

Modélisation hydrologique à grande échelle des zones imperméables drainées

Large Scale Hydrological Modelling of Drained Impervious Areas :

BRUNO KHUAT DUY*, PIERRE ARCHAMBEAU, SÉBASTIEN ERPICUM, BENJAMIN J. DEWALS*
ET MICHEL PIROTON

Université de Liège (Département ArGENCo) – Chemin des Chevreuils, 1 – Bat B52/3+1, 4000 Liège, Belgique

Tél : +32 (0)4 3669283, Fax : +32 (0)4 3669558, Site : <http://www.hach.ulg.ac.be>, e-mail : hach@ulg.ac.be

*Fond de la Recherche Scientifique F.R.S. – F.N.R.S.

En hydrologie, la manière de prendre en compte les zones urbaines diffère sensiblement selon les dimensions des bassins et la résolution temporelle des événements pluvieux étudiés. A petite échelle, les zones urbaines peuvent être modélisées grâce à une description détaillée des divers écoulements existants. En particulier, le réseau de drainage peut être décrit explicitement. A grande échelle cependant, les zones urbaines sont souvent représentées par des approches moins détaillées. Les modèles actuels prennent généralement en compte les surfaces imperméables par une adaptation des coefficients de ruissellement ou d'infiltration. Cette approche permet de générer des volumes de ruissellement corrects, mais ne permet pas de tenir compte de la modification de la dynamique de transfert des apports liée à la présence de réseaux de drainage. Une méthode de modélisation particulière a donc été développée pour tenir compte de ces éléments dans un modèle hydrologique global (WOLF), en quantifiant de façon précise les apports des surfaces imperméables grâce à des données d'occupation du sol en format vectoriel et en les propageant sans devoir implémenter l'entièreté du réseau de drainage. Ces développements ont été appliqués sur le bassin de la Berwinne, en Belgique.

In hydrology, the modelling of urban areas significantly differs according to the catchment size and the temporal resolution of the studied rainfall events. At small scales, the urban areas can be modelled using a detailed description of the various existing flows, with an explicit description of the drainage network. However, at large scales, the urban areas are often represented by coarser approaches. The current models often take into account impervious surfaces by an adaptation of runoff or infiltration coefficients. In this way, the volume of streaming can be correctly generated, but the modification of the flow dynamics through the drainage network is not taken into account. An original modelling method was thus developed to include these processes in a global hydrological model (WOLF), by accurately quantifying the contributions from impervious surfaces thanks to vectorial landuse maps and propagating them without modelling the whole drainage network. These developments were applied to the Berwinne catchment, in Belgium.

I ■ INTRODUCTION

L'occupation des sols, en particulier par des zones imperméables, joue un rôle fondamental dans la génération des apports hydrologiques. L'urbanisation, de plus en plus marquée au cours des dernières décennies, a engendré des effets non contrôlés au niveau de l'hydrologie, avec pour conséquence la nécessité d'une bonne gestion des rivières afin de limiter les impacts négatifs pour les riverains.

Cet article s'intéresse plus particulièrement à la production de ruissellement en provenance des zones imperméables, correspondant principalement aux zones urbaines. La manière de prendre celles-ci en compte diffère sensiblement selon les dimensions des bassins et la résolution temporelle des événements pluvieux étudiés. A petite échelle, les zones

urbaines peuvent être modélisées grâce à une description détaillée des divers écoulements existants. En particulier, la prise en compte du réseau d'égouts peut dans ce cas être effectuée par une modélisation complète de celui-ci [1, 2, 3]. Les zones imperméables sont généralement prises en compte de façon explicite au niveau de la discréttisation du bassin, et le réseau de conduites y est décrit de manière précise (incluant notamment les dimensions des tuyaux). Néanmoins, un tel niveau de complexité restreint l'utilisation de ce type de modèles à des bassins de faibles dimensions [4]. Dans les bassins de plus grandes dimensions, les zones urbaines sont souvent représentées par des approches moins détaillées. L'approche la plus courante dans les modèles déterministes consiste à utiliser un coefficient d'infiltration ou de ruissellement spécifique dans les zones urbaines. La

méthode rationnelle, toujours utilisée actuellement en raison de son extrême simplicité, associe à chaque type de terrain un coefficient de ruissellement généralement considéré constant, y compris dans les zones habitées où il dépend de la densité urbaine [5, 6]. La méthode SCS, largement utilisée dans de nombreux modèles, utilise des coefficients de ruissellement dépendant du type de sol, de l'occupation du sol et des volumes de pluie [7, 8]. Dans les zones urbaines, des coefficients de ruissellement spécifiques sont calculé sur la base d'une moyenne des paramètres (curve numbers) correspondant d'une part aux sols imperméables (toitures, routes,...) et d'autre part aux terrains adjacents (jardins, parcs,...) en fonction d'une densité d'urbanisation estimée [7]. Dans ces méthodes, les caractéristiques des zones urbaines déterminant le choix des coefficients à utiliser (en particulier leur densité) sont souvent difficiles à estimer de façon objective. En outre, ces approches sont incapables de tenir compte de la modification de la dynamique de transfert des apports liée à la présence d'un réseau d'égouts (modification des chemins d'écoulement, diminution du temps de propagation).

Une méthodologie originale, développée dans le cadre d'un modèle hydrologique physiquement basé et spatialement distribué, est proposée de manière à évaluer de manière précise les surfaces imperméables et à prendre en compte les effets de drainage sans modéliser explicitement l'entièreté du réseau de drainage. L'extension exacte des zones imperméables est estimée sur base de cartes d'occupation du sol en format vectoriel. Elles sont ensuite séparées en deux catégories : les zones drainées et non drainées. La propagation de la pluie tombant sur les zones non drainées est traitée de façon identique à celle du ruissellement produit par les zones perméables. En revanche, les écoulements en provenance des zones drainées sont simulés séparément grâce à une modélisation simplifiée du réseau d'égouts.

II ■ LE MODÈLE HYDROLOGIQUE GLOBAL WOLF

Les développements présentés dans cet article sont intégrés dans la composante hydrologique d'un système global

de modélisation nommé « WOLF » et entièrement développé à l'Université de Liège. WOLF regroupe plusieurs modèles complémentaires qui peuvent être éventuellement interconnectés pour simuler la plupart des écoulements à surface libre : écoulements hydrologiques, hydrodynamique 1D et 2D [9, 10], transport d'air ou de sédiments [11] ainsi qu'un module d'optimisation basé sur le concept des algorithmes génétiques [12]. La composante hydrologique de WOLF est physiquement basée et spatialement distribuée. Elle permet de simuler les processus hydrologiques principaux à l'aide d'un modèle multi-couches.

Les équations caractéristiques des écoulements sont intégrées sur la hauteur. Au niveau du ruissellement en surface, l'approche diffusive est utilisée. Celle-ci consiste à négliger les termes d'inertie comparés aux termes de gravité dans les équations des eaux peu profondes (shallow water equations).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = S \text{ et } S_{fi} = \sin \theta_i - \cos \theta_i \frac{\partial h}{\partial i} \quad i = x, y \quad (1)$$

où h est la hauteur d'eau, u et v sont les vitesses les long des axes x et y , S représente les termes sources (pluie et infiltration), S_{fi} ($i = x, y$) sont les pentes de frottement, et θ_x et θ_y sont les projections de la pente de sol. Les vitesses sont liées aux pentes de frottement par la loi de frottement de Manning-Strickler :

$$u = \frac{1}{n} h^{2/3} \frac{S_{fx}}{(S_{fx}^2 + S_{fy}^2)^{1/4}}; v = \frac{1}{n} h^{2/3} \frac{S_{fy}}{(S_{fx}^2 + S_{fy}^2)^{1/4}} \quad (2)$$

où n est un coefficient de frottement dépendant de la rugosité de surface. L'infiltration est calculée par une loi de type « Green-Ampt », et l'écoulement hypodermique est calculé l'aide des équations de Darcy intégrées sur la hauteur et suit donc une équation diffusive semblable à celle utilisée pour l'écoulement de surface.

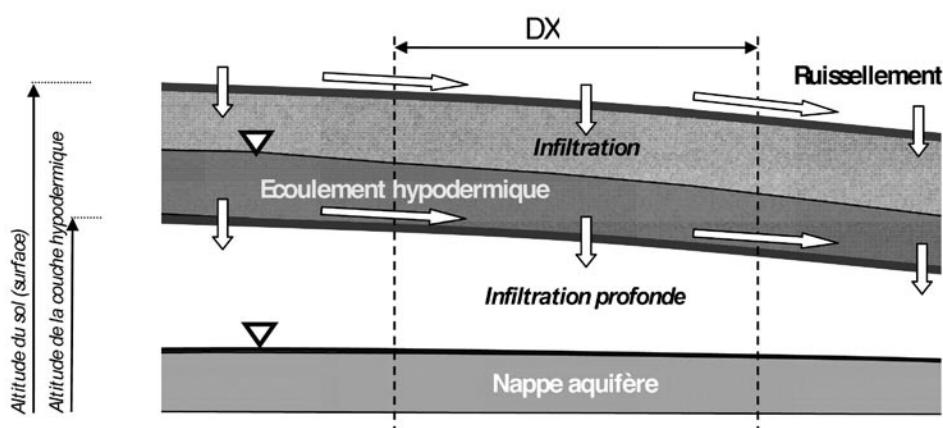


Figure 1. Couches d'écoulement représentées dans le modèle hydrologique.

Les données nécessaires sont préparées dans l'interface SIG de WOLF [13], en utilisant des outils de pré-processing pour préparer les données. Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) est modifié de manière à supprimer les dépressions suivant un algorithme proposé par Martz et Garbrecht [14], et une méthode de « Stream Burning » [15, 16] est appliquée de manière à ce que les chemins de ruissellement issus du MNT correspondent aux chemins réels. Les propriétés du sol sont extraites de cartes pédologiques à l'aide de fonctions de pédotransfert [17]. L'impact de l'occupation du sol sur l'infiltration est prise en compte en utilisant des valeurs effectives de conductivité, comme proposé par Nearing [18].

Les apports générés par le modèle hydrologique sont routés dans le réseau de rivières grâce au module 1D. Celui-ci résout la forme conservative des équations de Saint-Venant 1D :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\omega}{q} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{q}{\rho_\omega \frac{q^2}{\omega} + g \cos \theta p_\omega} \right] \\ + \left[\begin{array}{c} -q_L \\ -g \omega \sin \theta + g \omega J + g \cos \theta h l_b \frac{\partial (-h_b)}{\partial x} - g \cos \theta p_x \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} 0 \\ 0 \end{array} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

où ω est la section transversale, q le débit, h la hauteur d'eau, q_L le débit d'échange latéral, J un terme global pour la rugosité de fond et les effets de cisaillement du fluide, θ la pente moyenne de fond, l_b la largeur de fond. Les termes de pression sont donnés par

$$p_\omega(h) = \int_0^h (h - \xi) l(x, \xi) d\xi; p_x(h) = \int_0^h (h - \xi) \frac{\partial l(x, \xi)}{\partial x} d\xi \quad (4)$$



(a) Surfaces imperméables

Dans ces équations, les apports hydrologiques sont traités comme des apports latéraux (termes sources). Les équations des écoulements hydrologiques et en rivière sont donc découpées.

III ■ MÉTHODES

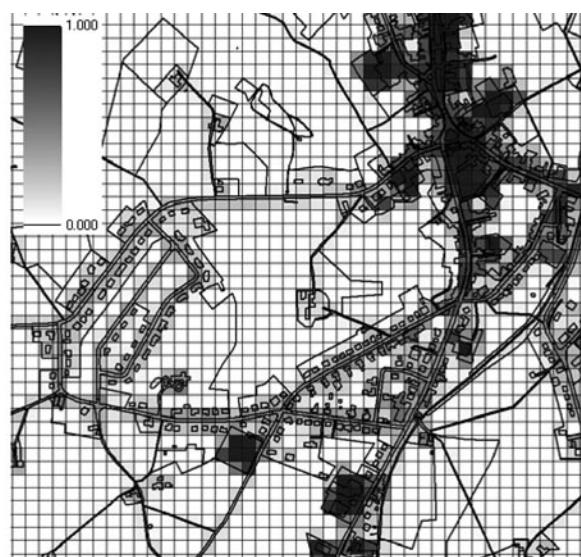
● III.1 SURFACES IMPERMÉABLES

L'exploitation d'un modèle distribué permet d'attribuer à chaque maille de calcul la fraction de sol imperméable qui lui correspond. Afin d'obtenir une estimation fiable de ces zones, cette estimation est réalisée sur base de cartes vectorielles d'occupation du sol (figure 2a).

Les types d'occupation imperméables (routes, maisons, parkings, structures en béton,...) sont sélectionnés et les surfaces correspondantes sont sommées pour chaque maille, ce qui permet d'obtenir le taux d'imperméabilisation en tout point du bassin en divisant ces valeurs par la surface de maille (figure 2b). Ce procédé permet de remplacer l'estimation fortement subjective d'une « densité urbaine » par une estimation bien plus précise et objective.

● III.2 RÉSEAU DE DRAINAGE

Parmi les zones imperméables, les zones drainées sont traitées séparément, car les apports de celles-ci se propagent vers la rivière de façon fondamentalement différente des autres apports. La détermination de ces zones est réalisée en fonction du réseau de drainage, en associant à chaque maille drainée la conduite dans laquelle l'eau est déversée. Cette information permettra le routage ultérieur de l'eau jusqu'à son exutoire. Dans ce cas, les mailles sont considérées drainées lorsque la distance entre le centre de la maille et la



(b) Fraction imperméable des mailles

Figure 2. Détermination des surfaces imperméables.

conduite la plus proche est inférieure à une distance maximale, typiquement de l'ordre de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres (une analyse plus détaillée est proposée dans le chapitre IV.2). Cette conduite est alors choisie pour recevoir les apports de la maille imperméable.

Dans le cas où l'information sur la structure du réseau de drainage n'est pas disponible, une autre méthodologie est proposée de manière à déterminer la proportion de mailles drainées. L'estimation est basée sur une analyse d'événements pluvieux sur le bassin, de manière semblable à l'approche suggérée par Boyd pour les bassins urbains [19]. Les pluies de faible intensité sont sélectionnées afin de se placer dans une situation où seules les surfaces imperméables produisent du ruissellement. La limite inférieure des coefficients de ruissellement nous donne alors le taux d'urbanisation du bassin, à condition d'appliquer cette méthodologie à un nombre suffisant de pluies de manière à réduire le risque d'erreurs liées à des données imprécises ou à la sélection de pluies inappropriées pour lesquelles le ruissellement n'est pas uniquement produit par les surfaces imperméables.

Afin d'acheminer les apports fournis par les mailles drainées, il est nécessaire de connaître le trajet suivi par l'eau. Le réseau de drainage se présente sous la forme d'une arborescence composée de très nombreuses conduites. La modélisation complète de ce réseau requiert dès lors d'importantes quantités de données souvent indisponibles. En outre, la densité de ce réseau nécessite l'utilisation de très petites mailles (de l'ordre de quelques mètres) pour pouvoir représenter les nombreuses conduites individuelles, ce qui peut avoir pour conséquence une réduction significative du pas de temps et une augmentation drastique du nombre de mailles. Afin de réduire la complexité du modèle tout en conservant la représentation des phénomènes essentiels menant à la propagation rapide vers la rivière, une fusion de ces arborescences en conduites uniques équivalentes (dont les exutoires sont pris au niveau des rivières) est proposée. Les pentes attribuées à celles-ci sont calculées par des moyennes pondérées des pentes du réseau d'origine.

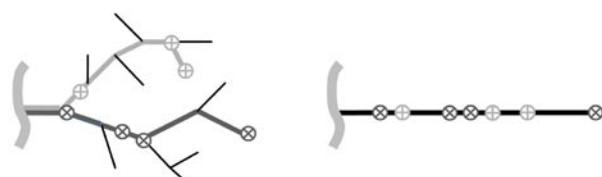


Figure 3. Transformation du réseau de drainage.
Les petits cercles représentent des exemples de points d'apport de mailles drainées.

Afin de fournir des valeurs par défaut pour les dimensions des conduites équivalentes, une relation a été établie en considérant que le débit à faire transiter dans ces conduites est proportionnel à la surface imperméable drainée et que l'écoulement est uniforme et suit la loi de frottement de Manning-Strickler :

$$i = J = \frac{n^2 u^2}{R_h^{4/3}} \quad (5)$$

où R_h [m] est le rayon hydraulique de l'écoulement et u [m / s] sa vitesse, J [-] la pente de frottement (égale à la pente de la conduite i [-] en conditions d'écoulement uniforme), et n [m^{-1/3}s] le coefficient de frottement de Manning. Les conduites circulaires sont dimensionnées de manière à accepter une pluie constante de 50 mm / h sur les surfaces drainées (valeur fréquemment utilisée dans le dimensionnement des réseaux d'égouts belges), avec un taux de remplissage de 80 %. Le coefficient de frottement des conduites est pris égal 0,015 m^{-1/3}s. La relation suivante est alors obtenue :

$$D_{eq} = 0,005 \left(\frac{S_{imp}}{i^{1/2}} \right)^{3/8} \quad (6)$$

où D_{eq} [m] est le diamètre de la canalisation équivalente et S_{imp} [m] la surface imperméable drainée.

L'influence du réseau de drainage sera d'autant plus importante que (i) la surface drainée est maximale, (ii) le réseau de drainage réduit significativement le temps de propagation en rivière et (iii) cette réduction est importante par rapport au temps de propagation en rivière. Dans le cas de pluies de faible intensité, l'effet relatif du réseau de drainage sera plus important puisque les apports des zones imperméables deviennent prépondérants dans l'écoulement total.

IV ■ RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1 DESCRIPTION DU BASSIN

La méthodologie décrite précédemment est appliquée sur le bassin de la Berwinne situé en Belgique. Cette rivière est un affluent de la Meuse et son bassin versant est de 131 km². Le bassin est majoritairement occupé par des prairies et inclut quelques villages de densité urbaine faible ou moyenne. La figure 4 montre le modèle numérique de terrain (MNT), qui présente une pente moyenne de 7,2 %. Deux sites de mesure sont localisés sur la rivière et fournissent des débits horaires. Les données de pluies sont collectées sur 8 stations journalières et une station horaire. Un procédé de désagrégation est appliqué sur les séries journalières afin d'obtenir des intensités de pluie horaires sur l'ensemble du bassin [20].

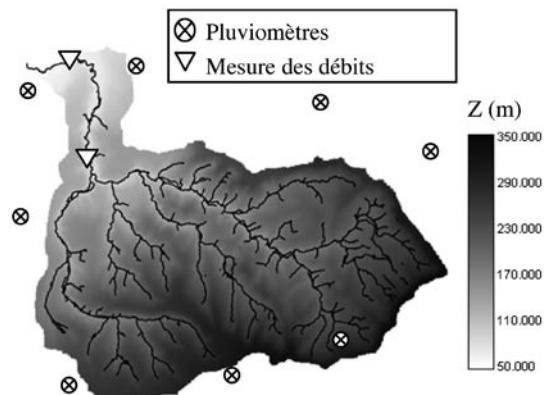


Figure 4. MNT du bassin (en mètres)

● IV.2 APPLICATION DE LA MÉTHODOLOGIE

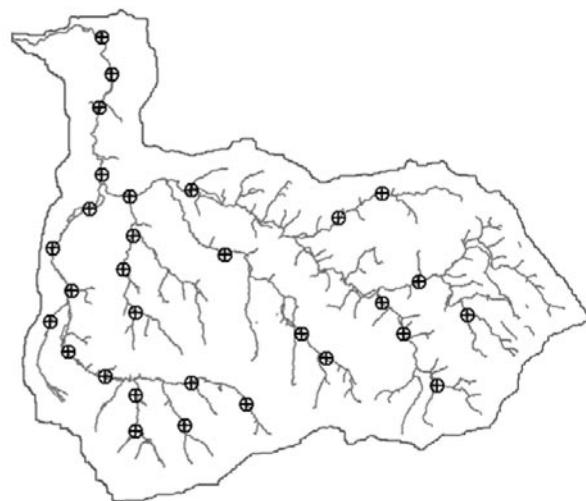
L'application de la méthode décrite précédemment pour le calcul des surfaces imperméables sur base de cartes vectorielles d'occupation du sol [21] fournit un taux d'imperméabilisation de 6,3 % pour le bassin. Le réseau de drainage (*Figure 5a*), fourni dans les « Plan d'Assainissement par Sous-bassin Hydrographique » [22], est simplifié en un ensemble de conduites équivalentes suivant la méthodologie mise au point. Les conduites proches sont fusionnées afin d'obtenir une distance minimale de 1000 m entre les différents exutoires. Il en résulte un ensemble de 30 conduites équivalentes représentant l'entièreté du réseau de drainage et dont l'exutoire se situe sur les bras de rivière modélisés (*Figure 5b*).

Les mailles sont considérées drainées si leur centre est situé à moins de 150 m des conduites. Une analyse de sensibilité des surfaces imperméables englobées en fonction de la distance maille-conduite sur la zone couverte par les cartes vectorielles a permis de montrer qu'au-delà de cette distance, la surface drainée augmente de façon bien moins importante (*figure 6*). La distance choisie permet de couvrir les principales zones urbaines situées près du réseau d'assainissement.

Les zones imperméables drainées ainsi calculées couvrent 2,5 % de la surface du bassin. L'estimation de ces mêmes zones sur base de l'analyse d'événements pluvieux de faible intensité (voir chapitre III.2) montre par ailleurs des résultats tout à fait cohérents avec cette valeur (*figure 7*) :



(a) Canalisation du réseau de drainage.



(b) Emplacement des exutoires des conduites équivalentes.

Figure 5. Détermination des surfaces imperméables.

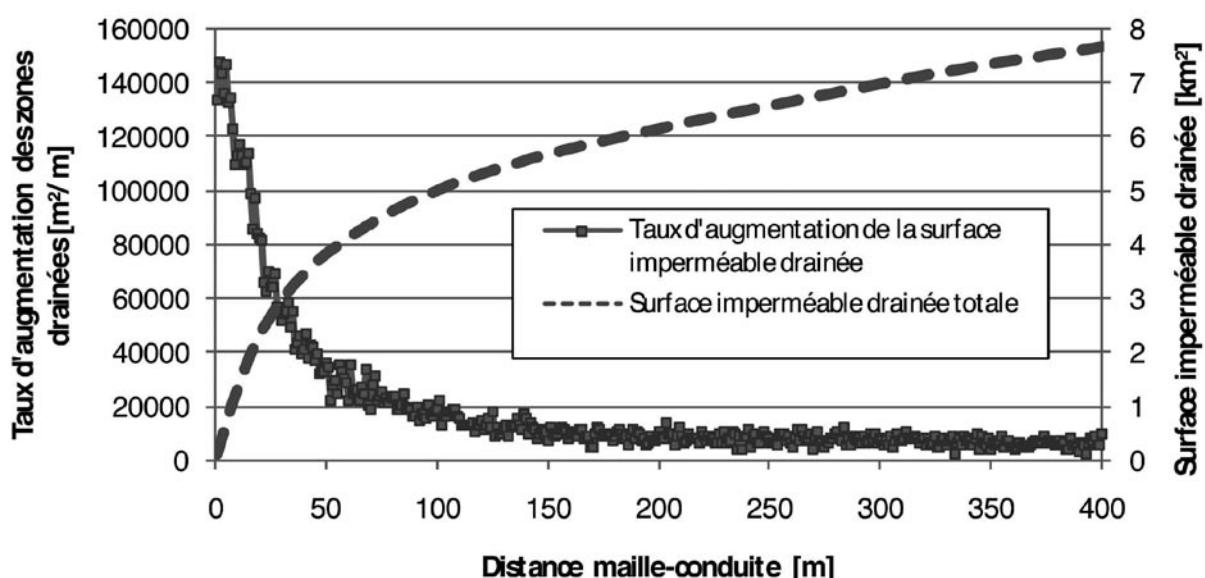


Figure 6. Evolution des zones drainées en fonction de la distance maille-conduite maximale.

la droite de pente 2,5 % constitue une limite inférieure du taux de ruissellement mesuré pour les événements pluvieux sélectionnés.

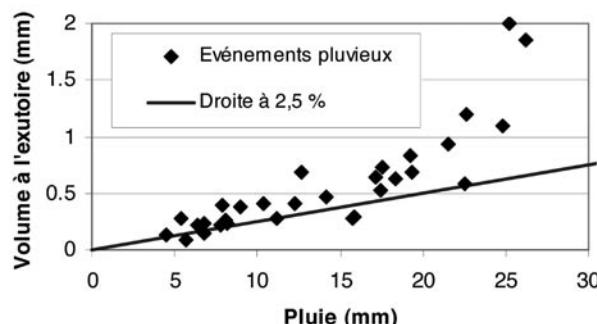


Figure 7. Volume des apports à l'exutoire en fonction du volume de pluie

IV.3 SIMULATION D'ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX

Le modèle hydrologique a été appliqué à la crue d'août 1996. Lorsque la propagation des apports pluvieux par le réseau de drainage n'est pas prise en compte, le modèle n'est pas capable de simuler l'évolution rapide des débits en rivière, même après calibrage de ses différents paramètres. Afin de montrer l'intérêt de la modélisation du réseau d'égouts, la pluie correspondante est simulée sans et avec sa prise en compte, et les débits obtenus sont comparés avec ceux mesurés à la station aval (Moelingen). La simulation de référence (sans réseau de drainage) est réalisée grâce à un calibrage manuel des paramètres principaux du modèle, le coefficient de frottement et la perméabilité du sol (multiplication des valeurs par défaut, fonctions du type de sol et de son occupation, par un coefficient constant sur l'entièreté du bassin). Cette pluie étant située dans une période d'étiage, l'écoulement de base est négligeable. Les données de pluie horaires, désagrégées à partir des valeurs journalières aux stations météorologiques, sont distribuées sur le bassin suivant la méthode des polygones de Thiessen.

Dans la simulation incluant le réseau de drainage, il apparaît clairement une composante de débit additionnelle rapide modifiant la distribution temporelle de débits. Celle-ci permet une meilleure modélisation des débits réels, comme le montre la *figure 8*. Il reste cependant des différences entre les deux courbes. Bien que le ruissellement des zones imperméables drainées fournit une composante de débit rapide, d'autres processus peuvent également influencer le débit calculé à des pas de temps horaires. Par exemple, les zones saturées situées près des rivières peuvent aussi produire de tels écoulements rapides, puisqu'elles ont un temps de propagation vers la rivière très faible [23]. Par ailleurs, les incertitudes sur les données de pluies à ces pas de temps peuvent également conduire à des différences significatives entre les débits simulés et mesurés. En particulier, le processus de désagrégation des pluies journalières en pluies horaires est une source d'incertitudes.

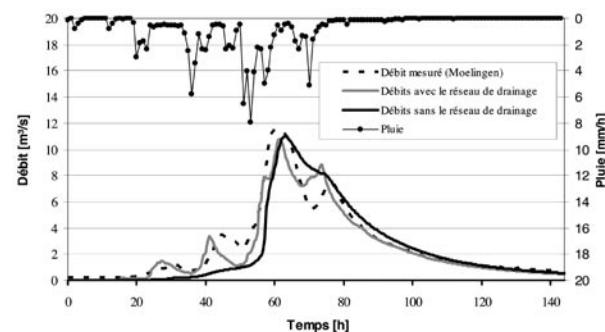


Figure 8. Hydrogrammes pour la crue d'août 1996.

Ces conclusions ont également été confirmées par la simulation d'autres événements pluvieux sur le bassin (pluies réelles et distributions arbitraires de pluie constituées d'une succession de pics de pluie intenses). Toutefois, le bassin étudié étant relativement peu urbanisé, l'ajout du réseau d'égouttage fait essentiellement sentir ses effets pour les pluies d'intensité moyenne ou faible (voir chapitre III.2). Dans le cas d'un bassin fortement urbanisé, il faut donc s'attendre à une influence bien plus marquée du réseau de drainage sur la dynamique de propagation des écoulements.

V ■ CONCLUSIONS

Les surfaces imperméables peuvent produire une part importante des apports hydrologiques. La dynamique d'écoulement de l'eau tombant sur ces surfaces peut différer significativement selon qu'elles sont reliées ou non à un système de drainage. Une méthodologie a donc été développée de manière à quantifier les contributions des zones imperméables avec précision et à prendre en compte l'effet du réseau de drainage sans sa modélisation complète. La fraction imperméable de chaque maille est déterminée par sommation des surfaces imperméables délimitées par des cartes d'occupation du sol au format vectoriel. Le réseau de drainage est représenté par un ensemble de conduites simplifiées qui permet le routage des mailles drainées jusqu'à la rivière.

L'application de ces procédés sur le bassin de la Berwinne a montré la capacité accrue du modèle à représenter la dynamique de la rivière à des pas de temps horaires. Néanmoins, il faut noter que d'autres processus hydrologiques (p.ex. la pluie tombant sur les zones saturées proches des rivières) ou la précision des données (p.ex. les données journalières de pluies devant être désagrégées en intensités horaires) peuvent également avoir un impact significatif sur les débits calculés à de faibles échelles de temps. Par conséquent, la modélisation spécifique des zones imperméables drainées est nécessaire pour améliorer la modélisation des processus d'écoulements, mais ne peut être considéré comme l'unique phénomène capable d'expliquer les variations de débit rapides apparaissant dans les hydrogrammes mesurés en rivière.

Les recherches menées ont permis de poser les bases d'une méthode de modélisation hydrologique des zones imperméables drainées à grande échelle. Ces développements doivent néanmoins être poursuivis de manière à évaluer la sensibilité

de la méthodologie. Le concept des conduites équivalentes pour la construction du réseau simplifié, principale contribution originale de cette recherche, devrait faire l'objet d'une analyse plus étendue (en particulier concernant leur dimensionnement) pour représenter au mieux le fonctionnement des conduites réelles. Enfin, il serait également utile d'établir des critères objectifs (sur base de nombres caractéristiques dépendant notamment de la taille du bassin et de son taux moyen d'urbanisation), permettant de déterminer à priori si la modélisation du réseau d'égouttage est pertinente pour les simulations envisagées.

VI ■ RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] ARONICA G., CANNAROZZO M. (2000) — Studying the hydrological response of urban catchments using a semi-distributed linear non-linear model. *Journal of Hydrology*. **238** 35-43
- [2] RODRIGUEZ F., ANDRIEU H., MORENA F. (2008) — A distributed hydrological model for urbanized areas – Model development and application to case studies. *Journal of Hydrology*. **351** 268-287
- [3] SCHMITT T. G., THOMAS M., ETTRICH N. (2004) — Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology*. **299** 300-311
- [4] LHOMME J., BOUVIER C., PERRIN J.-L (2004) — Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchments. *Journal of Hydrology*. **299** 203-216
- [5] CHOW V. T., MAIDMENT D., MAYS L. W. (1988) — *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. 512p
- [6] THORNDHAL S., JOHANSEN C., SCHAARUP-JENSEN K. (2006) — Assessment of runoff contributing catchment areas in rainfall runoff modelling. *Water Science & Technology*. **54** 59-56
- [7] NRCS (2004) — Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *Hydrology National Engineering Handbook, USDA*. **630(10)**
- [8] GAREN D. C., MOORE D. S (2005) — Curve number hydrology in water quality modeling : uses, abuses, and future directions. *Journal of the American Water Resources Association*. **41** 377-388
- [9] ARCHAMBEAUDEWALS P.B., DETREMBLEUR S., ERPICUM S., PIROTON M. (2004) — A set of efficient numerical tools for floodplain modeling. *Shallow Flows*, Balkema. 549-557
- [10] DEWALS B. J., KANTOUSH S. A., ERPICUM S., PIROTON M., SCHLEISS A. J. (2008) — Experimental and numerical analysis of flow instabilities in rectangular shallow basins. *Environ. Fluid Mech.* **8** 31-54
- [11] DEWALS B. J., ERPICUM S., ARCHAMBEAU P., DETREMBLEUR S., PIROTON M. (2008) — Hétérogénéité des échelles spatio-temporelles d'écoulements hydrosédimentaires et modélisation numérique.. *Houille Blanche-Rev. Int.* **5** 109-114
- [12] ERPICUM S. (2006) — *Optimisation objective de paramètres en écoulements turbulents à surface libre sur maillage multibloc*. Thèse de Doctorat, Université de Liège. 356p
- [13] ARCHAMBEAU P. (2006) — *Contribution à la modélisation de la genèse et de la propagation des crues et inondations*. Thèse de Doctorat, Université de Liège. 423p
- [14] MARTZ L. W., GARBRECHT J. (1999) — An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. *Computers & Geosciences*. **25** 835-844
- [15] CALLOW J. N. (2007) — How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis ?. *Journal of Hydrology*. **332** 30-39
- [16] SAUNDERS W. (1999) — Preparation of DEMs for use in environmental modelling analysis. *1999 ESRI User Conference, San Diego, California*.
- [17] RAWLS W. J., BRAKESIEK D. L. (1989) — Estimation of soil water retention and hydraulic properties. *Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling*, Kluwer Academic Publishers. 275-300
- [18] NEARING M. A., LIU B. Y., RISSE L. M., ZHANG X. (1996) — Curve numbers and Green-Ampt effective hydraulic conductivities. *Water Resources Bulletin*. **32**
- [19] BOYD M. J. (1993) — Pervious and impervious runoff in urban catchments. *Hydrological Sciences Journal*. **38** 463-478
- [20] KOUTSOYANNIS D. (2003) — Rainfall disaggregation methods : Theory and applications. *Workshop on Statistical and Mathematical Methods for Hydrological Analysis, Rome*.
- [21] IGN Base de données topographiques Top10v de l'IGN (Origine de l'information : MRWDGRNE).
- [22] SPGE (2007) — *Plans d'Assainissement par Sous-bassins Hydrographiques – document de travail - : mise à jour juin 2007*. SPGE.
- [23] COSANDEY C. (1996) — Surfaces saturées, surfaces contributives : localisation et extension dans l'espace du bassin versant. *Hydrological Sciences Journal*. **41** 751-761