

**Fabrice RODRIGUEZ,**  
**Marie-Laure MOSINI, Hervé ANDRIEU**  
*Laboratoire central des Ponts et Chaussées,*  
*Bouguenais, France*

*IRSTV-FR CNRS 2488, ENSA Nantes,*  
*Nantes, France*

**Floriane MORENA**  
*Conseil général du Gard,*  
*Service de l'Eau et des Rivières,*  
*Nîmes, France*

## Un modèle hydrologique distribué pour les bassins versants urbains

### ■ RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est de présenter un modèle hydrologique distribué destiné aux milieux urbanisés, basé sur les banques de données urbaines, et capable de prendre en compte des processus classiquement négligés en hydrologie urbaine (évapotranspiration, infiltration). Le modèle hydrologique possède une fonction de production détaillée à l'échelle de la parcelle cadastrale, et une fonction de transfert simple, basée sur la méthode de Muskingum. L'estimation des paramètres de la fonction de production est principalement basée sur des considérations physiques. Le modèle a été appliqué à trois bassins versants expérimentaux de l'agglomération nantaise sur lesquels des données hydrologiques sont disponibles. Les débits à l'exutoire et les niveaux de saturation dans le sol ont été analysés et comparés à des données expérimentales, et les résultats sont encourageants. Le modèle permet de représenter la distribution spatiale des variables hydrologiques.

### A distributed hydrological model for urban catchment basins

#### ■ ABSTRACT

*The objective of this research effort is to present a distributed hydrological model intended for urbanized areas that has been built using urban databases and that offers the ability to incorporate processes typically overlooked in the field of urban hydrology (evapotranspiration, infiltration). This hydrological model provides a detailed production function at the land parcel scale, in addition to a simple transfer function based on Muskingum's method. The estimation of production function parameters relies for the most part on physical considerations. The model has been applied to three experimental catchment basins located within the Nantes metropolitan area for which hydrological data are already available. Flow rates at the sewer outfall and soil saturation levels have been analyzed and compared with experimental data. Results obtained are indeed promising : this model makes it possible to depict the spatial distribution of hydrological variables.*

\* **AUTEUR À CONTACTER :**  
**Fabrice RODRIGUEZ**  
fabrice.rodriquez@lpc.fr

## INTRODUCTION

L'hydrologie urbaine a longtemps été abordée dans un objectif de dimensionnement des réseaux d'assainissement qui privilégiaient l'évacuation rapide des eaux pluviales vers le milieu naturel, et les outils de modélisation étaient conçus pour répondre à ce besoin. Aujourd'hui, le développement de l'urbanisation s'accélère, et la gestion des eaux pluviales en milieu urbain se place dans un contexte plus environnemental. Cela se traduit par une limitation des débits d'eau pluviale vers le milieu récepteur en favorisant l'évapotranspiration, l'infiltration et le stockage. Les outils de modélisation hydrologique de demain doivent pouvoir s'adapter à ces nouveaux enjeux. La description du fonctionnement hydrologique des bassins versants urbains reste en effet très perfectible [1] : les observations réalisées sur des bassins versants à différentes échelles, allant de celle d'une voirie [2]

à celle de bassins de plusieurs centaines d'hectares [3] montrent que la réponse des bassins versants à la pluie varie d'un événement à l'autre. Le fait de prendre en compte des processus généralement négligés en milieu urbain (infiltration à travers la voirie, contribution de l'eau du sol aux débits) autorise une meilleure restitution des volumes ruisselés [4] et améliore la description des phénomènes hydrologiques en ville. Des travaux de recherche ont été menés dans ce sens : il a été révélé que l'évapotranspiration et l'interception avaient également un rôle non négligeable dans le bilan hydrologique [5, 6] ; un modèle hydrologique distribué qui prend en compte à la fois le bilan énergétique et le cycle de l'eau a été développé, et appliqué à des zones fortement anthropisées [7].

Cet article présente un modèle hydrologique basé sur les banques de données urbaines et capable de reproduire la variabilité spatiale et temporelle des processus hydrologiques sur les bassins versants urbains. Ce modèle, appelé URBS-MO (Urban Runoff Branching Structure MOdel en anglais), est fondé sur une description détaillée du milieu urbain du point de vue de l'hydrologue [8]. Les objectifs du modèle sont (i) de fonctionner sur de longues chroniques pluvieuses, (ii) de déterminer en continu les différentes composantes du bilan hydrologique, comme le ruissellement produit par les différents types de surface et le débit produit par le sol, provenant de l'infiltration de l'eau du sol dans les réseaux d'assainissement, et (iii) d'indiquer l'évolution du niveau de saturation du sol. Le second paragraphe présente les principes du modèle et détaille les processus de la fonction de production. Le troisième paragraphe traite de la mise en œuvre du modèle et introduit les études de cas, qui sont trois bassins versants urbains expérimentaux de l'agglomération nantaise (Rezé, Gohards-réseau et St Joseph). Le quatrième paragraphe est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats.

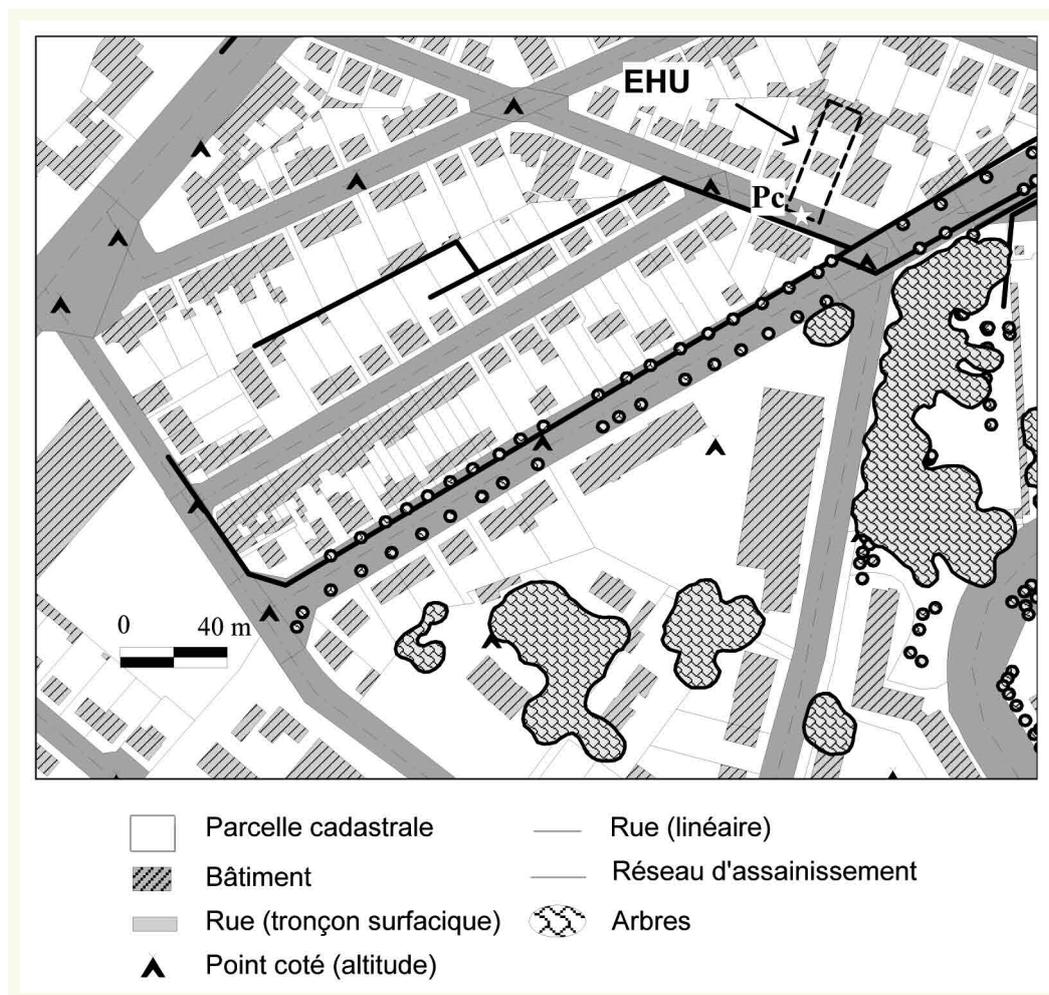
## MORPHOLOGIE URBAINE ET MODÉLISATION HYDROLOGIQUE

Le rôle de la morphologie des bassins versants et de leur réseau hydrographique sur leur comportement hydrologique a fait l'objet de nombreux travaux de recherche en hydrologie, et un certain nombre de modèles hydrologiques s'appuie sur la description de cette morphologie. Cette description est facilitée par le développement des bases de données géographiques, relatives à la description de la topographie (à travers les modèles numériques de terrain), ou l'occupation du sol, en particulier grâce aux données satellitaires ou aux Systèmes d'Information Géographiques mis en place pour mieux connaître le territoire. Ce type de données favorise le développement de modèles hydrologiques spatialement distribués et d'approches géomorphologiques [9, 10]. L'émergence des banques de données urbaines permet d'envisager l'application de ce type de modélisation pour la ville. Le milieu urbain est en effet très bien documenté, à travers les bases de données cadastrales gérées par les collectivités locales (figure 1), auxquelles s'ajoutent un grand nombre de données thématiques (espaces verts, types d'habitat, voiries, réseaux d'assainissement...). Les analyses de la morphologie urbaine menées par les architectes et les urbanistes indiquent les éléments qui définissent la forme d'une ville : les parcelles et le réseau viaire. A partir de ces éléments structurants, les banques de données urbaines permettent de représenter le milieu urbain comme un ensemble de surfaces élémentaires connectées au réseau hydrographique. Une méthode de prétraitement des données urbaines a été développée [11], et permet de définir les composantes d'un bassin versant urbain : i) les objets surfaciques élémentaires, appelés les éléments hydrologiques urbains (EHUs), composés d'une parcelle cadastrale, de la voirie adjacente et des bâtiments situés sur cette parcelle et ii) le réseau hydrographique urbain, regroupant le réseau d'assainissement et la voirie, qui recueillent le ruissellement des eaux pluviales.

Un EHU est caractérisé par des caractéristiques géométriques déduites de l'analyse des données urbaines : la surface totale, la surface imperméabilisée (bâti et voirie), la surface végétalisée, la pente, la profondeur du réseau d'assainissement et la position de la connexion entre cet élément et le réseau hydrographique urbain. Ces caractéristiques permettent de disposer d'une représentation schématique de l'EHU (figure 2a). Les processus hydrologiques peuvent être modélisés à l'échelle de cet élément, afin de représenter les écoulements de surface et de subsurface (modélisation de la fonction de production).

figure 1

Carte représentant les différentes couches de données de la banque de données urbaines de Nantes Métropole. Un élément hydrologique urbain (EHU) est représenté en traits pointillés gras, ainsi que son point de connexion au réseau hydrographique  $P_c$ .



Le réseau hydrographique urbain est constitué de « sources », qui sont les EHU représentés par leur point de connexion, et de l'ensemble des chemins d'écoulement de l'eau, depuis ces sources jusqu'à l'exutoire du bassin versant (figure 3). Ces chemins d'écoulement sont constitués de tronçons de voirie et du réseau d'assainissement, les caractéristiques géométriques de ces tronçons étant connues (longueur, pente et diamètre). Le transfert de l'eau pluviale est modélisé à l'échelle de ce réseau hydrographique (modélisation de la fonction de transfert).

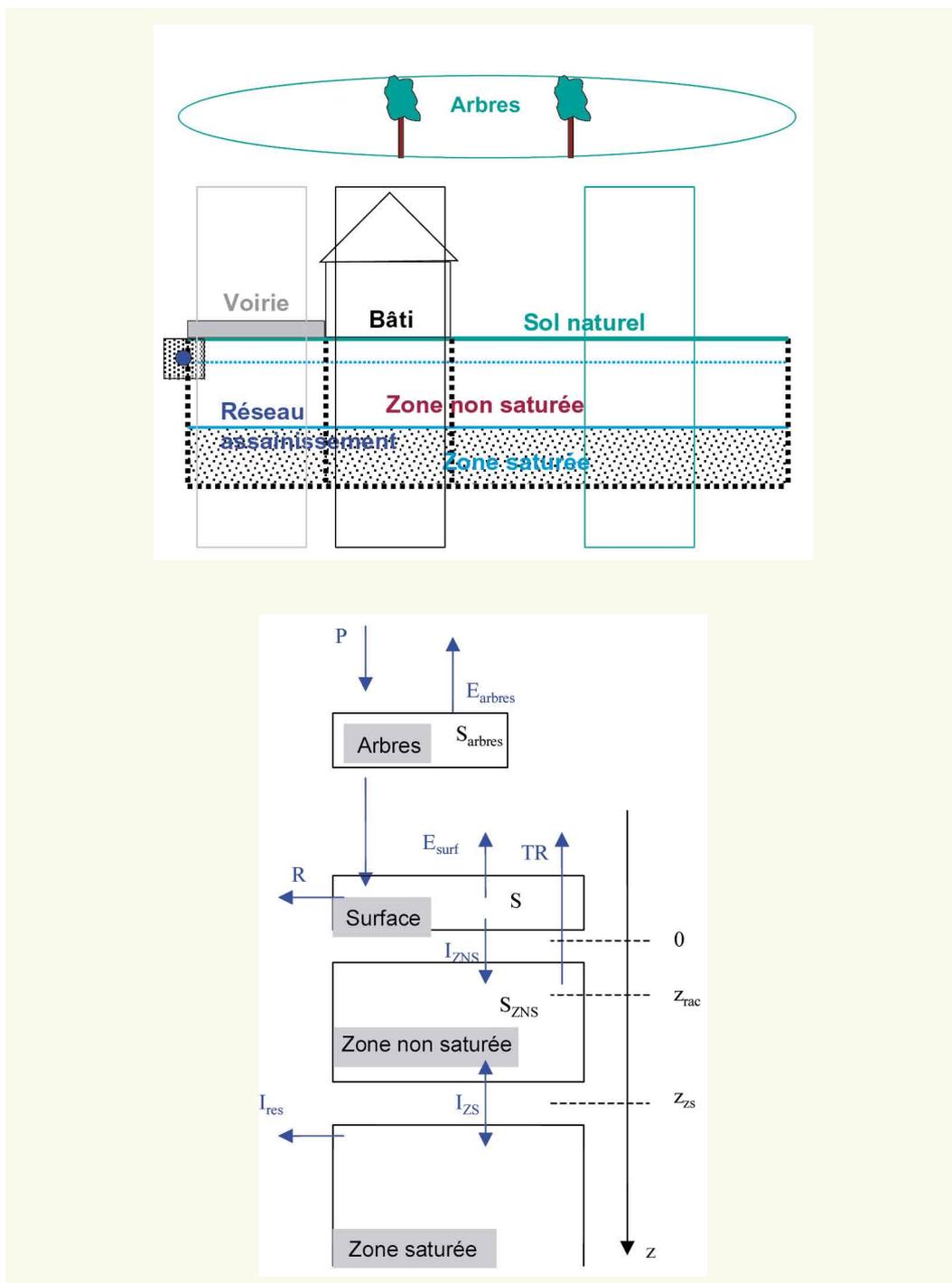
## MODÉLISATION DES PROCESSUS HYDROLOGIQUES À L'ÉCHELLE DE LA PARCELLE CADASTRALE

### ■ Principes de base

Les modèles hydrologiques utilisés en milieu urbain négligent en général les processus hydrologiques régissant les écoulements subsurfaceux, et ne tiennent pas compte du rôle du sol dans la formation des débits. Des travaux de recherche récents ont pourtant montré que ce rôle n'était pas négligeable [4], et il est important de le prendre en compte dans le contexte actuel de la gestion des eaux pluviales, qui tend à favoriser l'infiltration des eaux dans le sol. Il a également été prouvé que l'interaction entre l'eau du sol et le réseau de drainage (infiltrations d'eaux parasites) avait un rôle significatif sur les quantités d'eaux drainées par les réseaux d'eaux pluviales et usées [11]. Enfin, la prise en compte des processus d'évapotranspiration et d'interception améliore la représentation du bilan hydrologique des bassins versants urbains [5, 7].

Une première modélisation de l'EHU, basée sur une modélisation explicite des écoulements de l'eau dans le sol a montré que la représentation de ces processus dans un modèle numérique détaillé

**figure 2**  
*a. Représentation bidimensionnelle de l'EHU et des trois profils verticaux. b. Profil vertical de chaque type d'occupation du sol, composé de 4 réservoirs superposés.*

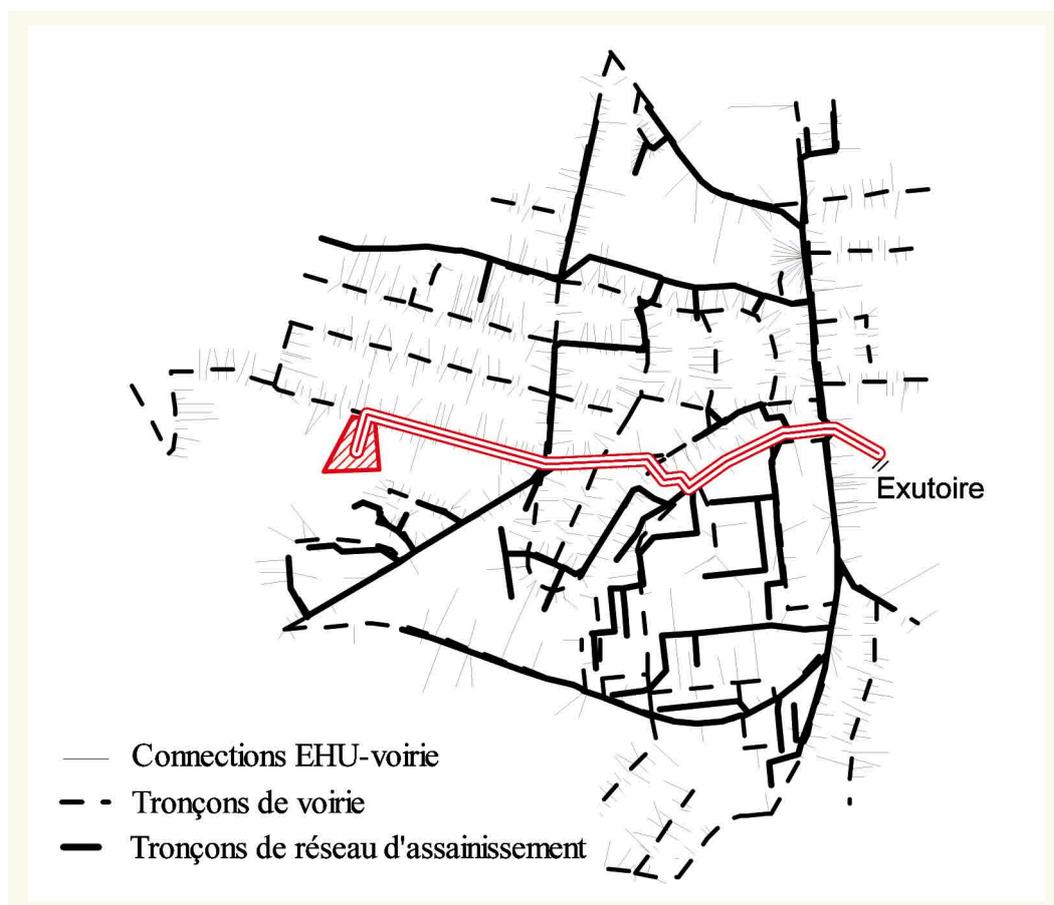


améliorerait la compréhension des phénomènes hydrologiques, et permettrait une meilleure restitution des débits ruisselés par rapport aux fonctions de production classiques utilisées dans les modèles hydrologiques urbains [12].

Le modèle hydrologique développé dans ce travail s'inspire de la modélisation de l'élément hydrologique urbain [4] ; il a pour objectif principal la représentation des processus hydrologiques cités ci-dessus, et doit également répondre à des objectifs plus contraignants. D'une part, le modèle doit être capable de simuler de longues chroniques pluvieuses à des pas de temps fins, compatibles avec le temps de réponse des bassins versants urbains, souvent inférieur à l'heure, voire la demi-heure. D'autre part, le modèle doit pouvoir simuler de grands bassins versants aux caractéristiques morphologiques hétérogènes, et donc un ensemble d'EHU conséquent (de l'ordre de 1000 pour un bassin versant de 200 ha). Dans ce contexte, une paramétrisation simple a été adoptée pour la

**figure 3**

Carte du réseau hydrographique urbain d'un bassin versant situé à Nantes [8]. Un chemin d'écoulement de l'eau prenant son origine sur l'EHU hachuré est représenté en rouge.



modélisation des flux hydriques. Les processus hydrologiques sont détaillés dans chaque élément en parcourant le cycle de l'eau depuis l'atmosphère jusqu'au sous-sol. Cette paramétrisation est basée sur un certain nombre d'hypothèses :

- ❶ L'EHU est modélisé selon sa coupe verticale transversale, composée de trois types d'occupation du sol, les toitures, les routes et les sols naturels, ces deux derniers pouvant être recouverts par les arbres
- ❷ L'EHU est représenté par trois profils verticaux correspondant aux trois types d'occupation du sol (figure 2a).
- ❸ Chaque profil vertical regroupe 4 réservoirs superposés : le réservoir d'interception par les arbres, la surface du sol, la zone non saturée et la zone saturée (figure 2b).
- ❹ Les flux horizontaux entre les profils verticaux au sein d'un même EHU se produisent exclusivement à l'intérieur de la zone saturée.
- ❺ La tranchée de pose du réseau d'assainissement draine la zone saturée ; il est supposé que les flux subsurfaciques horizontaux au sein du bassin versant sont totalement contrôlés par ce drainage, car le réseau est suffisamment dense en milieu urbain

### ■ Représentation des processus hydrologiques dans la fonction de production

Les flux hydriques ont été modélisés pour chaque type d'occupation du sol selon le même schéma (figure 2b) ; cette paramétrisation comporte 6 étapes :

- a) L'interception de la pluie par les arbres est modélisée en adoptant le modèle de Calder [12], qui considère que les feuilles des arbres sont représentées par un réservoir d'interception d'une capacité

limitée. Si la quantité de pluie est inférieure à cette capacité, l'eau est interceptée et peut ensuite retourner à l'atmosphère par évaporation. Si cette capacité est dépassée, la pluie passe à travers les feuilles des arbres et atteint le sol (pluie non interceptée). Si le type d'occupation du sol n'est pas recouvert d'arbres, la pluie non interceptée est égale à la pluie.

b) La surface est représentée par un réservoir, alimenté par la pluie non interceptée  $P_i$ , et vidangé par l'évaporation  $E_{\text{surf}}$ , l'infiltration dans la zone non saturée  $I_{\text{ZNS}}$  et le ruissellement de surface  $R$ . Le flux d'évaporation est supposé proportionnel à l'évapotranspiration potentielle fournie par la météorologie nationale ( $ETP$ ) et à la quantité d'eau stockée dans le réservoir  $S_{\text{surf}}$ . Le flux d'infiltration  $I_{\text{ZNS}}$  est contrôlé par l'état hydrique du sol et les caractéristiques du type d'occupation du sol. Le ruissellement se produit lorsque le stock de surface  $S_{\text{surf}}$  dépasse la capacité maximale du réservoir  $S_{\text{max}}$ . L'équation bilan de ce réservoir s'écrit à chaque instant  $t$  et pour chaque type d'occupation du sol :

$$S_{\text{surf}}(t) = S_{\text{surf}}(t - \Delta t) + [(1 - f_{\text{arbres}})P(t) + f_{\text{arbres}}P_i(t) - E_{\text{surf}}(t) - I_{\text{ZNS}}(t) - R(t)] \Delta t \quad (1)$$

où  $f_{\text{arbres}}$  représente la fraction arborée du type d'occupation du sol considéré (nulle pour le type « bâti »),  $P$  la pluie et  $P_i$  la pluie non interceptée.

c) La zone non saturée est représentée par un réservoir alimenté par infiltration de la surface  $I_{\text{ZNS}}$ , et alimenté par flux capillaire  $I_{\text{zs}}$  provenant de la zone saturée sous jacente, ou vidangé vers la zone saturée par infiltration  $I_{\text{zs}}$  et par transpiration  $TR$  dans la zone racinaire du sol naturel (sur la profondeur racinaire  $z_{\text{rac}}$ ). Le flux  $I_{\text{zs}}$  est estimé par la loi de Darcy appliquée entre la surface et un point représentatif de la zone non saturée, il est vertical ascendant s'il est négatif, et vertical descendant s'il est positif. La teneur en eau dans cette zone est supposée uniforme verticalement, et les variations de la succion et de la conductivité hydraulique sont estimées à partir des relations de Brooks et Corey [13]. Parmi les paramètres hydrodynamiques qui conditionnent cette représentation de la zone non saturée, figure la valeur de la conductivité hydraulique à saturation  $K_s$  qui doit être connue pour chaque type d'occupation du sol (et nulle pour les habitations). La capacité du réservoir de la zone non saturée n'est pas limitée.

d) Le niveau de la zone saturée du sol est représenté dans le modèle. Il augmente lorsque le flux d'infiltration  $I_{\text{zs}}$  est positif, et diminue lorsque l'eau du sol quitte la zone saturée, soit par flux capillaire vers la zone non saturée, soit par drainage dans le réseau d'assainissement. Le drainage direct dans le réseau d'assainissement a lieu lorsque le niveau de saturation atteint ou dépasse le niveau du radier du réseau d'assainissement. La composante d'infiltration de l'eau du sol dans le réseau  $I_{\text{res}}$  a été estimée par analogie avec l'hydraulique des drains agricoles, en considérant que le collecteur est un drain parfait [14] et en supposant que les drains sont régulièrement espacés :

$$I_{\text{res}}(t) = K_s e^{-\overline{z_{\text{zs}}(t)}/M} \frac{\lambda}{L^2} (z - z_{\text{res}} - \overline{z_{\text{zs}}(t)})^\mu \quad (2)$$

où  $z_{\text{zs}}$  est le niveau de saturation,  $z - z_{\text{res}}$  la profondeur du réseau,  $L$  la longueur de l'élément hydrologique, représentant la demi-distance inter-drains (en m),  $\lambda$  et  $\mu$  sont deux paramètres (sans dimension) qui dépendent du type et de l'état du drain et de la tranchée contenant le collecteur. Dans le cas d'un réseau séparatif, le drainage regroupe le drainage dans le réseau d'eau usée et dans le réseau d'eau pluviale. Nous avons introduit un paramètre qui permet de distinguer la part de ce flux de drainage qui contribue à chaque réseau à l'échelle du bassin versant : le paramètre  $f^{\text{res-ep}}$  représente l'infiltration du sol dans le réseau d'eau pluviale, la part restante  $(1 - f^{\text{res-ep}})$  représente l'infiltration dans le réseau d'eau usée.

e) A chaque pas de temps, le niveau de saturation moyen de chaque EHU est estimé par la moyenne des niveaux de saturation des trois profils verticaux. Cette procédure permet de représenter les flux latéraux dans la zone saturée.

f) Le ruissellement produit par chaque EHU est la somme des différentes contributions de l'EHU, c'est-à-dire le ruissellement produit par chaque type d'occupation du sol, et le drainage de l'eau du sol dans le réseau d'assainissement.

$$R^{\text{tot}}(t) = f^{\text{bat}} A^{\text{bat}} R^{\text{bat}}(t) + f^{\text{voi}} A^{\text{voi}} R^{\text{voi}}(t) + f^{\text{nat}} A^{\text{nat}} R^{\text{nat}}(t) + f^{\text{res-ep}} A^{\text{tot}} I_{\text{res}}(t) \quad (3)$$

où  $A$  représente l'aire de chaque type dans l'élément hydrologique,  $R$  le ruissellement produit par chaque type (bat : bâtiment, voi : voirie, nat : sol naturel, jardins), et  $f$  représente le coefficient de connexion au réseau de chaque type

### ■ Les paramètres morphologiques et physiques du modèle

Le modèle nécessite la connaissance d'un certain nombre de caractéristiques morphologiques et de paramètres physiques. Les caractéristiques morphologiques de chaque EHU sont la surface de chaque type d'occupation du sol, la fraction de la surface recouverte par des arbres, et la profondeur du réseau d'assainissement. Ces caractéristiques peuvent être déduites des banques de données urbaines ou d'images satellites. Les facteurs  $f^{\text{bat}}$ ,  $f^{\text{voi}}$  and  $f^{\text{nat}}$  (équation 3), qui représentent la fraction de surface de chaque type d'occupation du sol connectée au réseau d'assainissement peuvent être déduits d'enquêtes de terrain ou de données statistiques. Le facteur  $f^{\text{res-ep}}$  représente la répartition entre le drainage de l'eau du sol par le réseau d'eaux pluviales et par le réseau d'eaux usées, et peut être estimé à partir des densités de drainage respectives de chaque réseau, et d'une analyse comparée des profondeurs des deux réseaux, qui peuvent être déduits des banques de données urbaines.

Les paramètres du modèle de fonction de production, listés dans le **tableau 1**, peuvent être déduits de considérations physiques, soit à partir de la bibliographie ou à partir de mesures in-situ. Dans le cadre de ce travail, l'estimation des paramètres s'est également appuyée sur une modélisation

**tableau 1**

*Paramètres du modèle pour le bassin de Rezé – Les paramètres encadrés sont ceux qui peuvent être déduits de mesures in situ, les paramètres grisés sont ceux qui doivent être ajustés, les autres peuvent être déduits de la littérature.*

| Paramètre                      | Unité             | Valeur                 | Description  |
|--------------------------------|-------------------|------------------------|--|
| $S_{\text{min}}$               | mm                | 1 (été)<br>0,3 (hiver) | Stock minimum du réservoir d'interception par la végétation  |
| $a$                            | min <sup>-1</sup> | 0,04                   | Coefficient de la loi de drainage d'interception par la végétation   |
| $S_{\text{smax}}^{\text{nat}}$ | mm                | 5                      | Capacité maximum du réservoir de surface (pour chaque type d'occupation du sol nat, sol naturel, bat, bâti et voi, voirie) |
| $S_{\text{smax}}^{\text{bat}}$ | mm                | 0,5                    |  |
| $S_{\text{smax}}^{\text{voi}}$ | mm                | 3,5                    |  |
| $K_S^{\text{nat}}$             | m/s               | 1,3 e <sup>-5</sup>    | Conductivité hydraulique à saturation (pour chaque type)   |
| $K_S^{\text{voi}}$             | m/s               | 7,5 e <sup>-8</sup>    |  |
| $\theta_s$                     | /                 | 0,43                   | Teneur en eau à saturation du sol  |
| $\Psi_e$                       | /                 | 0,20                   | Succion d'entrée d'air   |
| $b$                            | /                 | 5                      | Exposant de la courbe de rétention   |
| $M$                            | /                 | 0,2                    | Paramètre de décroissance exponentielle de $K_S^{\text{nat}}$  |
| $\alpha_v$                     | /                 | 0,5                    | Position représentative de la zone non saturée   |
| $z_{\text{rac}}$               | m                 | 1,3                    | Profondeur racinaire   |
| $\lambda$                      | /                 | 4                      | Coefficient de drainage du réseau  |
| $\mu$                          | /                 | 2                      | Exposant de drainage du réseau   |

numérique plus détaillée qui permet de résoudre l'équation de l'écoulement de l'eau dans le sol, à partir du code de calcul CESAR NSAT [4]. Ce travail a permis de valider l'approche simplifiée de l'écoulement vertical de l'eau dans le sol [15]. Enfin une étude de sensibilité a montré que les paramètres les plus sensibles étaient la conductivité hydraulique à saturation du sol naturel  $K_s$ , et le coefficient de drainage du sol par le réseau  $\lambda$ .

## MODÉLISATION HYDROLOGIQUE À L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT URBAIN

### ■ Modélisation du transfert des eaux pluviales

Lors de précipitations courantes, le ruissellement de surface se forme sur les Éléments Hydrologiques Urbains (sur chaque type de surface, bâti, voirie et zone perméable), puis se concentre dans les caniveaux le long des rues. Cet écoulement est limité en aval par les avaloirs du réseau d'assainissement, par lesquels les eaux de ruissellement rejoignent le réseau souterrain pour arriver jusqu'à l'exutoire du bassin versant. Le drainage de l'eau du sol par le réseau d'assainissement rejoint directement le réseau souterrain au point de connexion de chaque EHU. La voirie et le réseau d'assainissement constituent donc le réseau hydrographique urbain, et [8] ont montré qu'il était possible de déduire de cette description la fonction de transfert dans le réseau hydrographique, à partir d'une simple méthode d'estimation du temps de transfert sur les cheminements hydrologiques. Cette méthode a été améliorée par l'utilisation de la méthode de Muskingum appliquée au réseau d'assainissement. La méthode de calcul du transfert de l'eau pluviale est donc la suivante : 1) le transfert surfacique entre chaque EHU et les avaloirs du réseau d'assainissement est déterminé selon la méthode du temps de transfert développée par [8] ; 2) le transfert hydraulique dans le réseau d'assainissement est représenté en utilisant la formulation de Muskingum-Cunge [16]. Pour chaque tronçon du réseau hydrographique, le débit s'exprime par :

$$Q^{j+1}(t + \Delta t) = C_0 Q^j(t + \Delta t) + C_1 Q^j(t) + C_2 Q^{j+1}(t) \quad (4)$$

où  $Q^j$  est le débit à chaque nœud du réseau,  $j$  et  $j + 1$  les nœuds amont et aval du tronçon considéré, et  $C_0$ ,  $C_1$  et  $C_2$  les coefficients de Muskingum dont la somme vaut 1 :

$$C_0 = \frac{-kx + 0,5\Delta t}{(k-1)x + 0,5\Delta t}, \quad C_1 = \frac{kx + 0,5\Delta t}{(k-1)x + 0,5\Delta t} \quad \text{et} \quad C_2 = \frac{(k-1)x - 0,5\Delta t}{(k-1)x + 0,5\Delta t} \quad (5)$$

où  $k$  et  $x$  sont les paramètres du transfert. Le paramètre  $k$  correspond au temps de transit de l'onde le long du tronçon, et le paramètre  $x$  est un coefficient adimensionnel qui quantifie les influences respectives des débits d'entrée et de sortie sur le volume stocké. Ces paramètres peuvent être estimés à partir des équations suivantes [17] :

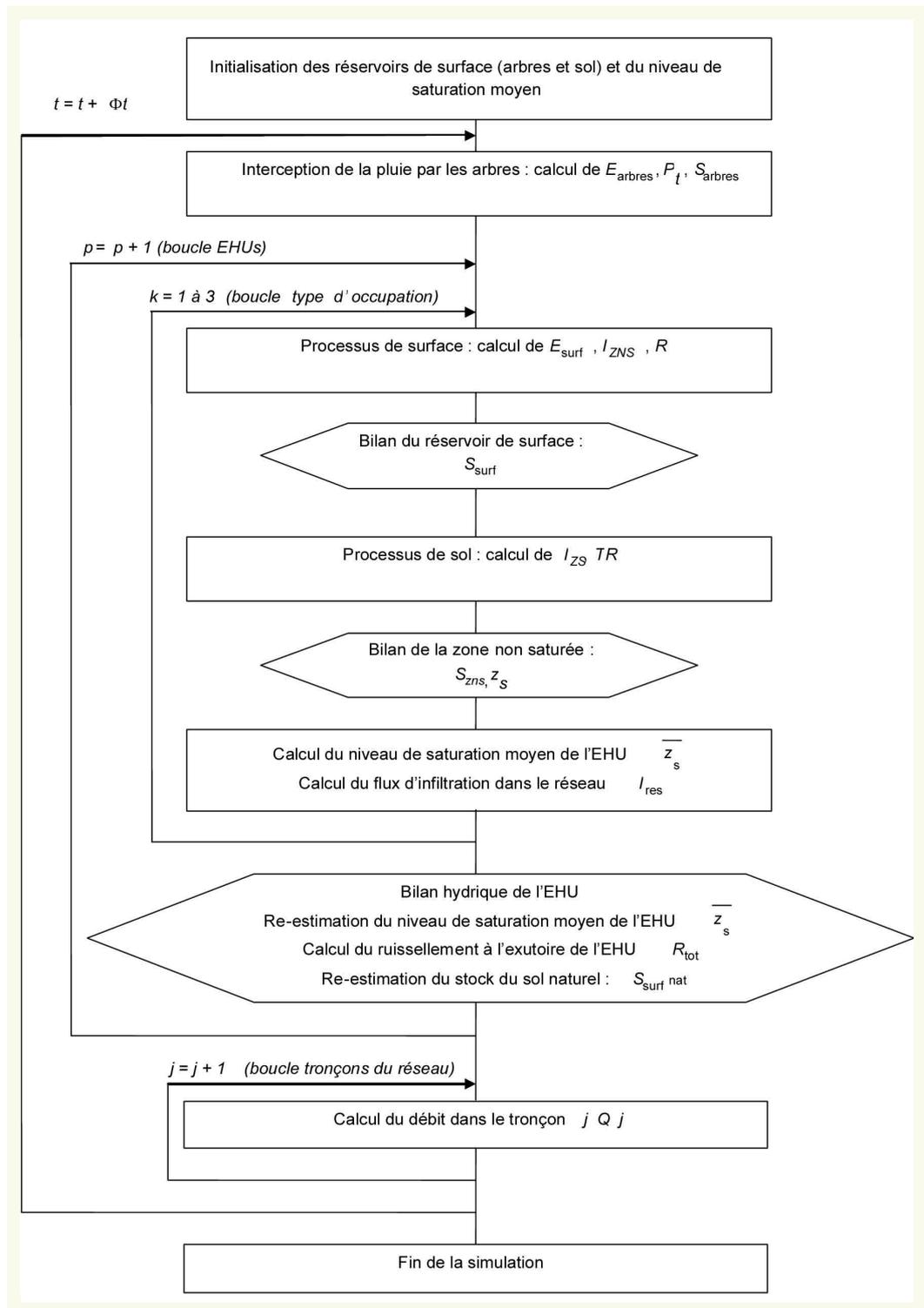
$$k = L_j / \omega \quad \text{et} \quad x = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{Q^j}{B_j \omega S_j L_j} \right) \quad (6)$$

où  $\omega$  est la célérité de l'onde,  $L_j$  et  $S_j$  la longueur et la pente du tronçon  $j$ ,  $B_j$  la largeur du tronçon, et  $Q^j$  le débit courant.

### ■ Organigramme de modélisation

La mise en œuvre du modèle est décrite dans l'organigramme détaillé sur la figure 4. Les conditions initiales sont tout d'abord déterminées de façon homogène sur le bassin versant : les stocks de surface sont nuls au début de la simulation, et le niveau de saturation est initialisé à une valeur acceptable, qui correspond au niveau de saturation réel sur le bassin à cette date (dans le cas où des mesures piézométriques sont disponibles ; sinon, une période d'initialisation préalable, de l'ordre

figure 4  
Organigramme du modèle.



d'une année, est nécessaire). La fonction de production décrite précédemment est ensuite appliquée à chaque EHU de façon indépendante. Les niveaux de saturation de chaque EHU sont moyennés à la fin de chaque pas de temps et le débit de drainage est alors estimé. Le bilan de chaque EHU permet de déterminer les contributions de chaque type d'occupation du sol au débit. La fonction de transfert est ensuite appliquée à chaque tronçon du réseau hydrographique et permet de connaître le débit à l'exutoire du bassin versant. Tous les flux hydrologiques indiqués sur la [figure 2b](#) sont estimés à chaque pas de temps et pour chaque EHU.

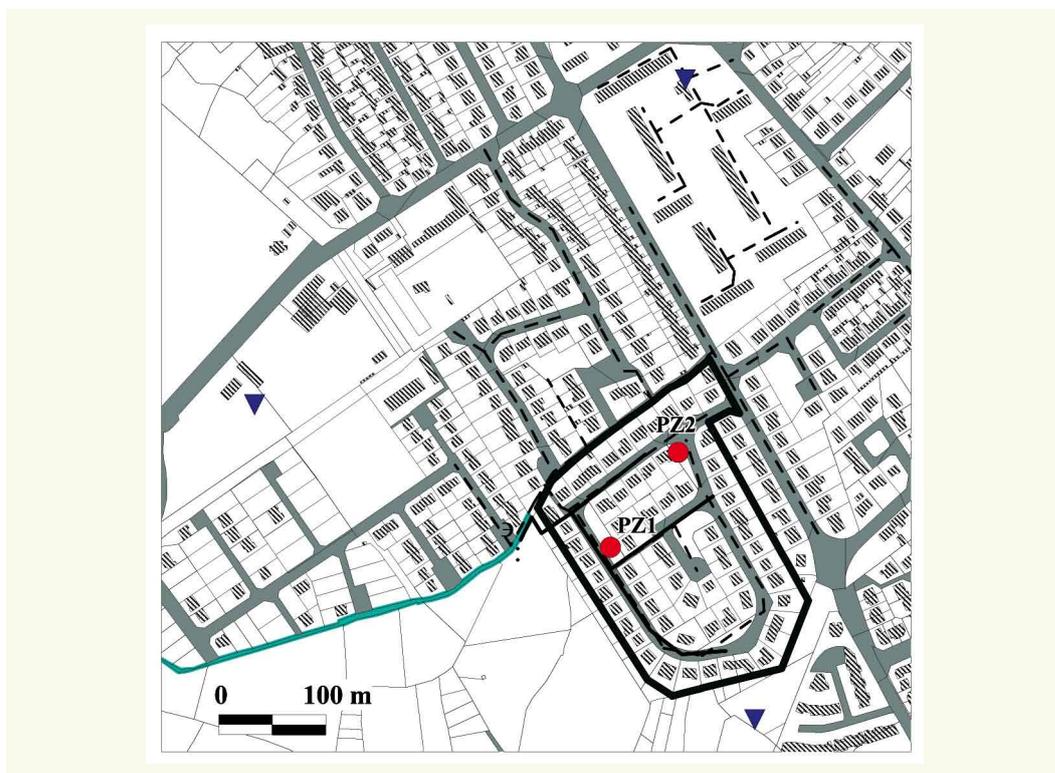
## SITES EXPÉRIMENTAUX D'APPLICATION

Trois bassins versants expérimentaux urbains de l'agglomération nantaise ont été pris en compte pour l'évaluation du modèle hydrologique. La description physique de ces bassins versants est bien connue grâce à la base de données géographiques, fournie et gérée par Nantes Métropole. Ils sont équipés d'un réseau d'assainissement séparatif, et les exutoires de leur réseau d'eau pluviale se déversent dans différentes rivières urbaines.

Le bassin versant Rezé (5 ha) est situé sur la commune de Rezé, au sud de Nantes et se déverse dans le ruisseau de la Jaguère. Il est homogène, composé uniquement d'habitat individuel et comporte 70 parcelles cadastrales (figure 5) ; son taux d'imperméabilisation, estimé par une enquête de terrain, est de 37 %, et le sol est limoneux. Ce bassin a été instrumenté en continu pendant 10 ans [18] et a été utilisé pour l'évaluation de différents modèles hydrologiques [12, 6, 19]. Les données hydrologiques comportent (i) les données de pluie et de débit à l'exutoire entre 1991 et 2000, par l'intermédiaire de 3 pluviomètres et un débitmètre, (ii) les variations des niveaux piézométriques en 2 points du bassin entre septembre 1995 et décembre 1998 et (iii) le drainage de l'eau du sol par le réseau d'assainissement, mesuré durant les périodes hivernales dans le réseau d'eaux usées.

**figure 5**

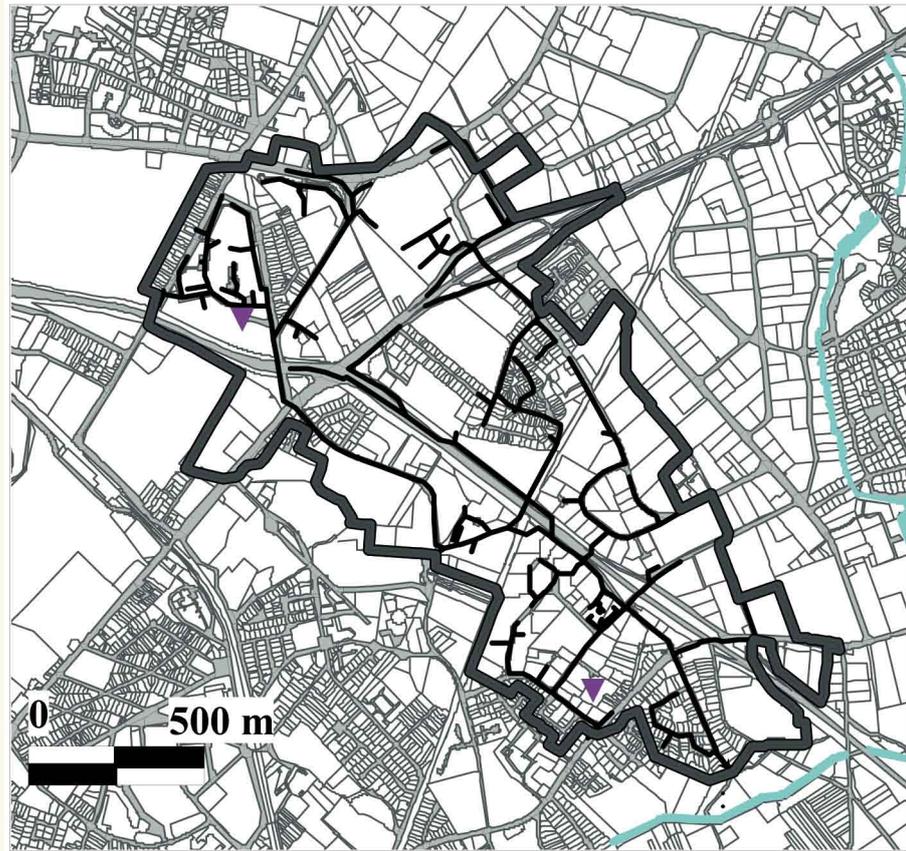
Bassin versant de Rezé.  
La convention cartographique est valable pour les cartes suivantes : les points rouges représentent la position des piézomètres, les triangles mauves les pluviomètres, l'étoile indique la position du point de mesure du débit, situé à l'exutoire du réseau d'eau pluviale (trait plein), et le losange représente le point de mesure dans le réseau d'eaux usées (trait pointillé).  
© DGI ; Nantes-Métropole, 2002 ; LCPC, 2008.



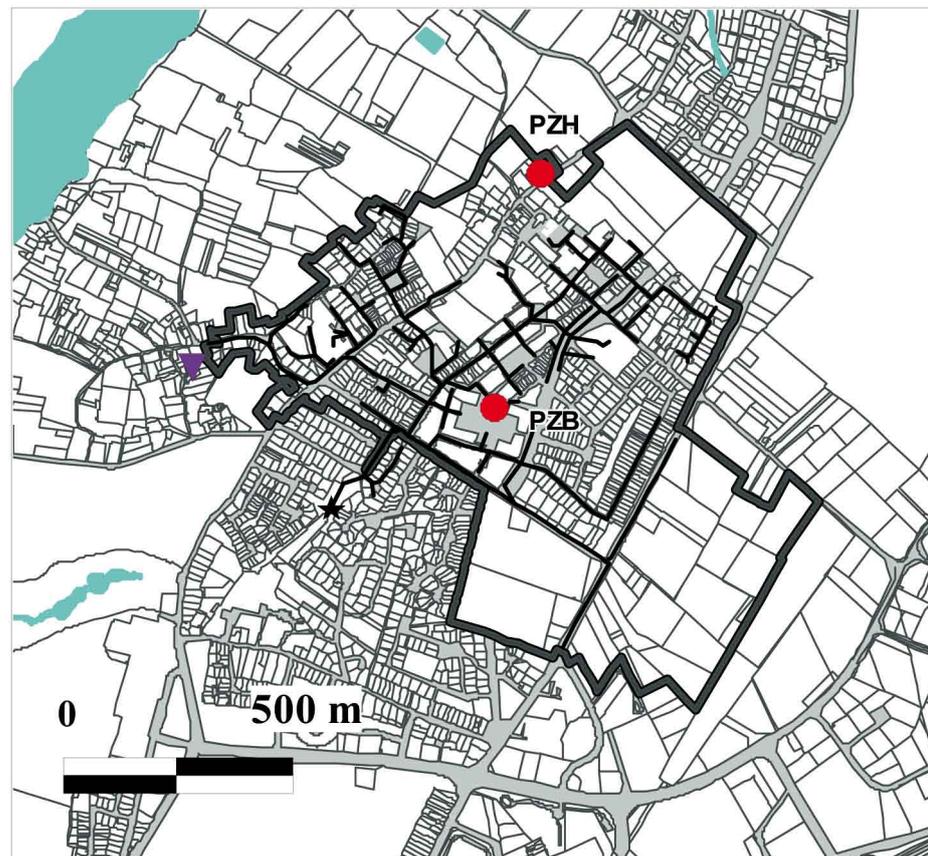
Le bassin versant Gohards-réseau (180 ha), nommé « Gohards » dans la suite du texte, est situé sur la commune de Nantes et se déverse dans le ruisseau des Gohards. Son habitat hétérogène se répartit sur 900 parcelles cadastrales et comporte des zones d'habitat individuel et collectif, des zones commerciales et industrielles (figure 6) ; son taux d'imperméabilisation a été estimé à partir des banques de données urbaines et s'élève à 38 %. Le sol est considéré équivalent à celui de Rezé, soit limoneux. Le bassin versant est instrumenté depuis 1998, et comprend les données de pluie et de débit (2 pluviomètres sont situés sur ce bassin).

Le bassin versant St Joseph (90 ha) est situé au nord de la commune de Nantes et se déverse dans un bassin de rétention qui alimente ensuite le ruisseau de la Bretonnière. Centré autour du bourg de St Joseph de Porterie, son habitat hétérogène se répartit sur 800 parcelles cadastrales et comporte

**figure 6**  
*Bassin versant  
Gohards-réseau.*



**figure 7**  
*Bassin versant St Joseph.*



principalement des zones d'habitat individuel et collectif (figure 7) ; son taux d'imperméabilisation a été estimé à partir des banques de données urbaines et s'élève à 36 % ; ce bassin est encore en cours d'urbanisation. Les données hydrologiques comportent (i) les données de pluie et de débit à l'exutoire depuis juillet 2000 (2 pluviomètres sont situés sur ce bassin), (ii) les variations des niveaux piézométriques en 2 points du bassin depuis juillet 2003 et (iii) une estimation du drainage de l'eau du sol par le réseau d'assainissement, mesuré durant les périodes hivernales dans le réseau d'eaux usées, à travers la quantification des eaux parasites d'infiltration [20].

Enfin les données météorologiques sont les mêmes sur les trois bassins versants et sont issues de la station météorologique de l'aéroport de Bouguenais ; seule l'évapotranspiration potentielle de Penman (ETP) est utilisée. Cette station se situe à 5 km du bassin Rezé, à 13 km du bassin Gohards, et à 15 km du bassin St Joseph.

Les données de pluie et de débit ont été soigneusement validées afin de détecter et d'ôter les données erronées [21]. Une procédure automatique de sélection des événements pluvieux a été mise en œuvre pour différencier les périodes pluvieuses : les événements dont l'intensité pluvieuse excède 1 mm/h pendant 5 min et dont la hauteur cumulée dépasse 2 mm ont été extraits de cette série de données. Les principales caractéristiques des échantillons d'événements pluie-débit extraits sur chaque bassin versant sont indiquées dans le tableau 2. Ces caractéristiques sont assez homogènes selon les bassins et selon les périodes étudiées ; pour des hauteurs de pluie équivalentes, le bassin Gohards présente un coefficient d'écoulement plus important que les deux autres bassins.

**tableau 2**  
Caractéristiques des événements pluvieux.

| Bassin   | Rezé        | Gohards     | St Joseph   |
|--|-------------|-------------|-------------|
| Période d'observation                              | 1991-2000   | 1999-2002   | 2000-2004   |
| Nombre d'événements                                | 850         | 173         | 309         |
| Hauteur de pluie cumulée moyenne (écart type) (mm) | 8,9 (8,5)   | 9,7 (8,9)   | 9,8 (8,5)   |
| Coefficient d'écoulement moyen (écart type) (-)    | 0,22 (0,07) | 0,35 (0,16) | 0,23 (0,15) |

## EVALUATION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE

Le principe retenu pour l'évaluation du modèle hydrologique distribué s'appuie sur la méthodologie suivante :

- Une première application du modèle a été réalisée sur le bassin versant Rezé, en représentant le bassin à l'aide d'un seul EHU représentatif. Étant données la petite taille du bassin et l'homogénéité de son habitat, cette hypothèse est raisonnable. La validation du modèle a été réalisée en analysant deux variables hydrologiques : le débit à l'exutoire du bassin versant, et le niveau de saturation, considéré uniforme ;
- Le bassin versant Gohards a été modélisé en représentant toutes les parcelles cadastrales par des EHU indépendants. Le modèle distribué complet a donc été mis en œuvre, afin d'illustrer la variabilité spatiale des variables hydrologiques simulées. Étant donnée la disponibilité des données hydrologiques sur ce site expérimental, la validation du modèle n'a porté que sur le débit à l'exutoire du bassin.
- Le bassin versant St Joseph a été également modélisé en utilisant le modèle distribué complet, et la validation du modèle a porté sur différentes variables hydrologiques, le débit à l'exutoire du bassin et les niveaux piézométriques en plusieurs points de la zone.

Dans tous les cas, il n'a pas été utilisé de méthode de calage comme cela se fait classiquement en hydrologie ; le parti-pris de cette évaluation a consisté à utiliser dans la mesure du possible la littérature et certaines mesures in-situ pour estimer les valeurs des paramètres ; seule la valeur du paramètre  $\lambda$  a été ajustée, comme indiqué dans les paragraphes suivants, afin de restituer au mieux les volumes ruisselés totaux sur toute la période simulée.

## ■ Application au bassin versant Rezé

### › Mise en œuvre et estimation des paramètres

La simulation a été effectuée sur les 10 années en continu au pas de temps de 5 minutes. Le choix des paramètres a été effectué en s'appuyant sur des données issues de la littérature, sur des valeurs expérimentales (**tableau 1**) et sur l'étude de sensibilité menée par [15]. Par exemple, les travaux de [22] ont permis de déterminer les capacités de stockage maximum des réservoirs de surface (route et bâti). Les caractéristiques hydrodynamiques de la zone saturée du sol ont été estimées grâce à l'analyse de deux échantillons de sol prélevés à différentes profondeurs [4]. La valeur du paramètre  $\lambda$ , qui représente le coefficient de drainage de l'eau du sol par le réseau enterré, caractérise la capacité du réseau d'assainissement à drainer l'eau du sol, qui pourrait être reliée à l'état de détérioration du réseau. Mais cette valeur ne peut pas être déterminée a priori. La valeur initiale de  $\lambda$  a été choisie conformément aux travaux de Cassan [14] mais ce paramètre a été ajusté de façon à minimiser les écarts entre les volumes simulés et observés sur toute la période de simulation ; la valeur ajustée est  $\lambda = 40$ . Enfin, le niveau de saturation a été initialisé à une valeur moyenne qui correspond au niveau de saturation moyen observé sur ce bassin versant en hiver (soit 0,7 m de profondeur).

### › Capacité du modèle à simuler les volumes ruisselés à l'exutoire

Trois variables ont été analysées : les débits instantanés  $Q$ , et par événement, les volumes ruisselés  $V$  et les coefficients d'écoulement  $C_e$  (**tableau 3**). Si la comparaison des débits instantanés n'est pas entièrement satisfaisante, la comparaison des volumes  $V$  simulés et observés est très satisfaisante ( $R^2 = 0,95$ ), et cela montre la capacité de la fonction de production du modèle à bien simuler le bilan hydrologique de ce bassin versant. Le modèle URBS-MO reproduit plus de la moitié de la variabilité des coefficients d'écoulement observés ( $R^2 = 54$ ). Le modèle permet de comparer l'importance des principaux flux d'eau durant la période d'analyse. La **figure 8** représente les flux simulés sur l'EHU. Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la pluie brute sur toute la période et ces résultats sont liés à la configuration de paramètres choisie. Toutefois, ces résultats sont riches d'enseignements. Les flux d'évaporation et de transpiration représentent 50 % de la pluie brute, et l'interception de la pluie par les arbres n'est pas négligeable (2,7 %). La principale contribution au ruissellement provient des surfaces revêtues, 7,5 % de la pluie brute est transformée en ruissellement sur les routes et 15,1 % en ruissellement sur les bâtiments. Mais la composante d'infiltration directe dans les deux réseaux d'assainissement représente près de 30 % des flux sortant du bassin, dont 10 % dans le réseau d'eau pluviale. Cette répartition des flux ne peut pas être complètement validée par manque de données appropriées, mais est en accord avec d'autres résultats expérimentaux obtenus sur des bassins urbains [11, 22], et avec le bilan annuel estimé par le modèle UHE [6] sur ce même bassin versant.

**tableau 3**

*Critères de comparaison pour la simulation des volumes ruisselés  $V$ , des coefficients d'écoulement  $C_e$  et des débits instantanés  $Q$  pour la période de simulation (Rezé).*

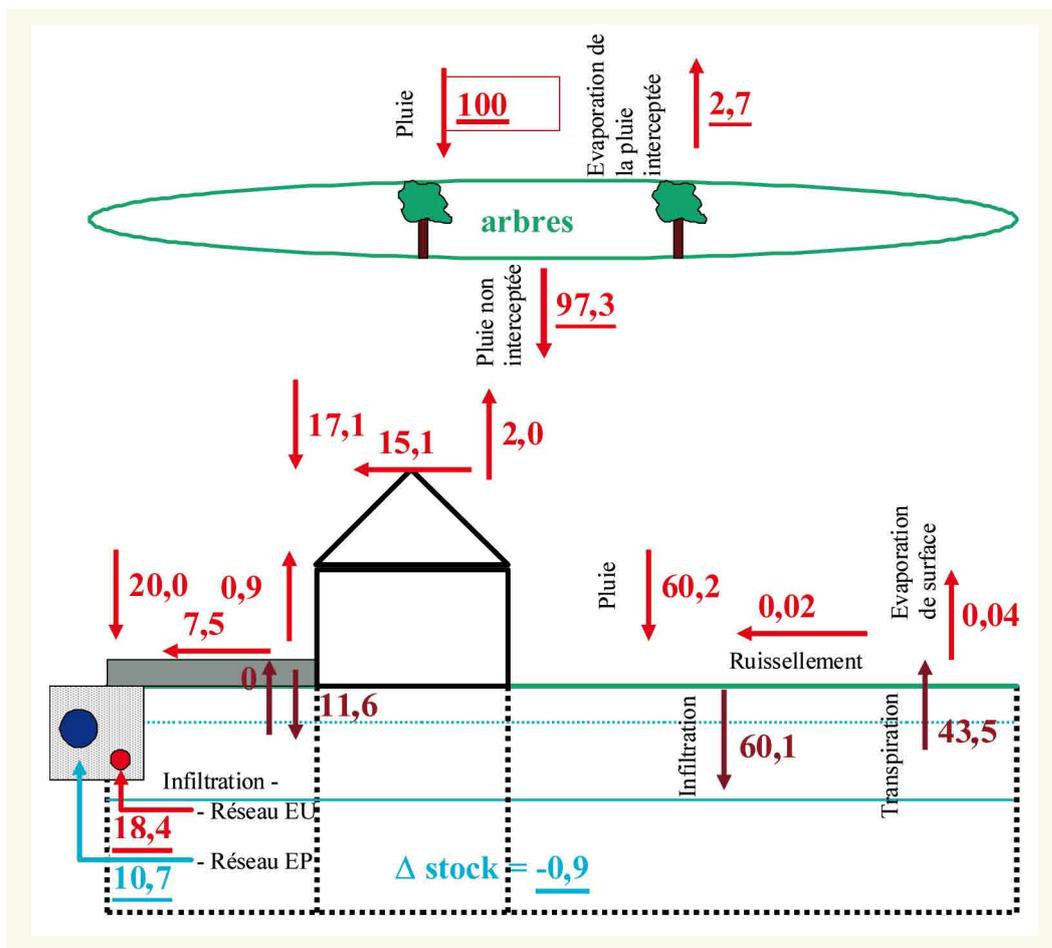
|       | $C_b$  | $R_2$ | $C_{Nash}$ |
|-------|--------|-------|------------|
| $V$   | +1,4 % | 0,95  | 0,95       |
| $C_e$ | -0,5 % | 0,54  | 0,50       |
| $Q$   | 0,58 % | 0,59  | 0,51       |

### › Capacité du modèle à simuler l'état hydrique du sol

Le modèle s'appuie sur une paramétrisation de l'état hydrique du sol, et la validation de cette paramétrisation a été menée en analysant les variations du niveau de saturation. Comme le bassin versant est représenté par un seul EHU, le niveau de saturation est supposé uniforme dans le modèle, ce qui est différent de la réalité, comme l'attestent les différences constatées sur le terrain entre les deux piézomètres installés sur Rezé (**figure 9**). La comparaison des niveaux de saturation est effectuée sur les 3 années de données disponibles, et l'attention est portée sur la dynamique de l'évolution plutôt que sur les valeurs elles-mêmes. Les niveaux simulés et observés augmentent en hiver et diminuent en été, dans une gamme de variation similaire (l'amplitude de variation entre

**figure 8**

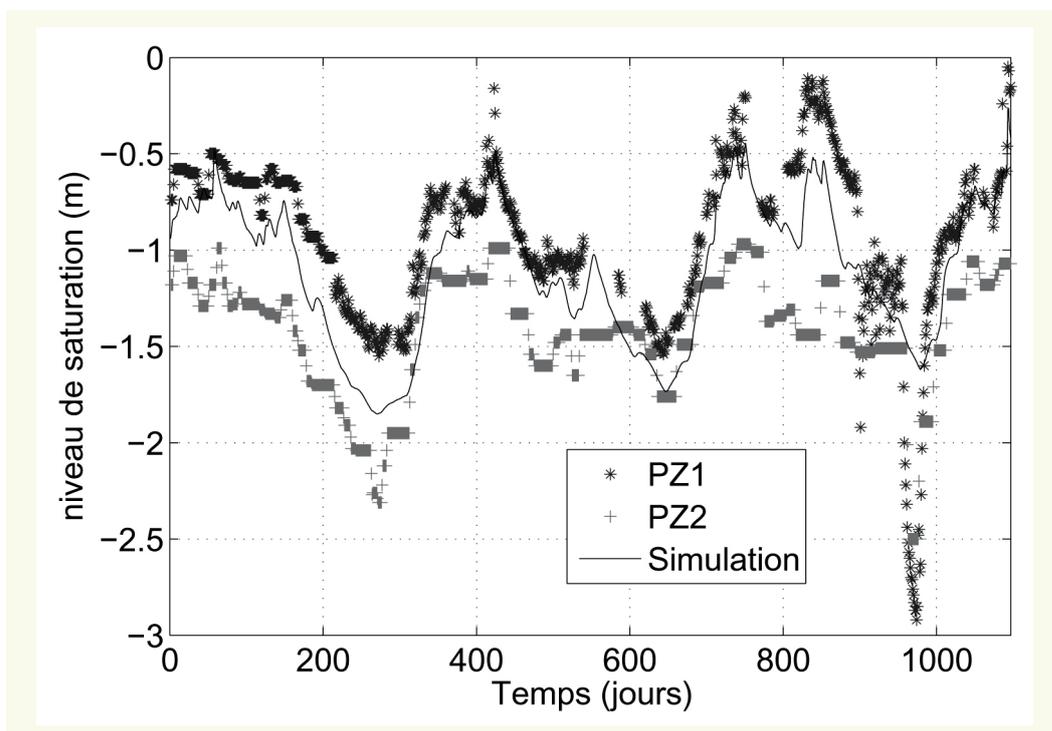
Variables hydrologiques sur l'EHU (Rezè) pour toute la période de simulation (01/01/1991–31/12/2000), exprimées en pourcentage de la pluie brute. Les valeurs soulignées sont valables pour l'EHU, les autres valeurs sont valables pour chaque type d'occupation du sol.



l'hiver et l'été pour l'année 1996 est de l'ordre de 1,25 m, sur les niveaux simulés et observés). Les variations sont similaires, sauf pour l'été 1998, où le modèle ne parvient pas à reproduire une chute particulièrement sévère du niveau de saturation. L'origine de cette chute n'est pas connue,

**figure 9**

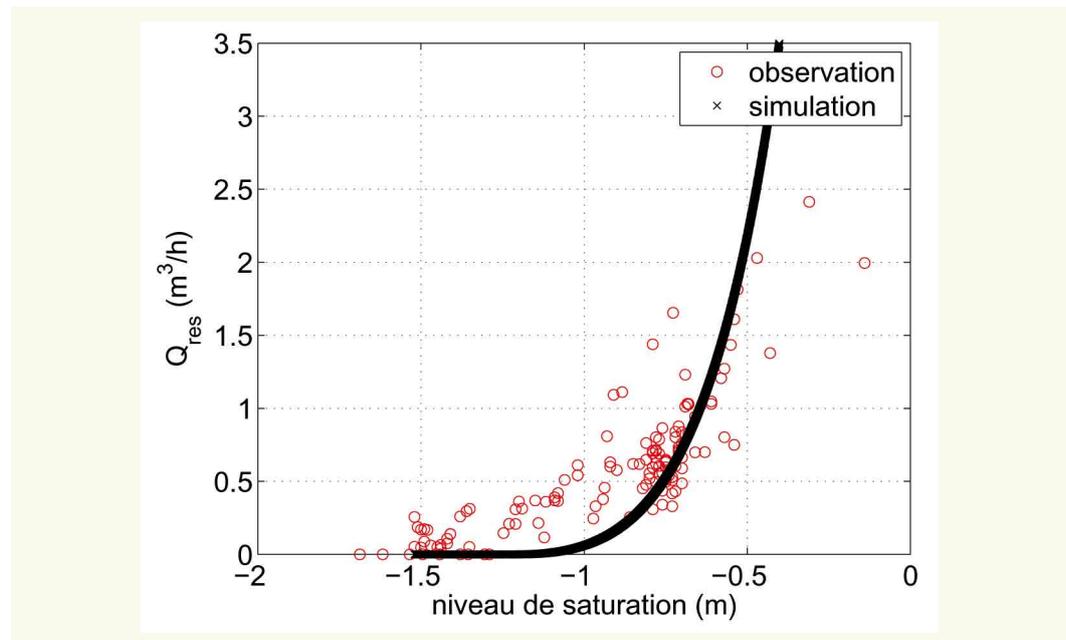
Évolution du niveau de saturation sur le bassin versant Rezè entre 1996 et 1998, observé dans 2 piézomètres et simulé par URBS-MO.



mais pourrait être liée à des processus souterrains extérieurs au bassin versant, ou à un événement d'origine anthropique (pompage...), qui ne sont pas pris en compte par le modèle.

Par ailleurs, l'état hydrique du sol et le niveau de saturation contrôlent le flux de drainage de l'eau du sol par le réseau d'assainissement, soit le flux  $I_{\text{res}}$  (équation 2). Sur ce bassin Rezé, cette variable a été estimée expérimentalement dans le réseau d'eaux pluviales. La comparaison des flux de drainage simulés et observés est illustrée par la figure 10, sur laquelle ces flux sont tracés en fonction du niveau de saturation. La courbe simulée est cohérente par rapport au nuage de points de valeurs observées, même si les débits de base simulés sont un peu faibles en période de nappe basse.

**figure 10**  
Lien entre l'infiltration dans le réseau d'assainissement et le niveau de saturation sur le bassin versant Rezé – Comparaison des valeurs observées et simulées par URBS-MO.



## ■ Application au bassin versant Gohards

### › Mise en œuvre et paramétrisation

Pour ce bassin, le modèle hydrologique distribué complet a été mis en œuvre, selon l'organigramme détaillé figure 4. La fonction de production a été appliquée aux 900 EHU qui composent le bassin versant, et permet de représenter la distribution spatiale des différentes variables hydrologiques calculées. La fonction de transfert a été appliquée afin de déterminer le débit en tout point du réseau hydrographique, et en particulier le débit à l'exutoire du bassin. Les intensités pluvieuses sont considérées homogènes, et correspondent à la moyenne des deux pluviomètres situés sur ce bassin. La simulation a été effectuée avec les données de pluie et de débit en continu sur la période (1999-2002). Étant donnée la proximité des bassins et de leurs caractéristiques de sol, le jeu de paramètres utilisé pour Rezé a été transposé à Gohards, sauf pour le paramètre  $\lambda$ . Le jeu de paramètres est le même pour tous les EHU. De la même façon que pour Rezé, l'ajustement du paramètre  $\lambda$  a été mené en examinant l'écart entre les volumes ruisselés simulés et observés. Cet ajustement indique que la valeur de  $\lambda = 17$  minimise cet écart ; cela pourrait indiquer que l'état du réseau est moins bon sur ce bassin que sur celui de Rezé, mais cette hypothèse n'a pas pu être vérifiée.

Les paramètres de la fonction de transfert ont été estimés en s'appuyant sur les travaux de [23]. Le paramètre  $x$  a été fixé à 0,2, qui est la valeur classique adoptée pour le transfert en réseau d'assainissement urbain ; la vitesse de propagation de l'onde  $\omega$  a été approximée à 80 % de la vitesse d'écoulement dans chaque tronçon, elle-même estimée par la formule de Manning-Strickler [8]. Cette vitesse dépend du taux de remplissage des collecteurs, dont la valeur a été estimée à 50 % suite à une étude de sensibilité [24].

### › Évaluation des chroniques de débit

Une bonne adéquation peut être observée entre les volumes ruisselés simulés  $V$  et les observations, même si les critères de comparaison ne sont pas aussi satisfaisants que sur le bassin Rezé (tableau 4). Les débits instantanés sont correctement simulés ( $R^2 = 0,74$ ,  $C_{Nash} = 0,54$ ), dans la mesure où cette simulation est effectuée en continu sur une période de 4 années, qui regroupe 330 événements pluvieux aux caractéristiques hydrologiques contrastées. Bien que l'adéquation des débits instantanés soit globalement correcte, l'étude plus détaillée de certains événements montre que le débit de pointe d'une part, et la décroissance du débit d'autre part, ne sont pas toujours très bien simulés (figure 11).

**tableau 4**

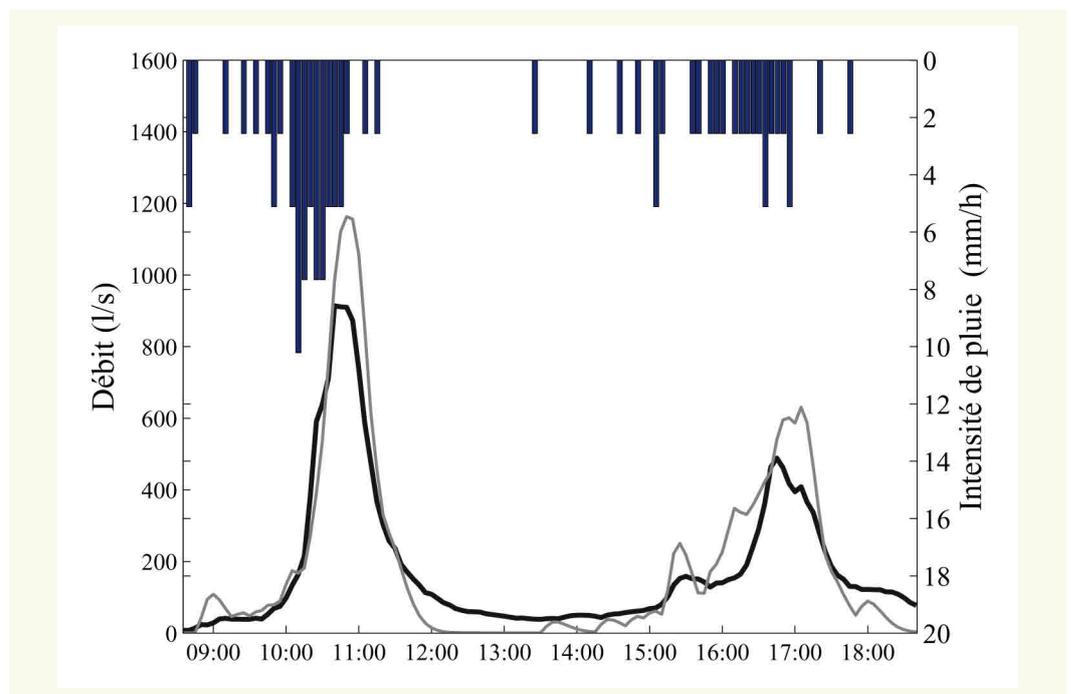
Critères de comparaison pour la simulation des volumes ruisselés  $V$ , des coefficients d'écoulement  $C_e$  et des débits instantanés  $Q$  pour le bassin versant Gohards.

|       | $C_b$   | $R^2$ | $C_{Nash}$ |
|-------|---------|-------|------------|
| $V$   | 7,1 %   | 0,89  | 0,79       |
| $C_e$ | - 5,8 % | 0,43  | 0,20       |
| $Q$   | 2,2 %   | 0,74  | 0,54       |

La proportion des différentes contributions au débit est indiquée dans le tableau 5. Sur ce bassin contrairement à Rezé, la contribution des surfaces perméables est relativement importante : le ruissellement de surface produit par les surfaces perméables atteint en moyenne 6 % de la pluie totale précipitée, soit 16 % du débit pendant les événements pluvieux. Cette contribution est très variable selon la saison : la part du ruissellement de surface perméables pendant les événements pluvieux varie entre 1 % durant l'été et 20 % pour certains événements d'hiver. Bien qu'importante au regard des estimations rencontrées dans la littérature [25, 4], cette contribution indiquée par la simulation peut être partiellement expliquée en examinant les hypothèses de fonctionnement du modèle. Dans la réalité, le ruissellement produit par les surfaces perméables est souvent contenu à l'intérieur des parcelles (présence de murs, haies...) et se ré-infiltre dans le sol ; ce phénomène n'est pas pris en compte dans le modèle car l'information n'est pas disponible, et ce ruissellement est directement affecté au réseau hydrographique.

**figure 11**

Comparaison du débit simulé par URBS-MO (trait fin) avec le débit observé (trait épais) sur le bassin versant Gohards au pas de temps de 5 minutes (21 septembre 2000).



**tableau 5**

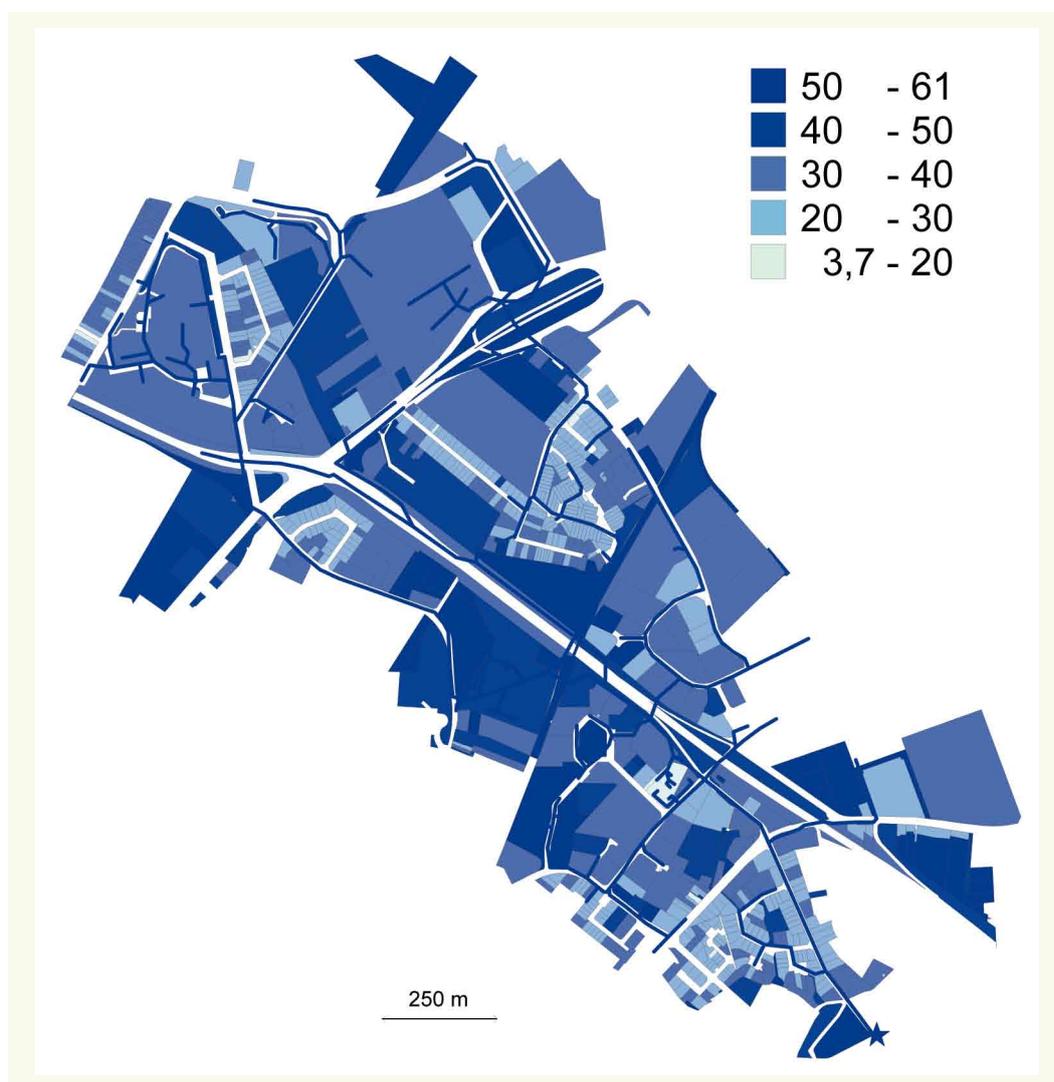
Différentes contributions au débit, exprimées en pourcentage de la pluie brute sur le bassin Gohards.

| $Q^{bat}$ | $Q^{voi}$ | $Q^{nat}$ | $Q^{res}$ | $Q^{tot}$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 13,3      | 13,5      | 6,7       | 10,1      | 43,7      |

### ► Illustration de la distribution spatiale des variables hydrologiques

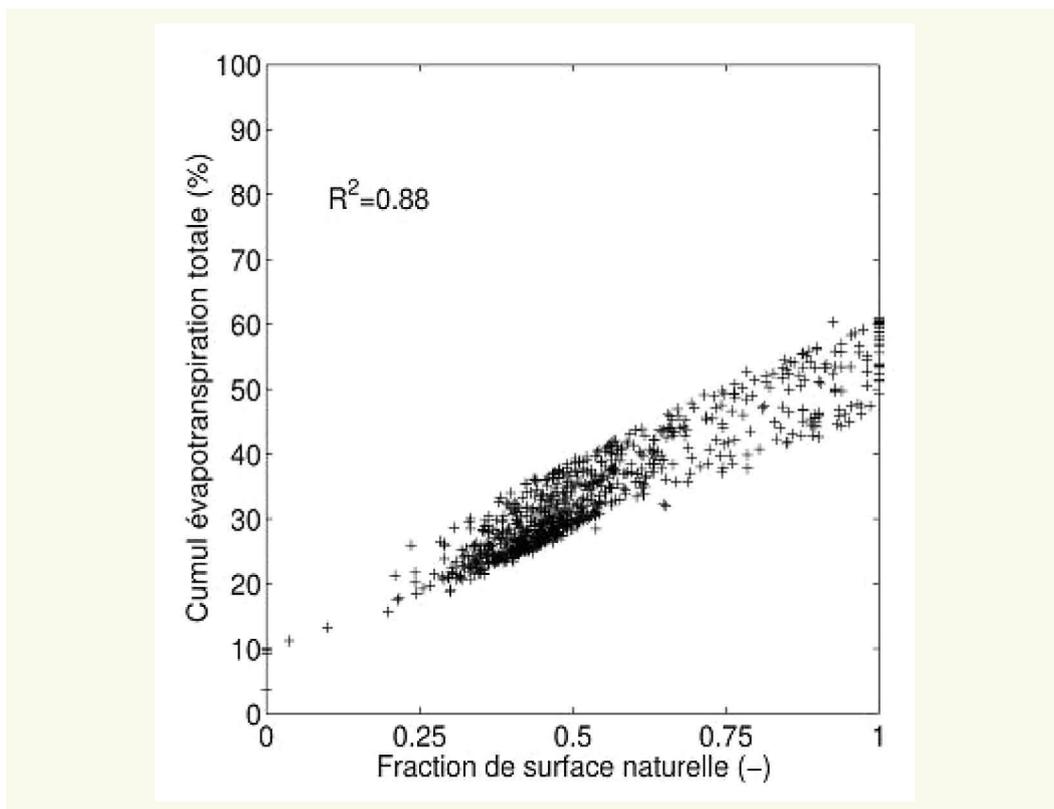
Le comportement hydrologique simulé par le modèle présente des variations spatiales sur ce bassin versant : d'une parcelle à l'autre, et en fonction des caractéristiques de cette parcelle (occupation du sol, présence du réseau...), la répartition des différentes contributions au débit varie de façon significative. Ce résultat est lié à l'hypothèse de simulation indépendante du bilan hydrique sur chaque EHU. A titre d'illustration, l'évapotranspiration totale sur la période de simulation est représentée sur la **figure 12**. En pourcentage de la pluie totale précipitée, l'évapotranspiration varie entre 4 et 61 % pour les différents EHU, avec une valeur moyenne de 34 %. Cette évapotranspiration est plus forte sur les EHU pour lesquels l'imperméabilisation est moindre (**figure 13**), mais il existe une dispersion des valeurs d'évapotranspiration pour un taux de surface naturelle donné, de l'ordre de 10 à 15 %. Cela tend à prouver que la prise en compte des seuls paramètres morphologiques (comme le taux d'occupation du sol pour ce cas précis) n'est pas suffisante pour expliquer la variabilité du comportement hydrologique observé à travers le modèle : l'état hydrique du sol est également un facteur explicatif de cette variabilité.

**figure 12**  
Distribution spatiale du cumul d'évapotranspiration simulé entre janvier 1999 et décembre 2002 sur le bassin Gohards (en pourcentage de la pluie totale). Les parcelles foncées sont caractérisées par des valeurs importantes d'évapotranspiration.

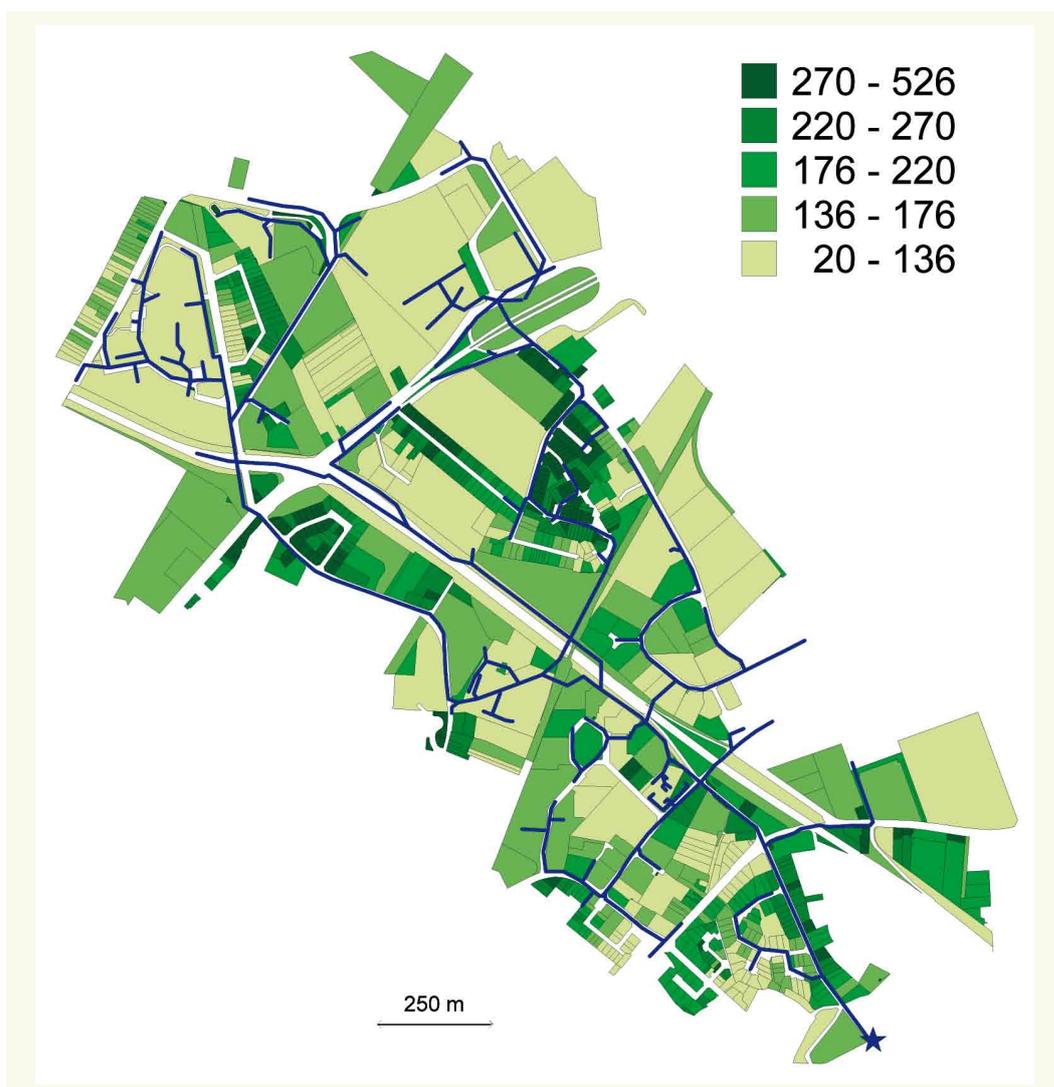


La distribution spatiale de la capacité de stockage du sol peut également être représentée, à partir de la connaissance du niveau de saturation simulé sur tous les EHU. Cette capacité de stockage varie dans le temps et dans l'espace, et la **figure 14** donne une indication de cette capacité de stockage au mois de juillet 2002. Cette figure caractérise les zones du bassin versant où cette capacité de stockage est la plus importante (en vert foncé) et celles où le stockage d'eau pluviale serait difficile (en

**figure 13**  
Lien entre  
l'évapotranspiration  
cumulée et la fraction  
de surface naturelle de  
chaque EHU (bassin  
versant Gohards).



**figure 14**  
Distribution spatiale de  
la capacité de stockage du  
sol (en mm) simulée le 1<sup>er</sup>  
juillet 2002 sur le bassin  
versant Gohards – Le  
réseau d'eau pluviale est  
représenté en bleu.



vert clair) ; le lien entre l'occupation du sol et cette variable est faible, le coefficient de corrélation entre la capacité de stockage des EHU et le coefficient d'imperméabilisation n'est que de 0,17 à cette date. Cela montre que la connaissance de cette variable résulte de la combinaison de plusieurs processus physiques (évapotranspiration, présence d'un réseau de drainage, infiltration...). Ce type d'information présente un intérêt pour l'aide à l'aménagement du milieu urbain et en particulier pour l'introduction de techniques alternatives à l'assainissement pluvial. En effet, le principe de ces techniques est souvent basé sur l'infiltration des eaux pluviales. Or cette infiltration n'est pas toujours réalisable, selon les types de sol rencontrés et la période de l'année. La modélisation de la capacité d'infiltration sur les bassins versants urbains, réalisée conjointement à une simulation de longues chroniques météorologiques, permet de se rendre compte de la pertinence d'un mode d'infiltration des eaux pluviales sur le long terme.

## ■ Application au bassin versant St Joseph

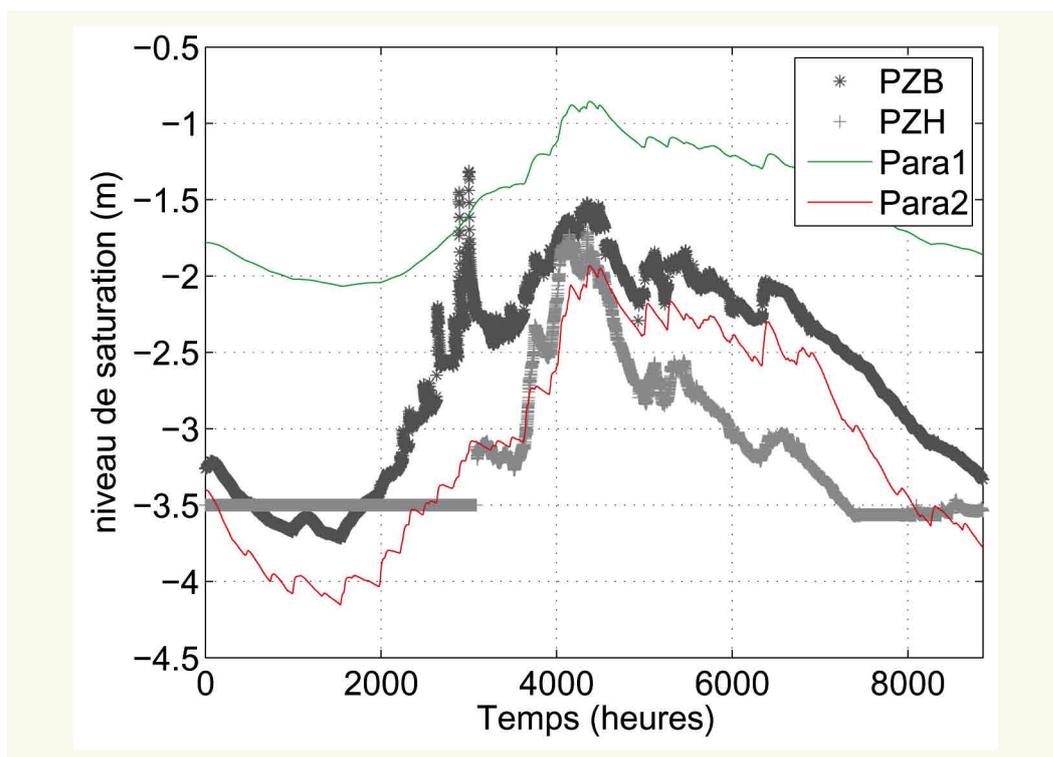
Pour ce bassin, le modèle hydrologique distribué complet a également été mis en œuvre, sur le même principe que le bassin versant Gohards (simulation sur 800 EHU). Les intensités pluvieuses sont considérées homogènes sur le bassin, et correspondent à la valeur du pluviomètre situé sur ce bassin. La simulation a été effectuée avec les données de pluie et de débit en continu entre janvier 2000 et décembre 2004. Les données piézométriques servent à l'évaluation de la simulation de l'état hydrique du sol, et la période de contrôle s'étale entre début août 2003 et fin juillet 2004. L'initialisation du niveau de saturation au début de la simulation a été réalisée en fonction de la valeur observée début janvier 2004 sur les piézomètres de cette zone. Étant donnée la proximité des bassins et de leurs caractéristiques de sol, le jeu de paramètres utilisé pour Gohards a été reconduit pour ce bassin versant, en première approximation. Le jeu de paramètres est le même pour tous les EHU. Les résultats, globalement corrects, sont un peu moins satisfaisants que sur le bassin des Gohards, en particulier en ce qui concerne les coefficients d'écoulement (**tableau 6**). L'observation du niveau de saturation simulé nous indique que l'état hydrique du sol n'est pas bien reproduit pour ce jeu de paramètres : la comparaison effectuée entre le niveau de saturation simulé moyen sur le bassin versant et les deux piézomètres, indique que le modèle surestime largement le niveau de saturation (Para1 sur la **figure 15**). Une première exploration de l'espace des paramètres a été réalisée en faisant varier les paramètres les plus influents mis en évidence par [15] de façon aléatoire, et les jeux de paramètres ont été classés en fonction de leur performance vis-à-vis du critère  $C_{Nash}$  sur les débits instantanés. Pour le jeu de paramètres le plus performant (Para2), les principales différences sont liées à une valeur de coefficient de drainage du sol par le réseau plus faible ( $\lambda = 3$ ), la conductivité hydraulique à saturation restant dans le même ordre de grandeur ( $K_s = 2,2 \text{ e}^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Les résultats sont assez semblables du point de vue de la restitution des débits, les critères de comparaison sont du même ordre que ceux obtenus sur le bassin Gohards (exceptés les critères relatifs au coefficient d'écoulement qui restent médiocres). Mais le niveau de saturation moyen simulé est surtout beaucoup plus en adéquation avec les valeurs observées (**figure 15**). Toutefois, étant donnée la variabilité spatiale des niveaux de saturation simulés par le modèle, des travaux complémentaires devraient être engagés pour affiner cette évaluation. Ce travail d'évaluation du modèle sur le bassin de St Joseph sera poursuivi afin de tester la pertinence du modèle vis à vis de plusieurs variables hydrologiques (volumes ruisselés et niveaux de saturation).

**tableau 6**  
Critères de comparaison pour la simulation des volumes ruisselés  $V$ , des coefficients d'écoulement  $C_e$  et des débits instantanés  $Q$  pour le bassin versant St Joseph.

|       | St Joseph<br>Jeu de paramètres (Para1) |       |            | St Joseph<br>Jeu de paramètres (Para2) |       |            |
|-------|--|-------|------------|--|-------|------------|
|       | $C_b$                                  | $R^2$ | $C_{Nash}$ | $C_b$                                  | $R^2$ | $C_{Nash}$ |
| $V$   | - 5,9 %                                | 0,80  | 0,80       | 0,2 %                                  | 0,82  | 0,81       |
| $C_e$ | 3,6 %                                  | 0,23  | 0,13       | 13,9 %                                 | 0,36  | 0,26       |
| $Q$   | - 6,0 %                                | 0,69  | 0,50       | 0,1 %                                  | 0,71  | 0,48       |

figure 15

Comparaison des niveaux de saturation observés (PZH et PZB) sur le bassin versant St Joseph et des niveaux de saturation simulés avec deux jeux de paramètres, entre août 2003 et juillet 2004. Le piézomètre PZH est limité à -3,5 m en profondeur.



## CONCLUSIONS

Un cadre de modélisation hydrologique distribuée a été élaboré dans le but d'améliorer la description du comportement hydrologique des milieux urbanisés. L'application du modèle URBS à différentes échelles spatiales prouve les possibilités et l'intérêt offerts par ce type de modélisation. Trois études de cas ont servi de support à cette évaluation, permettant l'évaluation du modèle à l'échelle d'un petit bassin versant homogène, représenté par un seul objet élémentaire (Rezé), et à l'échelle de bassins versants de taille moyenne et présentant une hétérogénéité d'occupation de surface (Gohards, St Joseph). D'une part, le modèle permet de simuler des processus hydrologiques généralement négligés dans les approches plus classiques de l'hydrologie urbaine (évapotranspiration, infiltration de l'eau du sol dans les réseaux d'assainissement, variations de l'état hydrique du sol) et l'application de ce modèle montre que ces processus peuvent avoir un rôle non négligeable dans le bilan hydrologique urbain. D'autre part, ce travail atteste également de l'intérêt du caractère spatialisé du modèle hydrologique, à travers la représentation de la distribution spatiale de certaines variables hydrologiques. Ce cadre de modélisation ouvre des perspectives intéressantes en ce qui concerne la modélisation intégrée des zones urbaines, et l'aide à la décision en matière de gestion des eaux pluviales en ville et d'aménagement urbain : il permet en effet de tester l'influence de différents scénarios urbains, et de nouvelles techniques d'assainissement urbain à l'échelle du bassin. Il s'agit maintenant de poursuivre l'évaluation de cette modélisation à travers différentes études de cas, et de valider les paramétrisations adoptées pour certains processus physiques (infiltration de l'eau du sol dans le réseau, flux d'évaporation, état hydrique du sol).

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **BECCIU G., PAOLETTI A.**, Moments of runoff coefficient and peak discharge estimation in urban catchments. *Journal of Hydrologic Engineering*, **5**(2), **2000**.
- 2 **RAMIER D.**, *Bilan hydrique des voiries urbaines - Observations et modélisation*. PhD thesis, Université de Nantes - École Centrale de Nantes, **2005**.
- 3 **RODRIGUEZ F.**, *Intérêt des banques de données urbaines pour l'hydrologie. Détermination des fonctions de transfert de bassins versants urbains*. Thèse INPG, Grenoble, **1999**.
- 4 **BERTHIER E., ANDRIEU H., CREUTIN J.D.**, The role of soil in the generation of urban runoff : development and evaluation of a 2D model. *Journal of Hydrology*, **299** (3-4), 252-266, **2004**.
- 5 **GRIMMOND C.S.B., OKE T.R.**, An evapotranspiration-interception model for urban areas. *Water Resources Research*, **27**(7), 1739-1755, **1991**.
- 6 **BERTHIER E., DUPONT S., MESTAYER P.G., ANDRIEU H.**, Comparison of two evapotranspiration schemes on a sub-urban site. *Journal of Hydrology*, **328**(3-4), 635-646, **2006**.
- 7 **JIA Y., NI G., KAWAHARA Y., SUETSUGI T.**, Development of WEP model and its application to an urban watershed. *Hydrological Processes*, **15**, 2175-2194, **2001**.
- 8 **RODRIGUEZ F., ANDRIEU H., CREUTIN J.D.**, Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks. *Journal of Hydrology*, **283**(1-4), 146-168, **2003**.
- 9 **RODRIGUEZ-ITURBE I., VALDES J.**, The geomorphologic structure of Hydrologic Response. *Water Resources Research*, **15**(6), 1409-1420, **1979**.
- 10 **GUPTA V., WAYMIRE E., WANG C.**, A representation of an Instantaneous Unit Hydrograph From Geomorphology. *Water Resources Research*, **16**(5), 855-862, **1980**.
- 11 **BELHADJ N.**, *Variations par temps de pluie des débits dans les réseaux d'eaux usées de type séparatif : identification des composantes et modélisation des infiltrations*. Thèse, École Nationale des Ponts et Chaussées, **1994**.
- 12 **RODRIGUEZ F., ANDRIEU H., ZECH Y.**, Evaluation of a distributed model for urban catchments using a 7 years continuous data series. *Hydrological Processes*, **14**(5), 899-914, **2000**.
- 13 **CLAPP R., HORNBERGER G.**, Empirical equations for some soil Hydraulic Properties. *Water Resources Research*, **14**(4), 601-604, **1978**.
- 14 **CASSAN M.**, *Aide-mémoire d'hydraulique souterraine*. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, **1986**.
- 15 **MORENA F.**, *Modélisation hydrologique distribuée en milieu urbanisé. Représentation des processus de production et développement du modèle URBS*. PhD thesis, INPG, Grenoble, **2004**.
- 16 **CUNGE J.A.**, On the subject of a flood propagation computation method. *Journal of Hydraulic Research*, **7**(2), 205-230, **1969**.
- 17 **MONTALDO N., MANCINI M., ROSSO R.**, Flood hydrograph attenuation induced by a reservoir system: analysis with a distributed rainfall-runoff model. *Hydrological Processes*, **18**(3), 545-563, **2004**.
- 18 **BERTHIER E.**, *Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain : élaboration du modèle et première évaluation*. Thèse, INPG, Grenoble, **1999**.
- 19 **LEMONSU A., MASSON V., BERTHIER E.**, Improvement of the hydrological component of an urban soil-vegetation-atmosphere-transfer model. *Hydrological Processes*, **21**(16), 2100-2111, **2007**.
- 20 **RUBAN V., LARRARTE F., BERTHIER E., FAVREAU L., SAUVOUREL Y., LETELLIER L., MOSINI M.-L., RAIMBAULT G.**, Quantitative and qualitative hydrologic balance for a suburban watershed with a separate sewer system (Nantes, France). *Water Science & Technology*, **21**(2), 231-238, **2005**.
- 21 **BERTHIER E., RODRIGUEZ F., ANDRIEU H.**, The Rezé urban catchments database. *Water Resources Research*, **35**(6), 1915-1919, **1999**.
- 22 **HOLLIS G.E., OVENDEN J.C.**, One year irrigation experiment to assess losses and runoff volume relationships for a residential road in Hertfordshire, England. *Hydrological processes*, **2**, 61-74, **1988**.
- 23 **CHOCAT B.**, *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*. Eurydice '92. Techniques et Documentation, Lavoisier, Paris, **1997**.
- 24 **RODRIGUEZ F., MORENA F., ANDRIEU H.**, A distributed hydrological model for urbanized areas. Model development and application to urban catchments. *Journal of Hydrology*, **351**(3-4), 268-287, **2008**.
- 25 **BOYD M.J., BUFILL M. C., KNEE R.M.**, Pervious and impervious runoff in urban catchments. *Hydrological Sciences*, **38**(6), 463-478, **1993**.

