

Formation des débits dans les réseaux urbains d'évacuation des eaux pluviales

Le rôle du sol

RÉSUMÉ

Un modèle détaillé est développé afin d'étudier le rôle du sol dans la formation des débits dans les réseaux urbains d'évacuation des eaux pluviales. Le modèle s'appuie sur un élément bidimensionnel représentant une coupe du milieu urbain. L'hétérogénéité du sol est prise en compte explicitement et les écoulements d'eau dans le sol sont résolus à l'aide du code de calcul par éléments finis CÉSAR-LCPC. La représentativité du modèle appliqué à un petit bassin versant périurbain apparaît satisfaisante. Lors d'un événement pluvieux, le sol influence le volume écoulé à l'exutoire du bassin versant par l'intermédiaire de deux composantes du débit : le drainage d'eau du sol par le réseau et le ruissellement sur les surfaces « naturelles ». Cette influence est variable d'un événement pluvieux à l'autre, représente en moyenne 11 % du volume écoulé, et permet de mieux comprendre la variabilité du coefficient d'écoulement observée sur le bassin versant.

MOTS CLÉS : 43 - Sol - Débit (écoulement) - Eau - Pluie - Zone urbaine - Évacuation des eaux - Ruissellement - Bassin versant.

Emmanuel BERTHIER

Ingénieur des Travaux publics de l'État

Hervé ANDRIEU

Ingénieur divisionnaire des Travaux publics de l'État
Chef de la section Hydrologie en milieu urbain

Marc FASQUEL

Technicien supérieur en chef de l'Équipement

Section Hydrologie en milieu urbain

Division Eau

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Centre de Nantes

Jean-Dominique CREUTIN

Directeur de recherche du CNRS

Directeur adjoint

Laboratoire des Transferts en hydrologie et environnement

Introduction

Le développement urbain : construction de bâtiments, extension de la voirie provoque une imperméabilisation du sol qui modifie les conditions d'écoulement des eaux pluviales en favorisant leur ruissellement à la surface au détriment de leur infiltration dans le sol. Jusqu'à ces dernières décennies, l'évacuation rapide de ces eaux de ruissellement vers l'exutoire des bassins versants était favorisée de façon systématique. Cette solution implique un renforcement ou le remplacement du réseau hydrographique naturel par un réseau artificiel et souterrain de collecte et d'évacuation des eaux pluviales qui, par les gouttières, les caniveaux et les collecteurs, relie chaque surface contributive à l'exutoire du bassin versant. La priorité des hydrologues du milieu urbain a tout d'abord été de dimensionner ces réseaux d'évacuation des eaux pluviales afin de minimiser le risque d'inondation. Ils ont donc développé des modèles capables de simuler la réaction des bassins versants urbains à des pluies intenses. Les logiciels actuels (par exemple, Huber et Dickinson, 1988 et Insavalor et Sogreah, 1997 en France) répondent bien à ce besoin. Les préoccupations environnementales plus récentes ont amené une prise de conscience de la pollution véhiculée par le ruissellement pluvial et donc rejetée

directement dans le milieu naturel. Cette pollution apparaît dès qu'un ruissellement se forme, donc lors d'événements pluvieux courants. L'intérêt des hydrologues s'est donc porté sur l'étude du comportement des bassins versants urbains lors de ces pluies courantes. Les données disponibles au sein du réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées (Baladès et al., 1991 ; Andrieu et al., 1996 ; Berthier et al., 1998) ou ailleurs (Maksimovic et Radojkovic, 1986 ; Becciu et Paoletti, 1997) montrent assez clairement que ce comportement n'est pas aussi simple qu'on pourrait le penser. L'étude du coefficient d'écoulement, défini pour un événement pluvieux comme le rapport entre le volume écoulé à l'exutoire et le volume précipité sur le bassin versant, illustre ce constat. Différentes études (Bouzinba et al., 1991 ; Andrieu et al., 1993 ; Bareyre, 1995) montrent que le coefficient d'écoulement d'un même bassin versant varie de façon significative d'un événement pluvieux à l'autre. La moyenne du coefficient d'écoulement est généralement inférieure au coefficient d'imperméabilisation du bassin et le coefficient de variation de la distribution se situe entre 30 et 50 %. Les modèles hydrologiques actuellement utilisés ne sont pas capables de reproduire correctement cette variabilité des coefficients d'écoulement (Rodriguez et al., 2000). Ces modèles, adaptés aux pluies intenses, supposent que le débit se forme uniquement sur les surfaces imperméabilisées et qu'une fois satisfaites des pertes initiales de quelques millimètres, le rendement des surfaces imperméabilisées est de 100 %.

Les modèles actuels privilégient donc le rôle des surfaces imperméabilisées et ne prennent pas du tout en compte l'influence du sol dans la formation des débits. Plusieurs constats expérimentaux invitent à reconsidérer cette hypothèse. Le proche sous-sol urbain est le siège de nombreux aménagements : réseaux et leur tranchées de pose, structures de voirie, fondations de bâtiments, etc. qui influencent vraisemblablement les conditions d'écoulement de l'eau dans le sol. Joannis et al. (1993) montrent, par exemple, que les réseaux d'évacuation des eaux usées et pluviales peuvent drainer le sol par l'intermédiaire de défauts d'étanchéité, et que le débit associé peut être significatif en rapport au débit total. Des surfaces non imperméabilisées peuvent aussi contribuer au débit (Desbordes, 1987 ; Pitt et al., 1998). C'est le cas de surfaces naturelles comme les parcs ou les pelouses : lorsque le sol est saturé, ces surfaces sont susceptibles de donner lieu à du ruissellement et de contribuer directement à la formation du débit. Le sol joue un rôle central dans ce mécanisme car le refus d'infiltration sur les surfaces

naturelles est dépendant de ses caractéristiques et de son état hydrique. La prise en compte du rôle du sol au sein d'un modèle nécessite cependant une bonne connaissance de ses caractéristiques. De plus en plus de collectivités se dotent de banques de données urbaines et de systèmes d'information géographiques. Ces banques de données fournissent des informations détaillées sur l'occupation de la surface et du sol urbain. Les études hydrologiques ont déjà commencé à tirer parti de ces informations (Rodriguez, 1999).

L'objectif du travail présenté ici est donc d'étudier le rôle du sol dans la formation des débits dans les réseaux urbains d'évacuation des eaux pluviales. Il s'agit d'abord de développer un modèle qui prend en compte explicitement le sol urbain et ses caractéristiques. Le modèle est ensuite appliqué à un petit bassin versant expérimental de façon à évaluer son fonctionnement et son intérêt. La représentativité du modèle est, dans un premier temps, évaluée en comparant différentes variables hydrologiques simulées et observées. Une attention particulière est ensuite portée au coefficient d'écoulement. On cherchera à vérifier si la prise en compte du sol urbain permet de mieux comprendre les variations observées de ce paramètre. Le dernier paragraphe fournit l'occasion de tirer des conclusions de cette étude et de dresser quelques perspectives.

Présentation du modèle et de son application

Le modèle développé pour étudier l'influence du sol sur le comportement hydrologique des bassins versants urbains s'appuie sur une schématisation du tissu urbain : l'élément hydrologique urbain. Après avoir présenté cet élément, on décrit le principe de modélisation des différents processus physiques susceptibles de participer à la formation du débit. Le modèle est ensuite appliqué à un petit bassin versant périurbain.

L'élément hydrologique urbain

Le sol urbain se caractérise par une forte hétérogénéité. Des surfaces « imperméabilisées », comme les voiries ou les bâtiments, coexistent avec des surfaces naturelles comme les parcs ou les pelouses. Le proche sous-sol est fortement hétérogène du fait des nombreux aménagements qu'il abrite et des remaniements qu'il subit : réseaux d'évacuation et d'alimentation en eau et leur tranchées de pose, structures de voirie, fondations de bâtiment, etc. Cette hétérogénéité générale du sol

urbain influence les écoulements d'eau. Les tranchées des réseaux, constituées de matériaux, sols remaniés, sables, graviers, de perméabilité supérieure à celle du terrain en place, sont le lieu d'écoulements rapides. Cette hétérogénéité doit être représentée de façon détaillée dans le modèle. Une des difficultés est d'adopter une échelle spatiale d'étude adaptée à cette représentation tout en restant représentative du bassin versant. L'échelle du bassin versant (quelques dizaines ou centaines d'hectares) est trop grande. Le modèle développé s'appuie donc sur la schématisation du profil en travers d'un bassin versant qui représente également la zone d'influence du collecteur d'évacuation des eaux pluviales. Cette représentation schématique appelée par la suite élément hydrologique urbain (EHU) est illustrée par la figure 1 : c'est une vue en coupe de l'association d'une parcelle urbaine et de la voirie adjacente. L'EHU est composé de quatre constituants : voirie, bâtiment, sol et réseau d'évacuation des eaux pluviales avec sa tranchée de pose. L'adaptation de l'importance respective et de la position de chacun des constituants permet de représenter une grande variété de types d'habitats. Un bassin versant urbain peut être décrit comme un ensemble d'EHUs reliés à l'exutoire par le réseau d'évacuation des eaux pluviales. Le comportement hydrologique du bassin versant résulte alors de la combinaison du comportement de chacun des éléments.

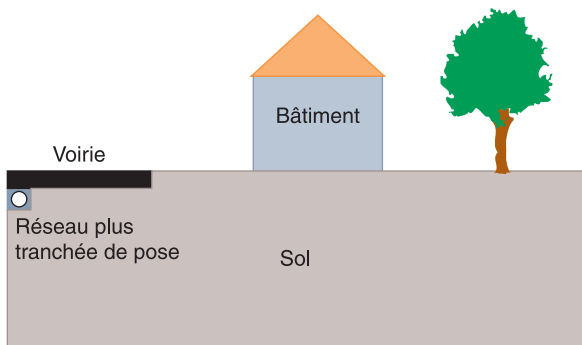


Fig. 1 - L'élément hydrologique urbain sur lequel s'appuie la modélisation.

Sur le plan hydrologique, un EHU est le siège de différents processus physiques qu'il s'agit de simuler de façon détaillée afin de reproduire la transformation de la pluie en débit dans le réseau d'évacuation des eaux pluviales. L'originalité de cette étude tient au fait que le principe de modélisation retenu met l'accent sur le rôle du sol.

Le sol d'un EHU est considéré comme un milieu poreux, et les écoulements d'eau en son sein sont décrits par l'équation de Richards (1931) :

$$C \cdot \frac{\partial H}{\partial t} = \text{div}(K \cdot \text{grad}(H)) \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1)$$

où

- t est le temps,
- H est la charge hydraulique de l'eau dans le sol somme de h la charge de pression de l'eau dans le sol et de z la charge gravitationnelle,
- C est le coefficient d'emmagasinement de l'eau dans le sol,
- et K est la conductivité hydraulique du sol.

L'équation de l'écoulement (Eq. 1) est résolue à l'aide du module NSAT du code de calcul par éléments finis CÉSAR-LCPC (Humbert, 1984 ; Piau, 1991). Les simulations sont effectuées en continu et sur des périodes de l'ordre de l'année. Le pas de temps de simulation est de l'ordre de l'heure, compatible avec la dynamique des écoulements de l'eau dans le sol.

Les processus physiques simulés dans un élément hydrologique urbain

Différents processus physiques intervenant dans la formation du débit sont simulés dans un EHU (fig. 2). La simulation de ces processus se traduit généralement par une condition numérique appropriée aux limites de l'élément. Trois composantes du débit sont représentées :

- i) le ruissellement sur les surfaces imperméabilisées (voirie et bâtiment),
- ii) le ruissellement sur les surfaces naturelles,
- iii) le drainage d'eau du sol par le réseau.

Il est à noter que les deux dernières composantes dépendent directement du comportement du sol et qu'elles ont jusqu'à présent été peu prises en compte dans les modèles hydrologiques du milieu urbain.

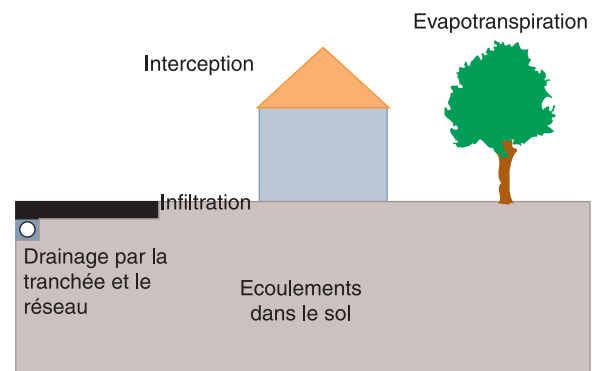


Fig. 2 - Les processus physiques représentés dans un élément hydrologique urbain.

La formation du ruissellement sur les surfaces d'un EHU est dépendante de différents processus, dont en premier lieu le processus d'interception.

L'interception

L'interception est un stockage temporaire d'eau sur les surfaces d'un élément, cette eau étant ultérieurement infiltrée ou évaporée. Dans le modèle, le stockage de la pluie a lieu sur chacune des surfaces et il est représenté par un réservoir dont la capacité dépend du type de surface. Trois types de surface sont distingués : voirie, bâtiment et surface naturelle. Durant chaque pas de temps de la simulation et pour chaque surface, un bilan en eau est calculé :

$$\frac{dW_s(t)}{dt} = P(t) - ETP(t) - I_s(t) - \frac{Q_s(t)}{Lg_s} \quad [\text{mm.h}^{-1}] \quad (2)$$

où

- > t est le temps,
- > W_s est la hauteur d'eau stockée sur la surface s,
- > P est l'intensité de pluie entrée du modèle,
- > ETP est l'évapotranspiration potentielle entrée du modèle,
- > I_s est l'infiltration au travers de la surface s,
- > Q_s est le débit dû au ruissellement sur la surface s,
- > et Lg_s est la longueur de la surface s.

Le calcul de ce bilan s'effectue en différentes étapes au cours d'un pas de temps (Berthier, 1999). Il permet de connaître, à la fin de chaque pas de temps et sur chaque surface, la hauteur d'eau stockée et le débit dû au ruissellement.

L'infiltration et l'évapotranspiration

L'infiltration au travers d'une surface d'un EHU se produit lorsque de l'eau est stockée sur cette surface. Dans le cas contraire, c'est le processus d'évapotranspiration au travers de la surface qui a lieu. L'infiltration et l'évapotranspiration sont nulles au travers d'un bâtiment. Il en est de même pour l'évapotranspiration au travers d'une voirie (Asaeda et Ca, 1993). Des infiltrations significatives au travers de voiries urbaines ont été mises en évidence lors de suivis expérimentaux (Raimbault, 1996). Ces infiltrations dépendent (Van Ganse, 1978) de la durée des pluies et de la conductivité hydraulique de l'enrobé. Dans un EHU, l'infiltration au travers d'une voirie a été considérée comme égale au minimum entre la quantité

d'eau stockée en surface divisée par le pas de temps et la conductivité hydraulique à saturation de l'enrobé de la voirie $K_{S \text{ voirie}}$.

Sur les surfaces naturelles d'un EHU, les processus d'infiltration et d'évapotranspiration sont soumis au double contrôle de l'atmosphère et du sol (Hillel, 1988). Le flux infiltré est, par exemple :

- > soit équivalent à la hauteur d'eau stockée en surface ; il dépend alors uniquement de l'alimentation en eau de la surface (contrôle de l'atmosphère) ;
- > soit inférieur à la hauteur d'eau stockée en surface, il dépend alors uniquement de la capacité d'infiltration du sol et la surface est saturée (contrôle du sol).

De même, le flux d'évapotranspiration est soit équivalent à l'évapotranspiration potentielle calculée à partir de variables météorologiques (contrôle de l'atmosphère), soit inférieure à cette évapotranspiration potentielle (contrôle du sol). Une condition aux limites appropriée (Berthier, 1999) permet de tenir compte de ces doubles contrôles. Il est alors possible, à chaque pas de temps et au travers de chaque surface naturelle d'un élément, de simuler de façon détaillée la quantité de pluie qui s'infiltré et la quantité d'eau du sol qui est évapotranspirée.

Le drainage par le réseau et sa tranchée de pose

En milieu urbain, les réseaux d'évacuation des eaux peuvent drainer le sol par l'intermédiaire de défauts d'étanchéité (Breil *et al.*, 1993 ; Joannis *et al.*, 1993 ; Dupasquier, 1999). Le processus dépend simultanément de conditions hydrologiques, comme le niveau de saturation du sol ou la pluie, et de caractéristiques du réseau, comme sa profondeur ou la distribution de ses défauts. Ce débit de drainage possède une double composante :

- > i) des variations lentes durant toute la période hivernale lorsque le niveau de saturation du sol atteint le niveau du réseau,
- > ii) des réponses rapides à la pluie qui se superposent aux variations lentes lors de périodes hivernales particulièrement pluvieuses.

Dans l'EHU, il est admis que l'ensemble constitué par le réseau et sa tranchée de pose se comporte comme un drain à l'intérieur duquel la charge de pression est nulle. Lorsque le sol environnant est non saturé, il n'existe pas d'échanges d'eau entre le sol et l'ensemble. La représentation numérique de ce comportement fait appel à une condition aux limites dite de suintement (Humbert, 1984 ; Piau,

1991). Elle permet à chaque pas de temps de calculer le débit dû au drainage d'eau du sol par le réseau.

Les écoulements dans le sol

Pour représenter les écoulements d'eau dans le sol d'un EHU, on distingue le proche sous-sol et le sol plus profond. Le proche sous-sol urbain est le lieu d'écoulements rapides du fait des nombreux aménagements qu'il abrite. Afin de rendre compte de ces écoulements rapides, le sol d'un EHU est constitué de deux couches de caractéristiques hydrodynamiques différentes. La couche supérieure s'étend sur toute la largeur de l'élément, son épaisseur T_{sup} étant de l'ordre du mètre. Cette couche supérieure se caractérise par une conductivité hydraulique K_{sup} plus élevée que celle de la couche inférieure K_{inf} .

Les écoulements à plusieurs mètres de profondeur ne sont pas simulés de façon détaillée dans un EHU. Les écoulements profonds sont en effet étudiés à l'échelle du bassin versant, voire à l'échelle régionale (Anderson et Woessner, 1992). Ce constat ne remet pas en cause le travail réalisé. Les écoulements profonds n'interfèrent pas directement avec la formation des débits dans les réseaux. Ils doivent seulement être bien paramétrés afin de garantir la représentativité des écoulements dans le proche sous-sol. Dans le modèle, les écoulements profonds dépendent des conditions aux limites latérales et de fond. Si les amplitudes saisonnières moyennes du niveau de saturation du sol sont connues, les conditions les plus satisfaisantes (Feddes *et al.*, 1988) sont :

- i) au fond, une condition qui impose les amplitudes observées du niveau de saturation du sol,
- ii) latéralement, deux conditions qui traduisent une absence d'échange d'eau.

Application du modèle à un petit bassin versant périurbain

Le site expérimental de Rezé

Un petit bassin versant périurbain équipé d'un réseau d'évacuation des eaux pluviales est suivi en continu depuis 1991 à Rezé (France) (Berthier *et al.*, 1998). Les caractéristiques du bassin versant sont bien connues : sa surface S est de 47 000 m², l'habitat est de type pavillonnaire individuel, la pente moyenne du bassin versant et du réseau d'évacuation des eaux est de 1 %, la part des surfaces imperméabilisées raccordées au réseau est de 37 %, le sol est limoneux et son

niveau de saturation varie de façon saisonnière entre - 0,50 m en hiver et - 1,75 m en été (le niveau de référence étant la surface du sol). Les données acquises comprennent la pluie et le débit à l'exutoire du réseau, mais aussi depuis 1995 des informations sur les écoulements d'eau dans le sol. Trois tensiomètres, situés à des profondeurs de - 0,5 m, - 1 m, et - 1,5 m, permettent de suivre les écoulements verticaux sous une surface naturelle. Trois piézomètres situés à différents endroits du bassin fournissent le niveau de saturation du sol. Une estimation du débit dû au drainage d'eau du sol par le réseau d'évacuation des eaux pluviales est aussi disponible durant trois périodes hivernales (de novembre 1993 à mars 1994, de septembre 1994 à mars 1995, et de octobre 1996 à février 1997) (Berthier, 1999). Les données d'évapotranspiration potentielle sont fournies par une station météorologique de Météo-France située à 5 km du site (Choisnel, 1988).

La paramétrisation du modèle

Sur le bassin versant de Rezé, les simulations effectuées représentent huit années au pas de temps horaire (du 1^{er} janvier 1991 au 31 décembre 1998). Du fait d'une occupation de surface très homogène (Berthier *et al.*, 1998), le bassin versant est représenté par un unique EHU dont la géométrie est équivalente à celle des parcelles du bassin versant (fig 3). Le maillage de l'élément est constitué de 3 450 nœuds (fig. 3) : il est affiné aux endroits où une prise en compte précise des flux est requise, soit à l'interface sol-atmosphère et autour de l'ensemble réseau plus tranchée de pose. Les valeurs des principaux paramètres du modèle sont regroupées dans le tableau I. Pour les paramètres caractéristiques des surfaces imperméabilisées et naturelles, les valeurs choisies sont tirées de la littérature. L'épaisseur de la couche supérieure du sol est fixée à 0,50 m, ce qui correspond, sur le bassin versant, à la profondeur de remaniement du sol ainsi qu'à la profondeur moyenne des structures des voiries. Les caractéristiques hydrodynamiques des couches de sol, supérieure et inférieure, sont prises égales à celles de deux échantillons de sol prélevés sur le bassin versant à des profondeurs respectives de - 0,2 m et - 1,2 m. La conductivité hydraulique de la couche supérieure est multipliée par un coefficient afin de représenter les écoulements rapides dans le proche sous-sol. La condition à la limite au fond du schéma reproduit les fluctuations moyennes du niveau de saturation du sol observées sur le bassin versant. Ces fluctuations sont au cours d'une année suppo-

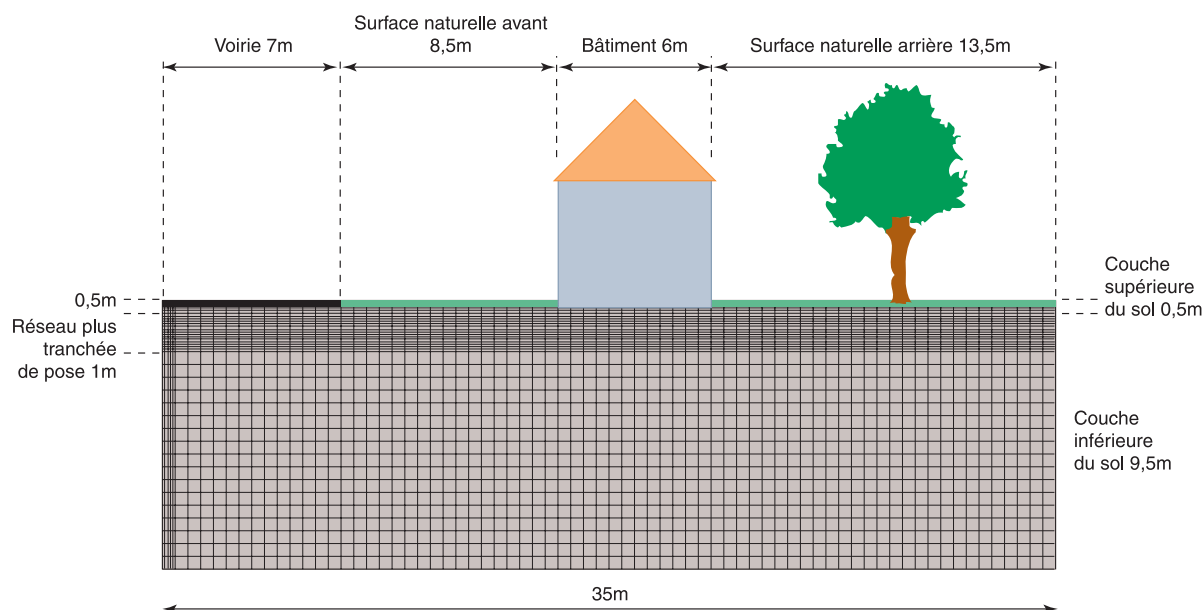


Fig. 3 - Géométrie et maillage de l'élément hydrologique urbain représentatif du bassin versant de Rezé.

TABLEAU I
Valeurs des principaux paramètres du modèle sur le bassin versant de Rezé

Paramètre	Valeur
Surfaces imperméabilisées	
capacité de stockage sur le bâtiment (mm)	0.5 ⁽¹⁾
capacité de stockage sur la voirie (mm)	3.5 ⁽¹⁾
conductivité hydraulique à saturation de l'enrobé de la voirie ($K_{S\text{ voi}}$ en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$7.5 \cdot 10^{-8}$ ⁽²⁾
Surfaces naturelles	
capacité de stockage sur les surfaces naturelles (mm)	5.0 ⁽³⁾
Hydrodynamique du sol	
épaisseur de la couche supérieure du sol (T_{sup} en m)	0.5
conductivité hydraulique de la couche supérieure du sol ($K_{\text{sup}}(h)$ en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$F^*(h, K_C \times 1.32 \cdot 10^{-7}, 129.27, 6.25)$
coefficient multiplicatif pour la conductivité de la couche supérieure du sol (K_C sans dimension)	1 000. ⁽⁴⁾
coefficient d'emmagasinement de la couche supérieure du sol ($C_{\text{sup}}(h)$ en m^{-1})	$\frac{\partial F^*(h, 41.51, 7.60, 1.10)}{\partial h}$
conductivité hydraulique de la couche inférieure du sol ($K_{\text{inf}}(h)$ en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$F^*(h, 3.42 \cdot 10^{-7}, 0.04, 2.42)$
coefficient d'emmagasinement de la couche inférieure du sol ($C_{\text{inf}}(h)$ en m^{-1})	$\frac{\partial F^*(h, 44.49, 3.36, 0.61)}{\partial h}$
* La fonction F est de la forme $F(h, a_s, a_1, a_2) = a_s \cdot \frac{a_1}{a_1 + h ^{a_2}}$	
Origine des valeurs : (1) : Hollis et Ovensen (1988), (2) : Hassan et White (1997), (3) : Grimmond et Oke (1991), (4) : Taha et al. (1997).	

sées sinusoïdales, avec un maximum le 31 décembre et un minimum le 30 juin. La condition initiale de la simulation correspond à l'état final d'un calcul préalable effectué sur les quatre derniers mois de 1990.

La représentativité du modèle

Le débit dans le réseau d'évacuation des eaux pluviales ne constitue que l'une des variables simulées par le modèle qui reproduit également l'évo-

lution d'autres grandeurs hydrologiques telles que la charge hydraulique de l'eau dans le sol. Afin d'étudier la représentativité des différentes variables simulées, elles sont dans ce paragraphe analysées et comparées à des données observées.

En ce qui concerne le débit, la comparaison des débits observé et simulé est effectuée à l'exutoire du bassin versant. Les débits simulés à l'échelle de l'EHU doivent être transformés pour être exprimés à l'exutoire du bassin versant :

$$Q_{sim}(t) = (Q_{bat}(t) + Q_{voi}(t) + Q_{nat}(t)) \frac{S}{L_{EHU}} + Q_{res}(t) \cdot L_{res} \quad [m^3 \cdot h^{-1}] \quad (3)$$

où

- > Q_{sim} est le débit simulé par l'EHU à l'exutoire du bassin versant,
- > Q_{bat} est le débit dû au ruissellement sur le bâtiment de l'EHU,
- > Q_{voi} est le débit dû au ruissellement sur la voirie de l'EHU,
- > Q_{nat} est le débit dû au ruissellement sur les deux surfaces naturelles de l'EHU,
- > L_{EHU} est la longueur de l'EHU,
- > Q_{res} est le débit dû au drainage d'eau du sol par le réseau de l'EHU,
- > et L_{res} est la longueur du réseau d'évacuation des eaux pluviales sur le bassin versant.

Cette façon d'exprimer le débit simulé à l'exutoire du bassin versant néglige le temps de transfert des débits : les débits simulés durant un pas de temps avec l'EHU sont supposés rejoindre l'exutoire du bassin versant au cours de ce pas de temps. Cette hypothèse est réaliste tant que le pas de temps de simulation est supérieur au temps de transfert dans le réseau du bassin versant, estimé à une dizaine de minutes (Rodriguez *et al.*, 1996).

La charge hydraulique de l'eau dans le sol

La charge hydraulique de l'eau dans le sol est le résultat de la résolution de l'équation des écoulements (Eq. 1). La figure 4 représente les variations des charges hydrauliques observée et simulée dans le sol durant une période de deux années. Les mesures de charge hydraulique sont réalisées par l'intermédiaire de tensiomètres. Les charges hydrauliques simulées sont prises au milieu de la surface naturelle avant de l'EHU (surface entre la voirie et le bâtiment). Les charges hydrauliques observée et simulée cofiluctent plutôt bien même si les amplitudes de variations ne sont pas toujours équivalentes. À -0,5 m, la charge simulée est proche de la charge observée. À -1 m, la charge

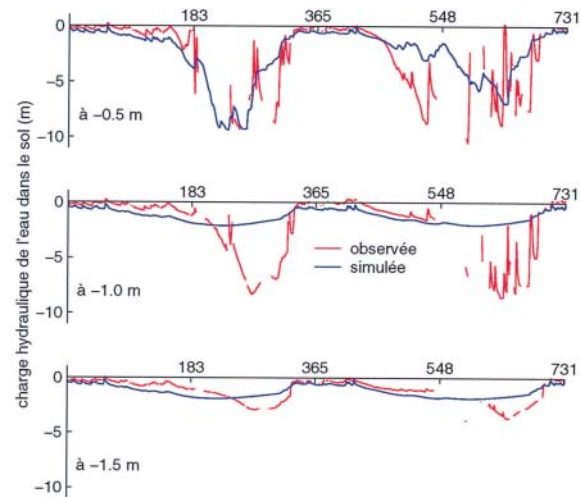


Fig. 4 - Variations des charges hydrauliques observée et simulée dans le sol du bassin versant de Rezé (données au pas de temps journalier du 1^{er} janvier 1996 au 31 décembre 1997).

simulée varie de façon moindre que la charge observée. À -1,5 m, les variations des charges observée et simulée sont faibles et équivalentes. La répartition de la charge hydraulique dans le sol de l'élément permet de calculer les écoulements d'eau en son sein. La figure 5 représente ces écoulements le 25 février 1996 à 18 heures, soit lors d'une période hivernale particulièrement pluvieuse. L'infiltration de l'eau est visible, à la surface comme dans le sol profond. Des écoulements latéraux apparaissent, principalement dans le proche sous-sol et au voisinage des surfaces imperméabilisées. Le rôle important du drainage par le réseau apparaît aussi clairement.

Le débit dû au drainage d'eau du sol par le réseau

Le débit dû au drainage d'eau du sol par le réseau d'évacuation des eaux pluviales a fait l'objet d'une attention expérimentale particulière. La figure 6 représente ces débits observé et simulé durant une période hivernale.

La dynamique du drainage est plutôt bien reproduite par le modèle. Le débit simulé est un peu supérieur au débit observé lors des forts débits et un peu inférieur lors des faibles débits.

Le processus de drainage par le réseau peut aussi être étudié plus finement. La figure 7 représente le lien entre le débit dû au drainage par le réseau et le niveau de saturation du sol sur le bassin versant, ceci pour les données observées et simulées. Le niveau de saturation du sol observé est la moyenne des mesures piézométriques. Le niveau de saturation du sol simulé est la moyenne des niveaux pris sous les quatre surfaces de l'EHU. La comparai-

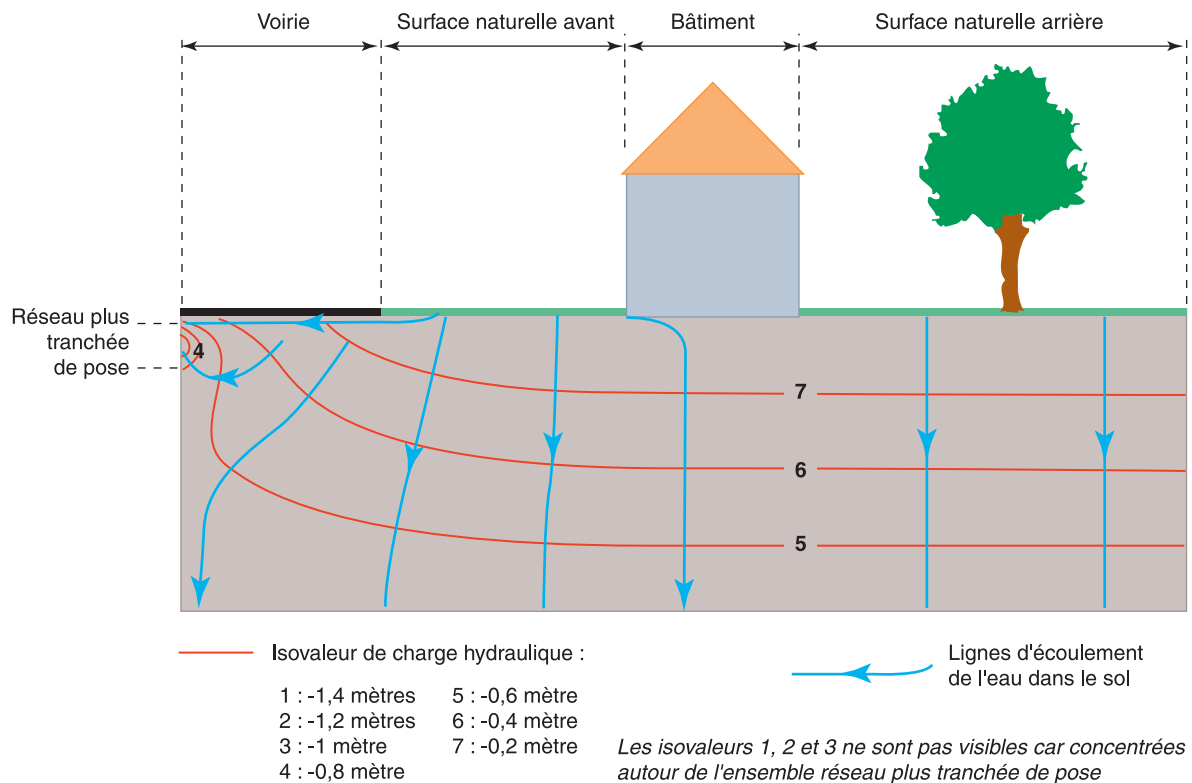


Fig. 5 - Écoulements d'eau simulés dans le sol du bassin versant de Rezé (à 18 heures le 25 février 1996).

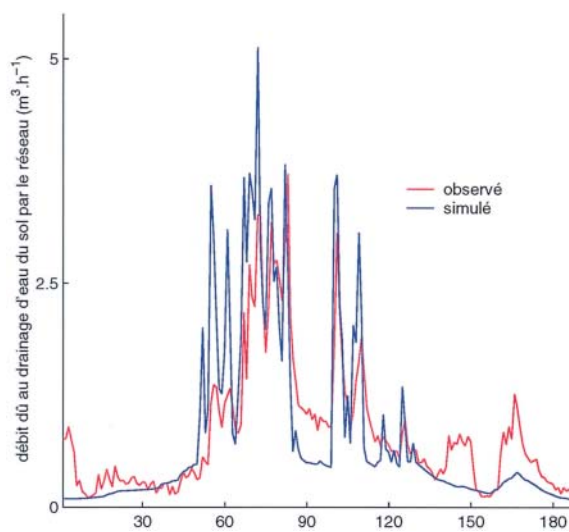


Fig. 6 - Débits observé et simulé dus au drainage d'eau du sol par le réseau sur le bassin versant de Rezé (données au pas de temps journalier du 26 octobre 1993 au 1^{er} mai 1994).

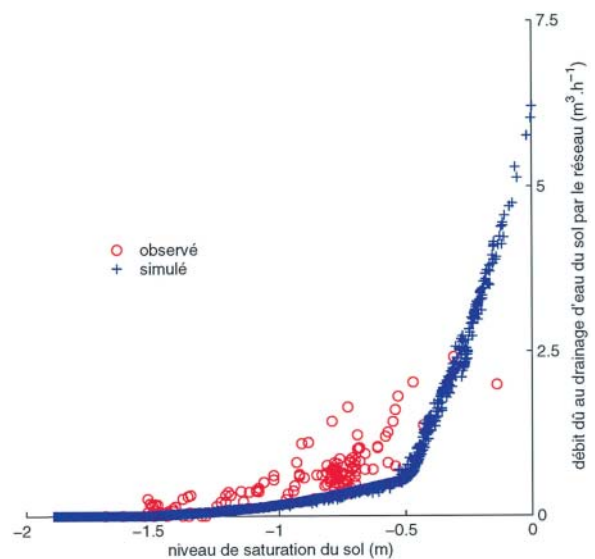


Fig. 7 - Liens observé et simulé entre le débit dû au drainage d'eau du sol par le réseau et le niveau de saturation du sol sur le bassin versant de Rezé (données au pas de temps journalier du 1^{er} janvier 1991 au 31 décembre 1998).

son des données observées et simulées appelle un double constat :

➤ i) il existe un niveau de saturation du sol au-dessus duquel le drainage apparaît, ce niveau est estimé à $-1,5$ m correspondant à la profondeur maximale du réseau sur le bassin versant,

➤ ii) le débit dû au drainage du sol par le réseau augmente avec le niveau de saturation du sol suivant une relation non linéaire, avec toutefois une certaine dispersion autour de cette relation surtout pour les données observées. Ces résultats confirment que le niveau de saturation du sol explique une part, mais une part seulement de la variabilité

du débit dû au drainage d'eau du sol par le réseau (Breil et al., 1993).

Le débit total

Le débit total simulé peut être comparé au débit mesuré à l'exutoire du bassin versant. Durant la période de simulation, il s'est produit 1 072 événements pluvieux au cours desquels l'intensité pluvieuse a dépassée $0,5 \text{ mm.h}^{-1}$ durant au moins une heure. Deux événements consécutifs sont séparés par une période sèche d'au minimum deux heures. Vu le temps de transfert de l'eau dans le réseau, la fin d'un événement pluvieux correspond à la fin de la pluie plus une heure. Sur la série d'événements pluvieux, les débits observé et simulé sont comparés à l'aide de deux critères :

❶ le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970) destiné à comparer la forme des hydrogrammes :

$$\text{Nash} = 100 * \left(1 - \frac{\sum_{r=1}^{nr} (Q_{\text{sim}}(t_r) - Q_{\text{obs}}(t_r))^2}{\sum_{r=1}^{nr} (Q_{\text{obs}}(t_r) - \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \right) [\%] \quad (4)$$

où

- > r est l'indice de la discrétisation temporelle de la simulation représentant un pas de temps appartenant à la série d'événements pluvieux,
- > nr est le nombre de pas de temps de la simulation appartenant à la série d'événements pluvieux,
- > Q_{obs} est le débit observé à l'exutoire du bassin versant,
- > $\overline{Q_{\text{obs}}}$ est la moyenne du débit observé durant la série d'événements pluvieux,
- > et Nash le critère de Nash durant la série d'événements pluvieux.

❷ une erreur relative permet d'estimer le biais du modèle :

$$\text{ER}_Q = 100 * \left(\frac{\sum_{r=1}^{nr} (Q_{\text{sim}}(t_r) - Q_{\text{obs}}(t_r))}{\sum_{r=1}^{nr} Q_{\text{obs}}(t_r)} \right) [\%] \quad (5)$$

où ER_Q est l'erreur relative durant la série d'événements pluvieux.

Les résultats obtenus sont regroupés dans la première ligne du tableau II. Le critère de Nash atteint 75 % et l'erreur relative est de + 3 % ; ces valeurs plutôt satisfaisantes montrent que le modèle reproduit bien le débit observé (Berthier, 1999). Le modèle apporte aussi des informations

sur l'importance des différentes composantes du débit. Le critère de Nash est peu modifié si le débit dû au drainage d'eau du sol par le réseau et le débit dû au ruissellement sur les surfaces naturelles ne sont pas pris en compte (deuxième ligne du tableau II). Ces composantes du débit ont donc peu d'influence sur la forme de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Mais le critère d'erreur relative est beaucoup plus sensible à l'absence de ces deux composantes. Elles ont donc une influence significative sur le volume total d'eau qui s'écoule à l'exutoire du bassin versant durant un événement pluvieux.

TABLEAU II
Comparaison entre les débits observé et simulé à l'exutoire du bassin versant de Rezé (données au pas de temps horaire durant 1 072 événements pluvieux identifiés entre le 1^{er} janvier 1991 et le 31 décembre 1998)

Débit simulé pris en compte	Critères de comparaison débits observé et simulé	
	Nash (%)	ER _Q (%)
$Q_{\text{bât}} + Q_{\text{voi}} + Q_{\text{nat}} + Q_{\text{res}}$	75	+ 3
$Q_{\text{bât}} + Q_{\text{voi}}$	77	- 10

Cette influence significative peut être quantifiée plus précisément. En moyenne lors d'un événement pluvieux, le volume d'eau provenant du drainage de l'eau du sol par le réseau et du ruissellement sur les surfaces naturelles représente 11 % du volume total. La contribution du drainage d'eau du sol par le réseau apparaît plus importante que celle du ruissellement sur les surfaces naturelles (10 % contre 1 %). Ces contributions sont toutefois variables d'un événement pluvieux à l'autre et possèdent une composante saisonnière marquée. Si ces contributions sont négligeables lors des événements pluvieux estivaux (de juin à septembre), elles sont beaucoup plus significatives lors des événements pluvieux hivernaux (de décembre à mars) où elles représentent, en moyenne, 24 % du volume total écoulé, 22 % étant dû au drainage d'eau du sol par le réseau et 2 % dû au ruissellement sur les surfaces naturelles.

La représentativité du modèle a été vérifiée en analysant différentes variables hydrologiques simulées par le modèle. Le modèle reproduit plutôt bien les données observées, mise à part la charge hydraulique de l'eau dans le sol à - 1 m. C'est le cas du débit observé à l'exutoire du bassin versant. Le modèle fournit de plus des informations sur le rôle du sol dans la formation de ce débit :

- > i) les débits dues au drainage d'eau du sol par le réseau et au ruissellement sur les surfaces natu-

relles influencent de façon significative le volume écoulé à l'exutoire du bassin versant,

➤ ii) cette influence est variable d'un événement pluvieux à l'autre, quasi nulle en période estivale et accrue en période hivernale.

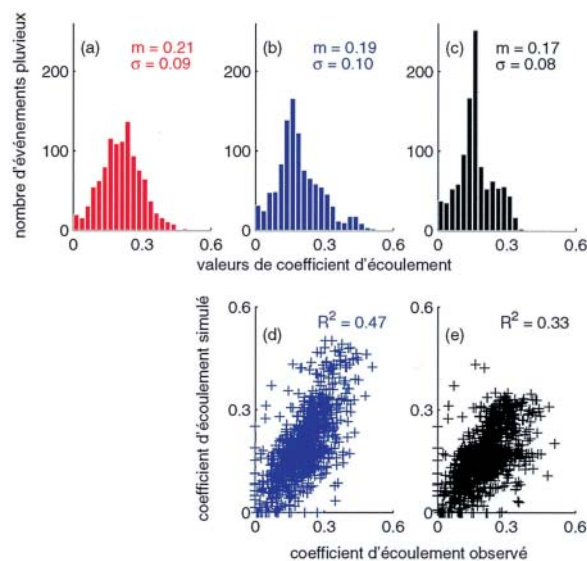
Influence du sol sur les variations du coefficient d'écoulement

Le coefficient d'écoulement représente de façon globale la formation du débit sur un bassin versant lors d'un événement pluvieux. Le paragraphe précédent a montré que le débit à l'exutoire du bassin versant de Rezé est influencé par deux composantes dépendantes du comportement du sol : le débit dû au drainage d'eau du sol par le réseau et le débit dû au ruissellement sur les surfaces naturelles. Il s'agit maintenant de vérifier si cette influence du sol permet de mieux comprendre et de reproduire les variations du coefficient d'écoulement.

Étude des variations du coefficient d'écoulement

Le coefficient d'écoulement d'un événement pluvieux a déjà été défini précédemment comme le rapport du volume d'eau écoulé à l'exutoire du bassin versant sur le volume d'eau précipité sur le bassin versant durant cet événement pluvieux. La figure 8a représente l'histogramme des coefficients d'écoulement observés pour l'ensemble des événements pluvieux considérés. La forme de l'histogramme est proche de celle d'une loi de Gauss. La moyenne (0,21) est très inférieure au coefficient d'imperméabilisation du bassin versant (0,37). La variabilité autour de cette moyenne est forte, avec un coefficient de variation de 43 %. Les coefficients d'écoulement simulés sont calculés de façon similaire en tenant compte du débit simulé à l'exutoire du bassin versant. La forme de l'histogramme des coefficients d'écoulement simulés est proche de celle d'une loi de Gauss (fig. 8b), avec une proportion plus élevée de valeurs faibles. La moyenne et l'écart type des coefficients d'écoulement simulés sont très proches de ceux des coefficients d'écoulement observés. La figure 8d montre le nuage des points représentant les coefficients d'écoulement observés et simulés. Le modèle reproduit presque la moitié de la variabilité observée ($R^2 = 47\%$). À titre de comparaison, un modèle urbain usuel dont les paramètres ont été calés explique moins du tiers de la variabilité observée ($R^2 = 31\%$, Rodriguez et al., 2000).

Il est aussi possible d'étudier le rôle du sol dans la variabilité expliquée du coefficient d'écoulement.



- Histogramme des coefficients d'écoulement observés, avec leur moyenne m et leur écart type s .
- Histogramme des coefficients d'écoulement simulés.
- Histogramme des coefficients d'écoulement simulés sans prise en compte du rôle du sol.
- Lien entre les coefficients d'écoulement observés et simulés.
- Lien entre les coefficients d'écoulement observés et simulés sans prise en compte du rôle du sol.

Fig. 8 - Coefficients d'écoulement observés et simulés sur le bassin versant de Rezé (pour 1 072 événements pluvieux identifiés du 1^{er} janvier 1991 au 31 décembre 1998).

Si les débits dû au drainage d'eau du sol par le réseau et dû au ruissellement sur les surfaces naturelles ne sont pas pris en compte dans le débit simulé, la capacité du modèle à expliquer les variations du coefficient d'écoulement se détériore de façon significative. La forme de l'histogramme des coefficients d'écoulement simulés s'éloigne alors de celle d'une loi de Gauss (fig. 8c). Le modèle n'explique plus qu'un tiers de la variabilité du coefficient d'écoulement (fig. 8e) : la part de la variabilité du coefficient d'écoulement imputable au rôle du sol s'élève donc à 15 % sur le bassin versant.

Influence du sol lors d'un événement pluvieux pour lequel le coefficient d'écoulement est élevé

Ce sont principalement les fortes valeurs du coefficient d'écoulement qui sont moins bien reproduites si le rôle du sol n'est pas pris en compte dans le modèle. Le rôle du sol est donc particulièrement important lors des événements pluvieux dont le coefficient d'écoulement est élevé. Afin d'analyser en détail ce rôle, les quarante-deux événements pluvieux (soit 5 % du nombre total) pour lesquels le coefficient d'écoulement observé est supérieur au coefficient d'imperméabilisation du bassin versant sont étudiés de façon plus

détaillée. Ces événements pluvieux se produisent majoritairement en période hivernale : seulement treize ont lieu entre les mois d'avril à novembre. Ils se caractérisent par une durée importante, en moyenne de huit heures (contre cinq heures pour la moyenne de tous les événements), une hauteur d'eau précipitée importante, en moyenne de 13 mm (contre 5 mm pour tous les événements), et une intensité maximale pas obligatoirement élevée, en moyenne de $3,7 \text{ mm.h}^{-1}$ au pas de temps horaire (contre $2,1 \text{ mm.h}^{-1}$ pour tous les événements).

La figure 9 représente le débit observé et les différentes composantes du débit simulé durant l'un de ces événements. Le coefficient d'écoulement observé vaut 0,43. Le modèle reproduit correctement le débit observé tout au long de l'événement : le critère de Nash vaut 0,84, l'erreur relative est de + 2 %, et le coefficient d'écoulement simulé est de 0,45.

Le modèle apporte aussi des informations concernant la formation du débit durant l'événement. Dans la première partie de l'événement (les vingt premières heures), le débit provient exclusivement du ruissellement sur les surfaces imperméabilisées. Ce n'est plus vrai dans la seconde partie de l'événement durant laquelle le rôle du sol est nettement mis en évidence. Le débit dû au ruissellement sur les surfaces naturelles apparaît au cours de l'événement. Ses variations sont directement liées à celles de la pluie et ses valeurs sont significatives en rapport au débit total. Le débit dû au drainage d'eau du sol par le réseau, négligeable

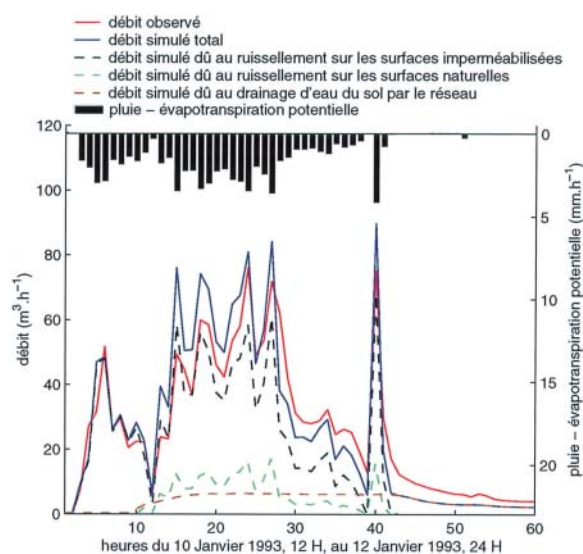


Fig. 9 - Débits observé et simulé sur le bassin versant de Rezé durant un événement pluvieux pour lequel le coefficient d'écoulement est supérieur au coefficient d'imperméabilisation du bassin versant (données au pas de temps horaire du 10 janvier 1993, 12 heures, au 12 janvier 1993, 24 heures).

en début d'événement, devient lui aussi significatif en cours d'événement. Il varie plus lentement que les débits dus au ruissellement et perdure plusieurs heures après la fin de la pluie expliquant en partie la queue de l'hydrogramme observé. Cette queue est toutefois sous-estimée avec le modèle, ce qui indiquerait un rôle du sol encore plus important que celui simulé. Cette tendance du modèle à la sous-estimation n'est pas observée lors des autres événements pluvieux, elle est même pour certains inverse. En résumé, le rôle du sol sur le débit à l'exutoire du bassin versant est donc important lors de cet événement pluvieux. La valeur du coefficient d'écoulement observé supérieure au coefficient d'imperméabilisation du bassin versant est bien expliquée par ce rôle.

Les variations du coefficient d'écoulement d'un événement pluvieux à l'autre sur le bassin versant de Rezé sont donc influencées par le comportement du sol. La prise en compte du sol dans le modèle permet de mieux expliquer ces variations. Ce sont principalement les coefficients d'écoulements élevés qui sont mieux reproduits avec le modèle, le rôle du sol expliquant bien les valeurs de coefficient d'écoulement supérieures au coefficient d'imperméabilisation du bassin versant.

Conclusion et perspectives

Les modèles hydrologiques actuels du milieu urbain négligent le rôle du sol dans la formation des débits. Or la formation des débits sur un bassin versant urbain est variable d'un événement pluvieux à l'autre. Cette variabilité est particulièrement marquée pour les événements pluvieux courants qu'il s'agit de prendre en compte pour réduire les rejets polluants au milieu naturel. L'objectif de l'étude présentée était donc d'étudier le rôle du sol dans la formation des débits en milieu urbanisé. La modélisation détaillée d'un élément bidimensionnel, l'élément hydrologique urbain (EHU), représentant une zone d'influence d'un collecteur d'eaux pluviales a été entreprise. L'hétérogénéité du sol urbain est prise en compte explicitement et les écoulements d'eau en son sein sont résolus à l'aide du code de calcul par éléments finis CÉSAR-LCPC. Deux composantes du débit dépendantes du comportement du sol sont représentées : le débit dû au drainage d'eau du sol par le réseau et le débit dû au ruissellement sur les surfaces naturelles. Le modèle est appliqué au petit bassin versant périurbain de Rezé (Berthier et al., 1998) où sont enregistrés la pluie et le débit à l'exutoire du réseau d'eaux pluviales mais aussi des informations sur les écoulements d'eau dans le sol. La paramétrisation du modèle s'inspire du

sens physique des paramètres et la simulation est continue durant huit années. Ces conditions assurent une certaine robustesse des résultats.

L'analyse de différentes variables hydrologiques simulées démontre une représentativité satisfaisante du modèle. Le débit à l'exutoire du bassin versant est particulièrement bien reproduit. Il se confirme que le sol joue un rôle réel dans la formation de ce débit. Le sol n'influence guère la forme de l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant mais plutôt le volume écoulé. En moyenne, la contribution du sol représente 11 % du volume écoulé durant un événement pluvieux. Cette contribution est due principalement au drainage d'eau du sol par le réseau, elle apparaît variable d'un événement pluvieux à l'autre et explique 15 % de la variabilité du coefficient d'écoulement observée sur le bassin versant. Le rôle du sol apparaît prédominant durant les événements pluvieux produisant un coefficient d'écoulement élevé parfois supérieur au coefficient d'imperméabilisation du bassin versant.

Les perspectives de poursuite de la recherche sont variées. Les informations obtenues sur le bassin

versant de Rezé mériteraient d'être confirmées sur d'autres bassins versants de types d'habitats différents et dans des contextes climatologiques et hydrogéologiques divers (Coureul, 1998). Il serait, en particulier, intéressant d'appliquer le modèle à un bassin versant de centre urbain où l'habitat est plus dense. Une fois confirmées, les informations devront être intégrées dans un modèle complet de bassin versant de grande taille d'avantage pertinente pour les applications opérationnelles. Ce travail nécessite de simplifier la démarche de modélisation de l'EHU afin qu'elle puisse être assimilée dans un modèle basé sur une description du bassin versant par parcelle cadastrale (Rodriguez, 1999). Enfin malgré la prise en compte du rôle du sol, la moitié de la variabilité du coefficient d'écoulement reste inexpliquée sur le bassin versant de Rezé. La variabilité de comportement des surfaces imperméabilisées pourrait expliquer cette méconnaissance. Afin de le vérifier, un suivi de la pluie et du ruissellement sur des surfaces individuelles imperméabilisées a été mis en place sur le site du LCPC à Nantes (Berthier et al., 2000).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANDERSON M.P., WOESSNER W.W. (1992), *Applied groundwater modeling, simulation of flow and advective transport*, Academic Press, San Diego, Californie, 372 pages.

ANDRIEU H., BALADES J.-D., LIVET M. (1996), *Apports pluviaux en milieu urbain, synthèse des travaux réalisés*, rapport du thème EGU 01, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Nantes, 24 pages.

ANDRIEU H., BELHADJ N., JOANNIS C., RAIMBAULT G. (1993), *Variability of urban runoff*, 6th International Conference on Urban Storm Drainage, Vol. I, Niagara Falls, Ontario, Canada, pp. 597-602.

ASAEDA T., CA V.T. (1993), The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment : a numerical model, *Boundary-Layer Meteorology*, **65**, pp. 159-179.

BALADES J.-D., LIVET M., GUILLIN J.C., PILLOY J.-C. (1991), Quelques exemples d'utilisation des modèles hydrologiques, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **172**, pp. 79-92.

BAREYRE S. (1995), *Étude de la variabilité du coefficient d'apport en milieu urbain*, Rapport de fin d'étude, École nationale supérieure électronique électrotechnique informatique et hydraulique de Toulouse, Toulouse, 33 pages.

BECCIU G., PAOLETTI A. (1997), Random characteristics of runoff coefficient in urban catchments, *Water Science and Technology*, **36**(8-9), pp. 39-44.

BERTHIER E. (1999), *Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain : élaboration du modèle et première évaluation*, Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, Grenoble, 159 pages.

BERTHIER E., AUZIZEAU J., FASQUEL M., FLAHAUT B., ROUAUD J.-M., ANDRIEU H. (1998), Le suivi hydrologique de bassins versants expérimentaux en milieu urbanisé, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **218**, pp. 59-75.

BERTHIER E., DUPONT S., ANDRIEU H., MESTAYER P. (2000), *Modélisation des bassins versants urbanisés : comportement des surfaces aménagées*, Colloque 2000 du Programme nationale de recherche en hydrologie, 16-17 mai 2000, Centre international de conférence Météo-France, Toulouse, pp. 121-125.

BOUZINBA K., PILLOY J.-C., ANDRIEU H., AUCHET P. (1991), *Variabilité des coefficients d'écoulement de trois bassins versants de la ville de Nancy*, rapport d'étude du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, du Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Nancy et du District urbain de Nancy, 74 pages.

BREIL P., JOANNIS C., RAIMBAULT G., BRISAUD F., DESBORDES M. (1993), Drainage des eaux claires parasites par les réseaux sanitaires. De l'observation à l'élaboration d'un modèle prototype, *La Houille Blanche* (**1**), pp. 45-57.

- CHOISNEL E. (1988), Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir de données météorologiques, *La météorologie*, **7**(23), pp. 19-27.
- COUREUL C. (1998), *Évaluation d'une modélisation à base physique de la transformation pluie-débit en milieu urbain*, DEA du fonctionnement physique, chimique et biologique de la biosphère continentale, INRA P-G, Paris VI, ENS, Paris, 30 pages.
- DESBORDES M. (1987), *Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain*, Thèse de doctorat d'état, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 215 pages.
- DUPASQUIER B. (1999), *Modélisation hydrologique et hydraulique des infiltrations d'eaux parasites dans les réseaux séparatifs d'eaux usées*, Thèse de doctorat, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, Paris, 209 pages.
- FEDDES R.A., KABAT P., VAN BAKEL P.J.T., BRONSWIJK J.J.B., HALBERTSMA J. (1988), Modelling soil water dynamics in the unsaturated zone – State of the art, *Journal of Hydrology*, **100**, pp. 69-111.
- GRIMMOND C.S.B., OKE T.R. (1991), An evapotranspiration-interception model for urban areas, *Water Resources Research*, **27**(7), pp. 1739-1755.
- HASSAN H.F., WHITE T.D. (1997), Laboratory and field moisture conditions for flexible pavement, *Transportation Research Record*, **1568**, pp. 96-105.
- HILLEL D. (1988), *L'eau et le sol, principes et processus physiques*, Academia, Louvain-la-Neuve, 276 pages.
- HOLLIS G.E., OVENDEN J.C. (1988), The quantity of stormwater runoff from ten stretches of road, a car park and eight roofs in Hertfordshire, England during 1983, *Hydrological processes*, **2**, pp. 227-243.
- HUBER W.C., DICKINSON R.E. (1988), *Storm Water Management Model, User's manual*, EPA / 600/3-88/001a (NTIS PB88-236641/AS). Environmental Protection Agency, Athens, Georgia, États-Unis.
- HUMBERT P. (1984), Application de la méthode des éléments finis aux écoulements en milieu poreux, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **132**, pp. 21-37.
- INSAVALOR, SOGREA (1997), *CANOE, logiciel d'hydrologie urbaine, conception et évaluation de réseaux d'assainissement, simulation des pluies, des écoulements et de la qualité des eaux. Manuel de l'utilisateur*.
- JOANNIS C., BELHADJ N., RAIMBAULT G. (1993), *Rainfall induced infiltration into sewer systems*, 6th International Conference on Urban Storm Drainage, Vol. II, Niagara Falls, Ontario, Canada, pp. 1988-1993.
- MAKSIMOVIC C., RADOJKOVIC M. (1986), *Selected worldwide rainfall-runoff data from experimental catchments*, Pergamon Press, Oxford.
- NASH J.E., SUTCLIFFE J.V. (1970), River flow forecasting through conceptual models. Part I – A discussion of principle, *Journal of Hydrology*, **10**(3), pp. 282-290.
- PIAU J.-M. (1991), *Manuel théorique des modules de diffusion non linéaire de CÉSAR-LCPC*, manuel interne non publié, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 97 pages.
- PITT R.E., FIELD R., BURIAN S., NIX S.J., DURRANS S.R. (1998), *Drainage design for the future, results of on-going EPA funded research*, Fourth International Conference on Developments in Urban Drainage Modelling, Vol. 1, 21-24 September, London, pp. 137-143.
- RAIMBAULT G. (1996), Effet des sols et sous-sol urbains sur le devenir des eaux pluviales, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, **202**, pp. 71-78.
- RICHARDS L.A. (1931), Capillary conduction of liquids in porous mediums, *Physics*, **1**, pp. 318-333.
- RODRIGUEZ F. (1999), *Intérêt des banques de données urbaines pour l'analyse hydrologique : détermination de la fonction de transfert d'un bassin versant urbain*, Thèse de doctorat, Institut nationale polytechnique de Grenoble, Grenoble, 176 pages.
- RODRIGUEZ F., ANDRIEU H., RAIMBAULT G., Y. Z. (1996), *Test of an urban rainfall-runoff model using digital terrain model*, 7th International Conference on Urban Storm Drainage, Vol. III, Hannover, Germany, pp. 1437-1442.
- RODRIGUEZ F., ANDRIEU H., ZECH Y. (2000), Evaluation of a distributed model for urban catchments using a 7-year continuous data series, *Hydrological processes*, **14**, pp. 899-914.
- TAHA A., GRESILLON J.M., CLOTHIER B.E. (1997), Modelling the link between hillslope water movement and stream flow : application to a small Mediterranean forest watershed, *Journal of Hydrology*, **203**, pp. 11-20.
- VAN GANSE R. (1978), *Les infiltrations dans les chaussées : évaluations prévisionnelles*, Symposium on road drainage, 22-24 Mai 78, Berne, Allemagne, pp. 176-192.

ABSTRACT

Generation of flows in urban stormwater drainage systems : The role of soil

E. BERTHIER, H. ANDRIEU, M. FASQUEL, J.-D. CREUTIN

A detailed model has been developed herein to study the role of soil in the generation of flows through urban stormwater drainage systems. The model is based on a two-dimensional element that represents a section cut of an urbanized setting. Soil heterogeneity has been explicitly taken into account and the water flow paths into the soil have been resolved by use of the CESAR-LCPC finite element computation code. The model's ability to adequately represent a small suburban catchment basin appears to be satisfactory. During a rainfall event, the soil influences the flow volume at the basin's outfall by means of two flow rate components : the drainage of water in the soil through the system, and runoff from "natural" ground surfaces. This influence, which remains variable from one rainfall event to the next, amounts on average to 11% of total flow volume and serves to explain the variability observed in the flow coefficient within the catchment basin.