

# Modélisation d'un bassin versant urbain avec sa rivière en vue de la Directive Cadre Eau

A.-M. Solvi<sup>\*,\*\*</sup>, L. Benedetti<sup>\*</sup>, S. Gillé<sup>\*\*\*</sup>, P. Schosseler<sup>\*\*</sup>, A. Weidenhaupt<sup>\*\*</sup> et P.A. Vanrolleghem<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> BIOMATH, Université de Gand, Coupure Links 653, B-9000 Gand, Belgique  
(E-mail: anne-marie.solvi@tudor.lu)

<sup>\*\*</sup> Centre de Ressources pour les Technologies Environnementales, CRP Henri Tudor, 66 rue de Luxembourg, L-4002 Esch/Alzette, Luxembourg

<sup>\*\*\*</sup> Laboratoire des Technologies Industrielles, CRP Henri Tudor, 70 rue de Luxembourg, L-4002 Esch/Alzette, Luxembourg

## Résumé

Le but principal de la Directive Cadre Eau est d'atteindre une 'bonne' qualité chimique et écologique des nappes d'eau souterraines et superficielles pour 2015. Ceci requiert entre autres une optimisation de la gestion intégrée du transport et du traitement des eaux résiduaires urbaines en fonction des concentrations dans la rivière. Un modèle mathématique intégré comprenant à la fois le réseau d'assainissement, la station d'épuration et le cours d'eau récepteur permet d'analyser un tel système et de tester des stratégies de gestion. Pour détourner les problèmes reliés aux transferts de données entre différents logiciels des sous-systèmes, un modèle hydrologique pour ruissellement de la surface par temps de pluie avec transport dans le réseau sur base du logiciel KOSIM a été implémenté dans WEST® qui contient déjà les sous-modèles pour la station et la rivière. L'application des modèles dans WEST® se fera à une station d'épuration située au Nord de Luxembourg.

## Mots-clés

KOSIM ; Modélisation intégrée ; WEST®

## Introduction

La Directive Européenne établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau (CEE, 2000) exige des états membres de prendre des mesures pour atteindre une « bonne » qualité chimique et écologique des eaux superficielles et souterraines d'ici à 2015. Sa mise en oeuvre exige entre autres une meilleure gestion du cycle urbain des eaux usées, qui dès à présent ne doit plus seulement dépendre des critères d'émissions du réseau d'assainissement et de la station d'épuration (STEP), mais c'est la qualité de l'eau réceptrice qui en jugera la performance. Les exigences basées sur des critères d'immission sont, depuis une bonne dizaine d'années, bien reconnues (Lijklema *et al.*, 1993). Cependant leur accomplissement demande une considération intégrée du système urbain des eaux usées, comprenant le ruissellement d'eaux de pluie en surface, le transport des eaux mixtes en canalisation, les déversements directs, les rejets à la station et le devenir de ces eaux en rivière. Il s'agit donc d'un système fort complexe en soi et son étude exige de nombreuses données associées de préférence à un modèle sur ordinateur.

## Etat de l'art et difficultés

Dans son travail de thèse, qui sert de base pour le travail décrit ici, Meirlaen (2002a) suggère la méthode de simplification d'un modèle. Ici, le détour par un modèle complexe du système en question permet le calibrage d'un modèle simplifié, qui sera beaucoup plus efficace en ce qui concerne les temps de calculs. En outre, il propose la réduction du modèle intégré pour ne garder que les éléments et processus les plus importants pour l'atteinte des objectifs de l'étude (Meirlaen *et al.*, 2001). Une des stratégies étudiées permet les déversements des eaux unitaires dans la rivière jusqu'à ce que les concentrations de NH<sub>4</sub> dans l'eau réceptrice dépassent une valeur seuil (Meirlaen *et al.*, 2002b). Ce n'est qu'à ce moment-là que la STEP est surchargée, et les simulations montrent une réduction des

concentrations d'ammonium par rapport au cas de base dont l'opération ne dépend pas de la qualité de la rivière. Ceci montre que le contrôle en temps réel du système intégré sur des critères d'immission est une option prometteuse (Vanrolleghem *et al.*, 2004).

### **Etudes menées et problèmes à résoudre**

Au cours des dernières années, un certain nombre d'études ont été menées à ce sujet. Généralement, l'identification des problèmes particuliers et la définition des objectifs à atteindre sont suivies de la construction d'un modèle du système. Celui-ci permet de mener des expériences virtuelles pour en premier lieu mieux comprendre sa dynamique et ensuite l'utiliser pour tester des stratégies de gestion dans le but d'en extraire la ou les meilleure(s) satisfaisants les objectifs.

A travers des modélisations et une interprétation statistique des effets néfastes dans la rivière, suite aux déversements à partir du réseau d'assainissement, Rauch et Harremoës (1998) ont pu constater que, pour leur cas d'étude, une surcharge hydraulique de la STEP, permettant d'éviter des rejets unitaires par temps de pluie, ne mène pas nécessairement à une meilleure qualité de l'eau réceptrice, comme une telle stratégie réduit le rendement de la STEP. Ils montrent ainsi que les événements de déversements sont couplés au fonctionnement et aux émissions de la station. En effet, souvent ne sont utilisés que le volume et la fréquence en rejets unitaires en tant qu'indicateur pour l'impact de pollution sur une eau réceptrice. Dans ce contexte, des mesures en ligne sur l'état et les émissions de la STEP ainsi que des mesures d'ammonium dans la rivière permettent à Seggelke (2002) de dégager le débit d'entrée à la station le plus favorable à la qualité de l'eau de rivière. Ainsi, le débit d'entrée à la STEP est basé sur les critères de qualité de la rivière et non sur des critères prescrits de dimensionnement de la STEP. Des études similaires (Erbe *et al.*, 2002), (Frehmann *et al.*, 2002) incluent la gestion de bassins de rétention dans leurs stratégies de contrôle. Néanmoins, Lau *et al.* (2002) notent que lors d'une augmentation du volume de rétention, malgré la réduction en volume et fréquence de déversements directs, même en maintenant les émissions de la STEP, une plus grande quantité de pollution est déversée sur une plus grande période de temps. Ce travail fut réalisé dans le logiciel SYNOPSIS (Schütze *et al.*, 2002), qui contient une routine permettant l'optimisation automatique de stratégies de contrôle.

Malgré l'existence d'une multitude de modèles mathématiques pour décrire les sous-systèmes bassin versant, canalisation, STEP et rivière, le choix du 'bon' modèle n'est pas évident. En effet, il en existe pour tous les niveaux de complexité, les plus complexes essayent de décrire les processus jusqu'au plus fin des détails alors que les modèles simplifiés, souvent conceptuels, se limitent au comportement général des variables principales.

Dempsey *et al.* (1997) ont créé l'instrument de simulation SIMPOL, contenant seulement les processus urbains les plus importants pour une évaluation rapide du système. Ils supposent que l'exactitude perdue pour un événement singulier est compensée par le grand nombre de simulations. Il faudra noter que les paramètres de qualité ont été calibrés avec des informations extraites d'un modèle de qualité. De même, Willems et Berlamont (2002) aboutissent via un modèle déterministe à un modèle simplifié à temps de calcul réduit, et essayent par la suite d'identifier les sources d'incertitudes. Ils trouvent que surtout les modèles de qualité génèrent de nombreuses incertitudes dans les résultats, alors que pour les modèles hydrauliques cette contribution est beaucoup plus réduite. Ceci est expliqué par l'existence de données de débits fiables et par une bonne connaissance de la géométrie du réseau d'assainissement. Ceci n'est généralement pas le cas pour des données de concentrations de composants. REBEKA est un autre exemple de logiciel récent ayant cette approche probabilistique (Rauch *et al.*, 2002b), évaluant plus spécialement les impacts toxiques ou d'érosion dans les petites rivières alpines.

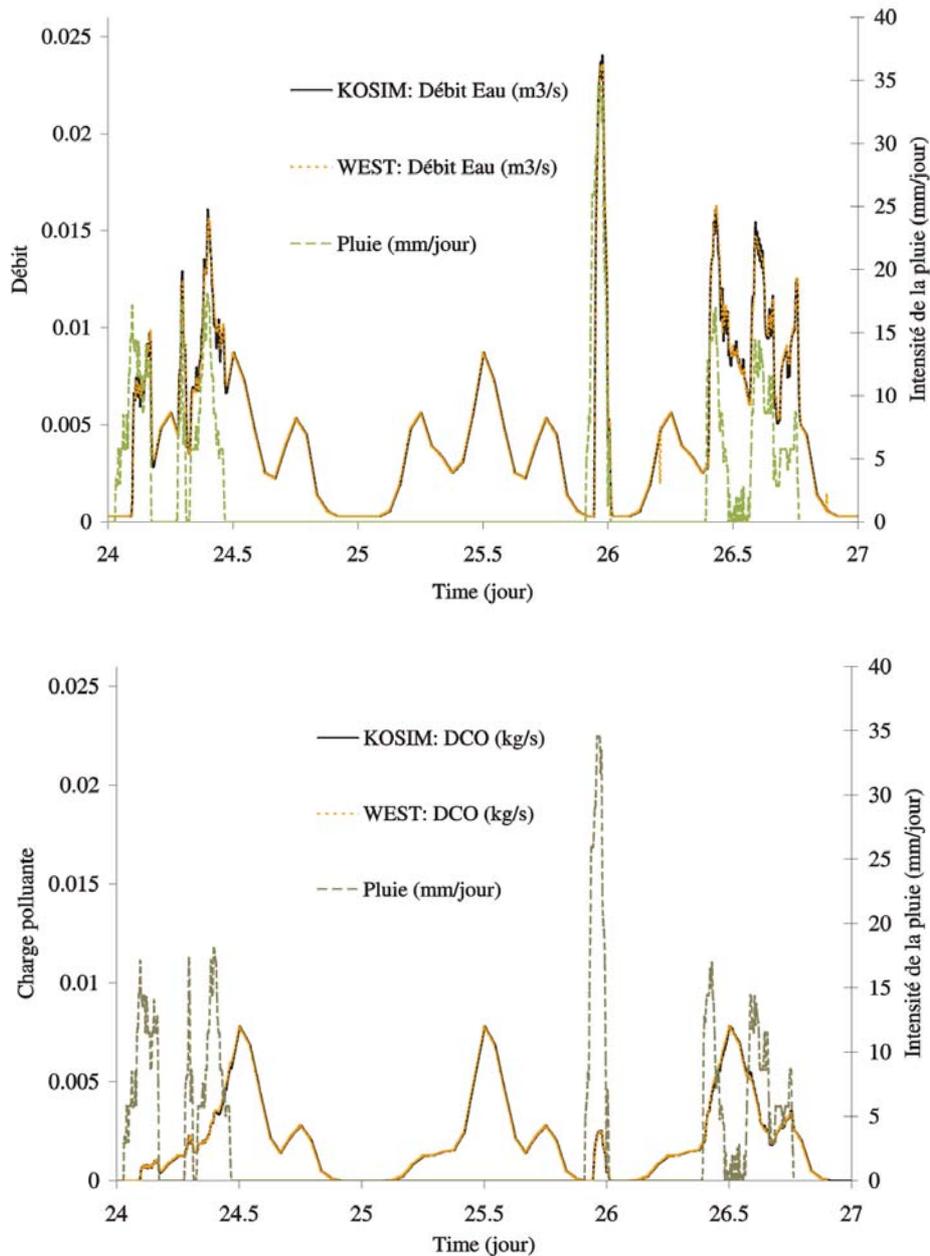
Une modélisation comprend généralement une description hydrodynamique des débits dans le réseau et dans la rivière, ainsi que des processus de qualité, même dans le réseau. En effet, l'hydraulique peut jouer un rôle important pour simuler les conséquences d'un déversement dans la rivière (Rauch *et al.*, 2002a). La simulation de processus de transformation dans le réseau permet une meilleure connaissance des concentrations à l'entrée de la STEP, étant donné que les processus importants ne sont pas les mêmes par temps sec qu'en temps de pluie et que les transformations qui s'y produisent dépendent des concentrations d'entrées et de la géométrie du réseau (Vollertsen *et al.*, 2002). D'un autre côté, ces modèles déterministes ne peuvent pas tenir compte des processus stochastiques comme la variabilité spatiale de la pluie (Rauch *et al.*, 1998). En effet Fuchs et Beeneken (2004) constatent que le volume de rejets simulés en milieux unitaires est considérablement réduit en utilisant des données de pluie radar comme données d'entrée au modèle hydraulique par rapport à une pluie homogène. D'autant plus, le nombre de paramètres augmente avec la complexité du modèle et à chaque paramètre est lié un domaine d'incertitude ce qui rend le calibrage de ces modèles fastidieux.

Une étude intégrée du système des eaux urbaines basée sur les critères d'immission de sa rivière est encore liée à d'autres difficultés. Etant donné l'hétérogénéité des processus engendrant dans chaque sous-système des variables et des paramètres distincts dans les sous-modèles, Benedetti *et al.* (2003) proposent des modèles de connexion conservateurs de masse. Autre contrainte aux études intégrées sont les campagnes de mesures qui sont longues et requièrent en même temps des intervalles de mesure courts, puisque les processus des sous-systèmes varient à des échelles de temps très écartées (Vanrolleghem *et al.*, 1999).

## **KOSIM-WEST**

Pour avoir un transfert de données facile lors des simulations, tous les modèles sont intégrés dans un seul logiciel, WEST® (Hemmis, N.V., Kortrijk, Belgique ; Université de Gand, Belgique). Alors qu'y figurent déjà entre autres les modèles standards de boues activées (ASM1, ASM2, ASM3) pour la modélisation de la STEP et le modèle de qualité pour la rivière (RWQM1), des modèles pour le ruissellement de surfaces et le transport des eaux de pluie et des eaux usées dans le réseau restaient à intégrer dans WEST®. Grâce à une interface ouverte à l'utilisateur et à la structure hiérarchique du langage de programmation, cette intégration fut possible et a été réalisée sur base du modèle conceptuel KOSIM (ITWH, 2000). Puisque les algorithmes de calcul à l'intérieur de WEST® sont conçus pour traiter des équations différentielles ordinaires continues, il a fallu transformer les équations en pas de temps discrets sous KOSIM en des équations différentielles.

Les éléments qui constituent KOSIM-WEST sont le bassin versant, les collecteurs et les structures de rétention. Le modèle du bassin versant contient le ruissellement en surface perméable ou imperméable et la génération des eaux usées par temps sec, qui est fonction de l'heure de la journée, des moyennes de consommation d'eau journalières ainsi que de la concentration des composants. Pour calculer le ruissellement, les processus de mouillement de surface, remplissage de dépressions ainsi que l'infiltration dans le sol pour les surfaces perméables sont pris en compte avec évaporation en temps sec. La figure 1 montre un bon résultat d'une comparaison de simulation des deux logiciels pour un bassin hypothétique. Les collecteurs sont modélisés comme étant une série de bassins en cascade.



**Figure 1** : Comparaison de KOSIM-WEST avec KOSIM pour les valeurs de débit et de charge polluante (demande chimique en oxygène) dans un bassin versant hypothétique.

Bien que les concepts derrière l'original KOSIM et le nouveau KOSIM-WEST soient identiques, leurs spécificités et leurs domaines d'application divergent. De son côté WEST® permet l'interception d'informations telles que les variations des pertes d'infiltration dans le sol, alors qu'avec KOSIM, l'utilisateur ne peut voir que les débits d'eau et la charge de polluants. En outre, WEST® donne la possibilité d'ajouter ou de modifier des modèles en cas de besoin. Mais, KOSIM a une rapidité de calcul supérieure d'ordre  $10^2$  et devient par cela un instrument d'analyse beaucoup plus efficace pour des études de réseaux d'assainissement d'autant plus qu'il permet facilement de générer un rapport sur les paramètres utilisés et les volumes déversés lors de la simulation. Néanmoins, pour les études de systèmes intégrés, l'avantage de KOSIM-WEST réside dans sa compatibilité avec d'autres modèles au niveau de la communication entre modèles lors des simulations.

## Le cas d'étude

### Description

Pour tester l'applicabilité des modèles dans WEST® pour un système intégré, une étude de cas est réalisée sur la rivière Sûre au Nord-Est du Luxembourg. La figure 2 représente une vue schématisée du système intégré et quelques caractéristiques des sous-systèmes sont données dans le tableau 1.

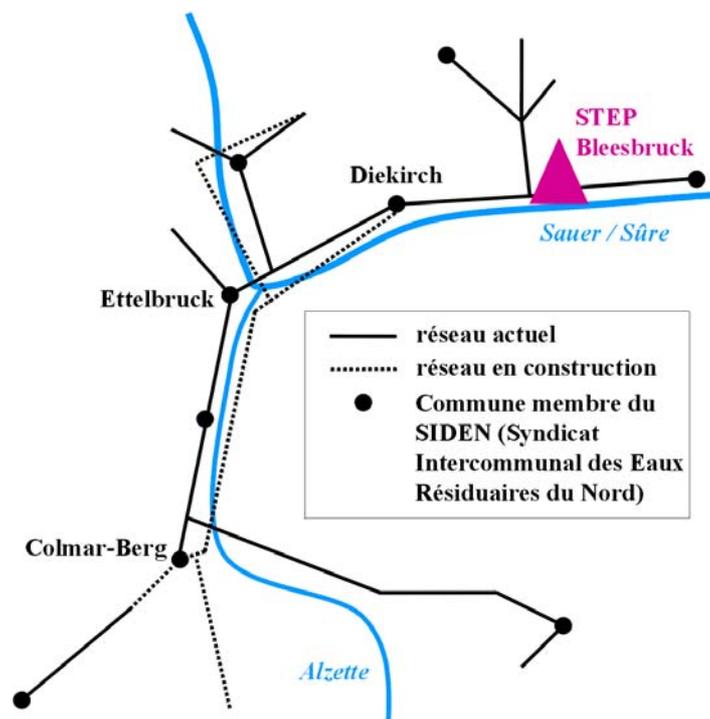


Figure 2 : Schéma du système intégré

<b>Bassin versant</b>	Territoire : ~ 10 km <sup>2</sup> Eaux domestiques, commerciales et industrielles : ~ 52000 EH
<b>Réseau</b>	60 km (+20km de collecteur principal (parallèle) en construction + remplacement de déversoirs par des bassins d'orage)
<b>STEP 'Bleesbruck'</b>	Capacité hydraulique : 100.000 EH dégrillage, dessablage - dégraissage, 2 bassins à boues activées en cascade, co-précipitation des phosphates, capteurs analytiques en ligne
<b>Rivière 'Sûre'</b>	Débit : 10-20 m <sup>3</sup> /s selon la saison Problèmes : Concentrations trop élevées en ammonium et phosphate

Tableau 1: Etude de cas au Luxembourg

La Sûre, qui a sa source à Vauby-les-Rosières (Belgique) et un bassin hydrographique d'environ 4250 km<sup>2</sup>, traverse le Luxembourg de l'ouest vers l'est pour se déverser dans la Moselle à la frontière allemande. Un barrage à quelques 25 kilomètres en amont de la station d'épuration Bleesbruck donne lieu au réservoir d'eau potable qui alimente 2/3 de la population luxembourgeoise. La qualité biochimique et hydrobiologique des cours d'eaux est analysée par le laboratoire du service de la gestion de l'eau au Luxembourg suivant l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN) qui est décrit par la norme française NF T90-350 et divise les eaux en 5 niveaux de qualité. Ainsi, il se trouve que la qualité de la Sûre est 'très bonne' jusqu'à la ville d'Ettelbruck, où, dû à l'embouchure de la rivière Alzette, la qualité est dégradée. En effet l'Alzette traverse une grande partie du pays et collecte de ce

fait une quantité importante d'eaux urbaines et industrielles, et est polluée aussi bien par des métaux lourds que par des nutriments. La présente étude se concentrera sur ces derniers.

Dans la cadre d'un projet européen Life visant à optimiser la STEP de Bleesbruck, celle-ci a été équipée de capteurs en ligne pour DCO,  $\text{NH}_4/\text{NO}_3$  et  $\text{PO}_4$ . Elle reçoit en plus des charges quotidiennes de boues des petites stations situées aux alentours. En ce qui concerne le traitement des eaux, la station est surchargée particulièrement par temps de pluie.

La population du bassin versant est d'environ 25000 habitants. Les sites industrielles rattachés au réseau comprennent une brasserie, un abattoir, une laiterie, la fabrication de pneus, la production de câbles en acier et s'y ajoute une décharge pour ordures ménagères. Le réseau d'assainissement unitaire se constitue de plusieurs sous-bassins se déversant dans un collecteur principal dont les capacités seront augmentées par la construction de bassins de rétention à la place de certains déversoirs et l'ajout d'un collecteur parallèle sous pression. Pour la plupart du réseau, il existe des plans géométriques pouvant servir à la construction d'un modèle hydraulique.

### **Approche pour la modélisation**

Dans un premier temps il faudra distinguer les charges polluantes provenant du réseau de celles en provenance de l'Alzette et de la pollution diffuse à savoir de l'écoulement de surface par temps de pluie des engrais utilisés en agriculture. Cette identification de problèmes à la rivière permettra la définition d'objectifs pour l'étude.

Pour modéliser la STEP, le modèle calibré existant sera transcrit dans le logiciel WEST®.

En raison du manque de données sur les concentrations de composants dans le réseau, le modèle du réseau dans WEST® sera calibré à l'aide d'informations provenant d'un modèle hydraulique dans Infoworks™ CS (Wallingford Software). Lors de l'étude, le modèle sera mis à jour au fur et à mesure les travaux de modernisation du système réel avancent. Ainsi, différentes stratégies de contrôle comme l'activation des collecteurs pressurisés ou le remplissage et le vidange des bassins de rétention en fonction de leur position dans le réseau et l'état de la STEP, pourront être testées.

### **Conclusion**

Dans cette étude, l'objectif étant de modéliser les impacts sur le système aquatique à long terme et non lors d'un événement singulier, il s'agira de choisir le modèle de telle façon à trouver un compromis entre des temps de calculs raisonnables et l'exactitude des résultats. Il s'agit donc de trouver le bon équilibre entre la complexité la plus appropriée au but de l'étude, le temps mis à disposition et les incertitudes dans les résultats.

### **Remerciements**

Les résultats présentés ci-dessus ont été élaborés dans le cadre du projet européen CD4WC, no. de contrat EVK1-CT-2002-00118. Ce projet est organisé parmi le programme Energie, Environnement et Développement Durable au sein du 5e Programme Cadre de la Communauté Européenne de Recherche, de Développement Technologique et de Démonstration.

### **Références**

Benedetti, L., Meirlaen, J. and Vanrolleghem, P.A. (2003). Model connectors for integrated simulations of urban wastewater systems. *18th European Junior Scientist Workshop on Sewer Processes and Networks*, Almogrove, Portugal.

- CEE (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Community*, **L 327**, 1-73.
- Dempsey, P., Eadon, A. and Morris, G. (1997). Simpol: a simplified urban pollution modelling tool. *Wat.Sci.Tech.*, **36**(8-9), 83-88.
- Erbe, V., Risholt, L.P., Schilling, W. and Londong, J. (2002). Integrated modelling for analysis and optimisation of wastewater systems - the Odenthal case. *Urban Water*, **4**, 63-71.
- Frehmann, T., Niemann, A., Ustohal, P. and Geiger, W.F. (2002). Effects of real-time control of sewer systems on treatment plant performance and receiving water quality. *Wat.Sci.Tech.*, **45**(3), 229-237.
- Fuchs, L. and Beeneken, T. (2004). Development and implementation of real-time control strategy for the sewer system of the Vienna city. *Urban Drainage Modelling 2004*, Dresden, Germany.
- ITWH (2000). KOSIM 6.2: Anwenderhandbuch. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie GmbH, Darmstadt, Germany.
- Lau, J., Butler, D. and Schütze, M. (2002). Is combined sewer overflow spill frequency/volume a good indicator of receiving water quality impact? *Urban Water*, **4**, 181-189.
- Lijklema, L., Tyson, J.M. and Lesouef, A. (1993). Interactions between sewers, treatment plants and receiving waters in urban areas: a summary of the Interurba '92 workshop conclusions. *Wat.Sci.Tech.*, **27**(12), 1-29.
- Meirlaen, J. (2002a). Immission based real-time control of the integrated urban wastewater system. BIOMATH, University of Gent.
- Meirlaen, J., Huyghebaert, B., Sforzi, F., Benedetti, L. and Vanrolleghem, P. (2001). Fast, simultaneous simulation of the integrated urban wastewater system using mechanistic surrogate models. *Wat.Sci.Tech.*, **43**(7), 301-310.
- Meirlaen, J., Van Assel, J. and Vanrolleghem, P.A. (2002b). Real Time Control of the integrated urban wastewater system using simultaneously simulating surrogate models. *Wat.Sci.Tech.*, **45**(3), 109-116.
- Rauch, W., Aalderink, H., Krebs, P., Schilling, W. and Vanrolleghem, P. (1998). Requirements for integrated wastewater models - driven by receiving water requirements. *Wat.Sci.Tech.*, **38**(11), 97-104.
- Rauch, W., Bertrand-Krajewski, J.-L., Krebs, P., Mark, O., Schilling, W., Schütze, M. and Vanrolleghem, P.A. (2002a). Deterministic modelling of integrated urban drainage systems. *Wat.Sci.Tech.*, **45**(3), 81-94.
- Rauch, W. and Harremoës, P. (1998). Correlation of combined sewer overflow reduction due to real-time control and resulting effect on the oxygen concentration in the river. *Wat.Sci.Tech.*, **37**(12), 69-76.
- Rauch, W., Krejci, V. and Gujer, W. (2002b). REBEKA - a software tool for planning urban drainage on the basis of predicted impacts on receiving waters. *Urban Water*, **4**, 355-361.
- Schütze, M., Butler, D. and Beck, M.B. (2002). *Modelling, Simulation and Control of Urban Wastewater Systems*. London, Springer.
- Seggelke, K. (2002). Integrierte Bewirtschaftung von Kanalnetz und Kläranlage zur Reduzierung der Gewässerbelastung. *Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen*. Hannover, Universität Hannover.
- Vanrolleghem, P., Benedetti, L. and Meirlaen, J. (2004). Modelling and real-time control of the integrated urban wastewater system. *Environmental Modelling & Software (in press)*.
- Vanrolleghem, P.A., Schilling, W., Rauch, W., Krebs, P. and Aalderink, H. (1999). Setting up measuring campaigns for integrated wastewater modelling. *Wat.Sci.Tech.*, **39**(4), 257-268.
- Vollertsen, J., Hvitved-Jacobsen, T., Ujang, Z. and Talib, S.A. (2002). Integrated design of sewers and wastewater treatment plants. *Wat.Sci.Tech.*, **46**(9), 11-20.

Willems, P. and Berlamont, J. (2002). Probabilistic emission and immission modelling: case-study of the combined sewer - WWTP - receiving water system at Dessel (Belgium). *Wat.Sci.Tech.*, **45**(3), 117-124.