). "A Simplex method for function minimisation." *The Computer Journal* 7(4), p 308 - 313.
- MUSSO E., (1997). Evaluation des rejets de temps de pluie de grands bassins versants urbains. Thèse de doctorat. INSA Lyon. 338 p.
- Perrin, C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse, CEMAGREF d'Antony. Grenoble, INPG. 530 p.
- Rossi L., Krejci V., et al. (2005). Stochastic modeling of total suspended solids (TSS) in urban areas during rain events. *Water Research* 39, no. 17, p 4188-4196.
- Saget, A., (1994). Base de donnée sur la qualité des rejets urbains de temps de pluie: distribution de la pollution rejetée, dimension des ouvrages d'interception. Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 227 p.

## Remerciements

Les autres remercient Ghassan Chebbo du CERREVE qui a bien voulu mettre à leur disposition la base QASTOR et le GEMCEA pour son soutien financier.