

Le graphe hydrologique urbain : structuration de données pour déterminer le cheminement de l'eau dans la ville

Aleksandra Barczak

Laboratoire ThéMA UMR 6049, CNRS/Université de Bourgogne

Boulevard Gabriel – 21000 Dijon, France

aleksandra.barczak@u-bourgogne.fr

MOTS-CLÉS

Ruissellement pluvial urbain
Graphe hydrologique
Modèle conceptuel de données
SIG

KEY WORDS

Urban runoff
Hydrological graph
Conceptual data model
GIS

RÉSUMÉ

Le ruissellement pluvial se situe parmi les risques urbains à forte composante anthropique. Cette communication se propose d'apporter un élément d'évaluation de l'aléa ruissellement à travers une analyse d'un processus hydrologique élémentaire : le cheminement de l'eau depuis les points où elle tombe sur la surface du bassin versant jusqu'à son exutoire. Pour retracer le parcours de l'eau à travers la ville une procédure de construction d'un graphe hydrologique urbain sera proposée. Grâce à l'analyse des réseaux il nous sera possible de décrire le cheminement de l'eau en trois dimensions, en tenant compte de la formation du ruissellement sur les surfaces urbaines ou naturelles, du ruissellement concentré sur les versants et sur les routes et enfin de son parcours souterrain avant de gagner le milieu récepteur. L'information spatiale obtenue ainsi sera par la suite exploitée pour étudier différents paramètres hydrologiques, pour analyser la morphologie des réseaux et enfin elle servira de base pour la mise en place d'un modèle hydrologique.

ABSTRACT

The urban hydrological graph: structuralization of data to determine the water flow path in the city

The urban runoff is one of urban risks characterised by a high human component. This communication proposes an element for evaluation of runoff hazard through an analysis of an elemental hydrological process: the flow path between a place where the water drops on the watershed surface and its outlet. To draw the travel of water through the city, a procedure of construction of an urban hydrological graph will be proposed. Network analysis allows us to describe the flow path in three dimensions taking into account the runoff formation on urban surfaces, the concentrated flow through the roads and the underground flow in the sewer system. Afterward, the spatial information obtained in this way will be exploited to study different hydrological parameters, to analyse the network structure and will give a basement for a hydrological model.

1. Introduction

Le milieu urbain est un lieu de concentration des risques majeurs naturels et technologiques (Dubois-Maury et Chaline, 2002). Parmi eux le ruissellement pluvial se caractérise par une forte composante anthropique amplifiant l'«aléa¹» et déterminant la vulnérabilité du territoire et des populations face à ce risque. Les grandes surfaces imperméables rencontrées dans les villes ont une importance incontestable dans la formation de ce phénomène (Scarwell et Laganier, 2004). En effet, l'étalement et la densification des tissus urbains contribuent à l'artificialisation des surfaces et du proche sous-sol qui rend les événements pluvieux redoutables. En même temps, la pression exercée par l'urbanisation rend les territoires et les populations qui les occupent toujours plus vulnérables, face au risque. Pour répondre aux défis de la prévention et de la gestion des inondations urbaines, toute démarche repose sur une évaluation de ces deux composantes du risque.

Les connaissances des phénomènes, leurs causes et leurs modalités de survenance constituent un élément essentiel. Pour cette raison l'aléa est la composante du risque la plus étudiée. Différentes approches : hydro-géomorphologique, historique, basée sur la modélisation hydraulique et hydrologique, permettent aujourd'hui d'étudier l'aléa en fonction de caractéristiques du territoire, des objectifs assignés à ces études et de moyens disponibles. Bien qu'il soit mieux connu et analysé depuis plus longtemps que le deuxième volet de l'étude du risque (la vulnérabilité), la recherche méthodologique sur l'aléa se poursuit avec l'apparition de nouvelles approches et un intérêt porté sur des secteurs spécifiques, parmi lesquels le milieu urbanisé (Ledoux, 2006). Cette communication présentera une partie d'une étude plus large consacrée à l'élaboration d'une méthodologie d'évaluation du risque inondation en milieu urbain. Il s'agit d'apporter des éléments à l'analyse de la circulation de l'eau en ville et à la spatialisation des phénomènes de ruissellement pluvial urbain en proposant une méthode de détermination du cheminement de l'eau en ville. Par la suite, les résultats de cette démarche seront restitués sous forme de carte – outil central de la traduction spatiale de la connaissance de l'aléa – non seulement dans une optique scientifique, mais aussi dans celle de l'information des populations concernées et de la concertation parmi les acteurs de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau. Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité viendra compléter le dispositif. L'étude de l'aléa n'est donc pas une fin en soi, elle constitue un socle pour la définition et la réalisation de la politique de prévention.

¹ La notion de l'aléa est utilisée ici pour désigner le phénomène destructeur observé (Beck, 2006), même si dans le cas de ruissellement pluvial urbain les notions d'aléa et de vulnérabilité sont difficiles à distinguer. Ce phénomène étant en grande partie provoqué par l'homme, il n'est pas évident de le considérer comme aléatoire.

2. Modéliser le comportement hydrologique de la ville : outils de réflexion et optique de prévention

Si l'on s'intéresse à l'étude des hydrosystèmes urbains, on est confronté à nombre de particularités et de difficultés qui dépassent le champ traditionnel de l'hydrologie continentale. Pour cette raison, avant de détailler la méthode que nous proposons pour étudier la circulation de l'eau en ville, il convient d'évoquer les conséquences de l'urbanisation sur le cycle de l'eau, ainsi que les spécificités associées à la nature de cet objet complexe qu'est la ville.

Le phénomène urbain influe sur le cycle de l'eau à toutes ses étapes en termes de quantité et de qualité de la ressource (figure 1). Dans un premier lieu, l'urbanisation affecte tous les termes du bilan de l'eau : évapotranspiration, précipitations, ruissellement, infiltration. Parmi ces composantes du cycle de l'eau, c'est le ruissellement qui voit ses conditions les plus modifiées par la ville en quantité (diminution des volumes infiltrés, accélération de la vitesse de l'eau) et en qualité (les polluants lessivés des surfaces urbaines). Une des conséquences les plus visibles de l'urbanisation est l'imperméabilisation des sols. Ce phénomène se traduit par une augmentation des volumes d'eau ruisselés, il empêche l'infiltration et ne permet pas la réalimentation des nappes. Une autre conséquence de l'urbanisation est un accroissement de la vitesse des écoulements, provoqué par le remplacement du réseau hydrologique naturel, complexe et sinueux, par un réseau artificialisé et un réseau d'assainissement aux tracés souvent rectilignes. L'urbanisation implique aussi la construction d'obstacles à l'écoulement en superposant au relief naturel un « relief » artificiel. Les différentes modifications des conditions de ruissellement peuvent entraîner une augmentation considérable des débits de pointe et une diminution des temps de réponse des bassins versant urbains qui sont déterminants pour l'augmentation du risque d'inondation. En second lieu, l'impact de l'urbanisation se traduit par la circulation des flux hydriques, l'un destiné à la consommation domestique et industrielle et l'autre constituant les résidus, les eaux usées issues de la consommation urbaine auxquelles se joignent à leur tour les eaux pluviales, ces dernières, elles aussi plus ou moins affectées par la ville de point de vue de leur quantité et de leur qualité. Ces flux hydriques ont un exutoire commun, le réseau hydrologique naturel. Or, les rivières urbaines ont été à partir du milieu du XVIII^{ème} siècle fortement artificialisées. Les conséquences de cette artificialisation s'expriment, outre les modifications des écoulements, par la réduction de la perception des rivières par les citoyens aux seules nuisances. Au même titre l'aménagement et la domestication des rivières enfermées entre les digues ont encouragé l'implantation des éléments vulnérables dans les zones inondables, ce qui peut se révéler catastrophique lors de la survenance d'une crue

exceptionnelle (dont le niveau dépasserait le niveau des digues). L'artificialisation des rivières urbaines a aussi de grandes conséquences pour le fonctionnement écologique des hydrosystèmes : eutrophisation des milieux aquatiques, diminution de la biodiversité, isolation des rivières de leurs zones humides, etc. Enfin, les modifications du cycle de l'eau mentionnées ci-dessus et résumées par la figure 1 se distinguent par

leur caractère progressif étroitement lié aux phénomènes de l'étalement et de la densification des tissus urbains, ou plus généralement à la nature évolutive de la ville. À ces modifications du cycle de l'eau s'ajoute la spécificité de la perception et des usages de l'eau en milieu urbain et une très haute vulnérabilité de ces espaces face aux inondations (Scarwell et Laganier, 2004 ; Chocat,1997).

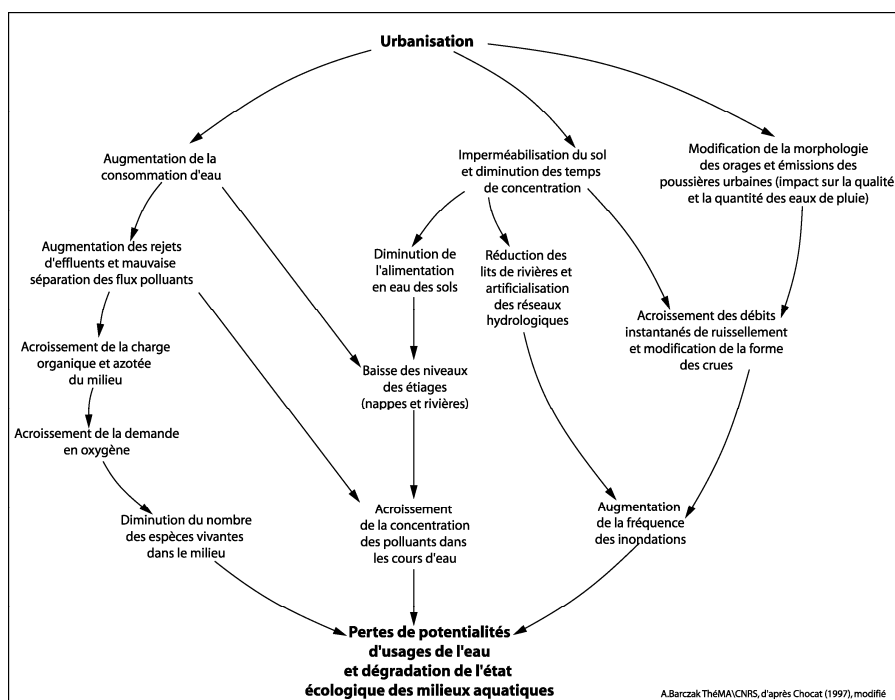


Figure 1. Impacts de l'urbanisation sur le cycle de l'eau.

Un cadre conceptuel spécifique, né de l'ingénierie de l'assainissement des agglomérations du XIX^{ème} siècle, amorcé dans la première moitié du XX^{ème} siècle et élaboré à plus grande échelle à partir des années 70, a été nécessaire pour appréhender la partie du cycle de l'eau affectée par l'urbanisation ou affectant le fonctionnement de la ville.

Dans une première période l'hydrologie urbaine s'intéressait surtout aux conséquences de l'urbanisation sur les flux et les volumes d'eau pluviale, ainsi qu'à l'élaboration de nouvelles techniques pour les contrôler. Un large éventail d'outils de modélisation a été développé pour analyser les processus hydrologiques en ville en intégrant les particularités de cet objet d'étude mentionnées ci-dessus. Plusieurs difficultés se présentent néanmoins lors de la modélisation hydrologique en milieu urbain, telles les difficultés pour expérimenter et pour valider les modèles, surtout quand il s'agit de phénomènes extrêmes. Les faibles dimensions des bassins versants étudiés en milieu urbain imposent des échelles spatiales et temporelles particulièrement fines. Les difficultés sont également liées au caractère aléatoire de la pluie, au problème de la représentation spatiale du bassin versant (2D) et à la

liaison entre le ruissellement sur les surfaces urbaines (2D) et l'écoulement concentré (1D) (Chocat, 1997).

Jusqu'aux années 60, l'hydrologie urbaine contribuait peu à la mise en place des réseaux d'eau. À cette époque les conséquences de l'accélération de l'urbanisation sur la gestion des eaux en ville commencent à devenir une évidence. La prise de conscience de l'inadaptation des systèmes réalisés jusque-là a précipité le développement de l'hydrologie urbaine dans le champ scientifique. Avec elle s'est formé le concept hydraulique de l'assainissement, qui s'appuie sur la modélisation mathématique des processus hydrologiques dans les bassins versants urbanisés et sur l'hydraulique des régimes transitoires. Ce concept recommandait le ralentissement des écoulements sur les surfaces urbanisées pour réduire les débits de pointe de ruissellement et il a contribué à la restitution de l'eau en ville et à la valorisation des espaces inondables. Dans les années 80, alors que la problématique environnementale gagnait de l'intérêt, les préoccupations concernant les conséquences du fonctionnement des réseaux d'assainissement sur le milieu naturel ont commencé à croître. Progressivement, à partir des années 80 un courant intéressé aux impacts des rejets

urbains sur le milieu naturel a vu le jour. Une approche dite globale s'est développée visant à garantir la protection des enjeux socio-économiques contre les nuisances du cycle de l'eau et la protection des milieux récepteurs. Dans cet esprit le contrôle des débits de ruissellement ne relève plus uniquement des techniques d'assainissement, mais de l'aménagement de l'espace urbain que l'hydrologie urbaine tient à promouvoir (Collectif, 1994).

Aujourd'hui, l'hydrologie urbaine s'inscrit dans la réflexion générale sur le développement durable et la recherche sur les conséquences de l'urbanisation sur toutes les étapes du cycle de l'eau et sur l'impact des rejets urbains sur le milieu récepteur figurent parmi ses premières préoccupations. Simultanément, l'hydrologie urbaine trouve sa manifestation dans le développement de nouvelles techniques d'aménagement de l'espace cherchant à protéger les agglomérations contre diverses nuisances liées à l'eau et à protéger le milieu naturel contre les pressions urbaines. Trois axes principaux s'esquissent dans ce domaine. Tout d'abord, le développement des techniques alternatives d'assainissement ayant pour but de se rapprocher le plus possible du cycle naturel de l'eau. Ensuite, la recherche des éléments de réponse pour une meilleure gestion des inondations urbaines à travers les outils réglementaires et structurels. Il s'agit plus généralement de considérer les hydrosystèmes urbains et surtout les rivières urbaines et le ruissellement pluvial comme des composantes structurantes de l'aménagement urbain, de les réintégrer dans l'espace urbain et de leur redonner une place dans la perception des citoyens. Enfin, elle promeut la prise en compte de l'ensemble des rejets urbains et de leurs impacts réels sur le milieu naturel.

Cette communication pose une interrogation concernant la circulation de l'eau dans la ville dans une perspective d'évaluation du risque inondation. Elle a pour ambition d'apporter un outil d'investigation simple et informatif qui, dans le domaine de la planification, permettrait aux gestionnaires de l'eau et aux aménageurs d'appuyer leurs décisions sur une typologie du territoire, synthétisant l'information spatiale dont on dispose pour décrire le risque d'inondation. Un tel outil favoriserait aussi le dialogue entre les différents acteurs du risque, que ce soit les

divers usagers de l'eau, les riverains, ou encore les décideurs, pour mieux intégrer le risque de ruissellement dans les projets urbains.

Dans un premier temps nous proposons un outil de spatialisation du ruissellement urbain basé sur la modélisation hydrologique et enrichi par les apports de l'analyse spatiale. Par la suite, une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité des espaces urbains face au ruissellement viendra compléter le dispositif afin de fournir une analyse du risque prenant en compte les conditions de ruissellement aussi bien que les enjeux présents sur le territoire et leur sensibilité aux événements pluvieux.

La démarche que nous proposons pour spatialiser l'aléa ruissellement se décline en cinq étapes. Après une phase de collecte de données, une analyse des caractéristiques du territoire permet de déterminer les coefficients de ruissellement pour la zone d'étude. Ensuite le cheminement de l'eau dans la ville peut être décrit grâce au concept de graphe hydrologique urbain. Ce dernier permet de calculer le temps que l'eau met à parcourir le chemin entre l'endroit où elle tombe et un exutoire. Ces temps de parcours permettent à leur tour de construire des hydrogrammes unitaires qui caractérisent la réponse des bassins versants à une impulsion pluvieuse. Cette communication s'efforcera d'exposer une étape préalable à la modélisation hydrologique : la méthode appliquée pour reconstruire la circulation de l'eau dans un réseau hydrologique urbain.

3. Structuration de l'information géographique pour une étude hydrologique de la ville

La première phase de notre démarche consiste à constituer une base de données qui décrira toutes les composantes d'un hydrosystème urbanisé. Cette base de données rassemblera toutes les informations utiles pour une réflexion sur la circulation de l'eau en ville, et décrira tous les éléments de la ville susceptibles de structurer ou affecter les écoulements. Le tableau 1 synthétise les types et les sources d'informations mobilisés pour étudier la circulation de l'eau dans un système urbain.

Type de données	Occupation des sols	Type et nature des sols	Conditions de ruissellement			
			Bâti	Parcellaire	Topographie	Réseau hydrologique
			Réseau routier			
Source de données	Image satellite ERS	IGCS - BD "Sols et territoires de Bourgogne"	Cadastre		MNT - IGN	BD Carto

Structuration des écoulements

Tableau 1. Données utilisées

Afin de décrire précisément les objets retenus pour l'étude, leurs caractéristiques et les relations entre eux, nous avons structuré les données employées pour construire le réseau hydrologique urbain au sein d'un modèle conceptuel de données à l'aide du langage UML (Bédard, 1999).

Le modèle général conçu pour l'étude du risque de ruissellement urbain comporte deux grands paquetages : un décrivant la vulnérabilité et mobilisant les données concernant les enjeux humains, environnementaux et matériels exposés et l'autre décrivant l'aléa et mobilisant les données concernant le territoire physique et le graphe hydrologique urbain. Les deux grands paquetages serviront à déterminer un zonage du risque. Dans le cadre de cette communication seul le paquetage concernant l'aléa sera présenté (figure 2)

Le paquetage destiné à la modélisation conceptuelle de l'aléa est composé de deux sous-paquetages. Le premier représente ce que nous avons appelé pour les besoins de

l'étude le territoire physique. Il permet de regrouper les objets surfaciques tels que les parcelles et leurs caractéristiques qui déterminent les conditions de ruissellement. Dans cette étude une unité spatiale spécifique et essentielle a été introduite pour décrire le territoire en vue d'une modélisation hydrologique. Il s'agit de l'élément hydrologique (EH) (figure 3). On considère que toute la pluie qui tombe sur le territoire est interceptée par ces éléments, et que chacun d'eux possède des caractéristiques géométriques et physiques qui déterminent les conditions de la transformation de la pluie en ruissellement (Rodriguez, 1999 ; Rodriguez *et al.*, 2003). La totalité du territoire étudié a été couverte par les éléments hydrologiques. Sur le territoire de l'agglomération un élément hydrologique est défini comme le regroupement d'une parcelle et d'un tronçon de route adjacent à cette parcelle. Dans ce cas la couche « bâti » est nécessaire pour caractériser les EH puisqu'elle contient l'information sur les surfaces imperméables de la parcelle, la source principale du ruissellement.

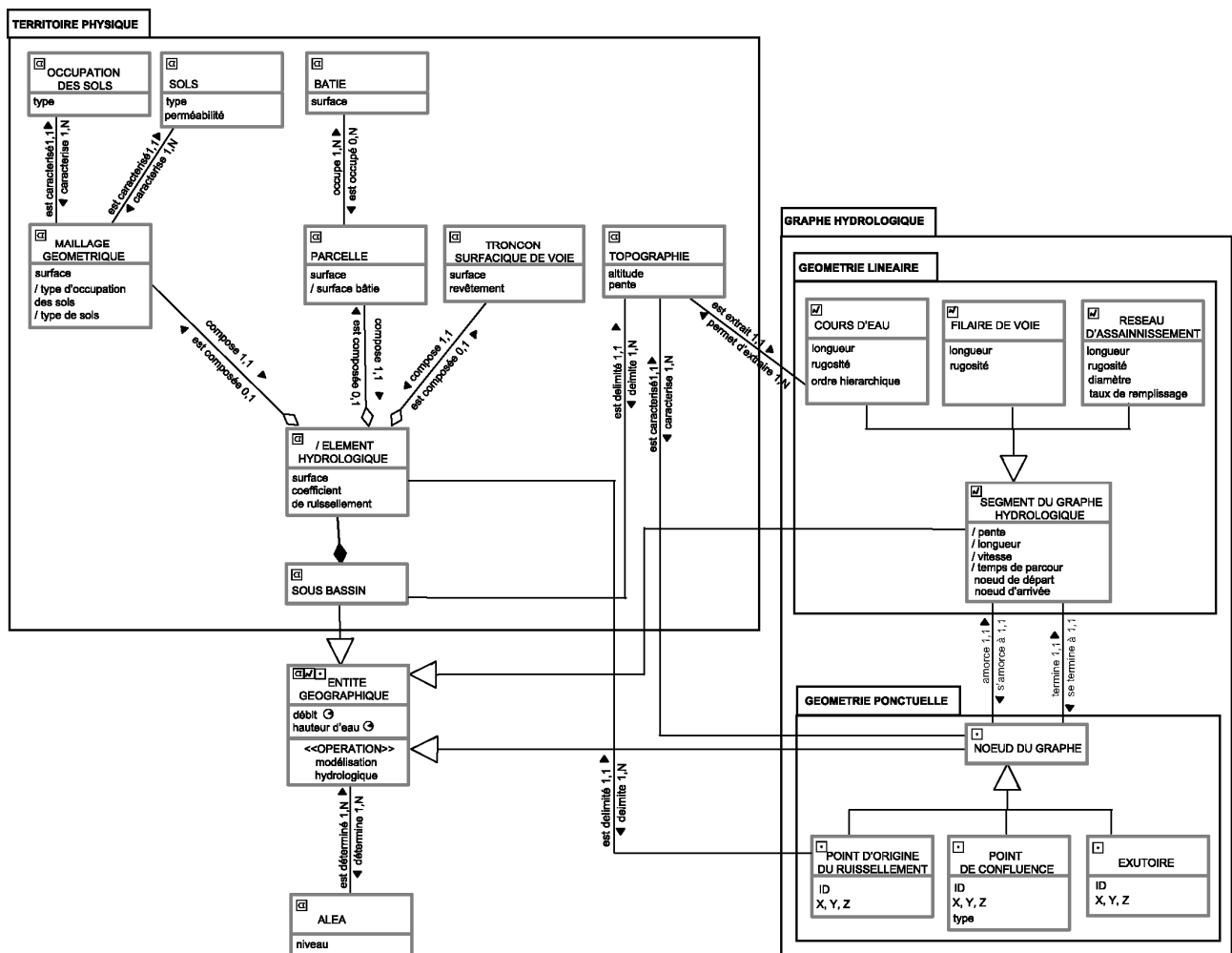


Figure 2. Modélisation conceptuelle de données concernant l'aléa ruissellement pluvial.

Pour la partie des bassins située hors de l'agglomération les données concernant les éléments que nous considérons comme structurant les écoulements en milieu urbain (les parcelles cadastrales, le réseau viaire, le réseau d'assainissement) ne sont pas disponibles. Dans ce cas, les EH seront constitués par les mailles d'une grille de 100 sur 100 m. Les EH, qu'ils soient liés aux parcelles ou aux mailles de la grille, seront regroupés dans les sous-bassins versants délimités en fonction de la topographie.

Le deuxième sous-paquetage du modèle conceptuel de l'aléa concerne le graphe hydrologique. Il regroupe d'une part les objets à géométrie linéaire : le réseau hydrologique naturel, le filaire de voie et le réseau

d'assainissement. Ces trois réseaux constituent les segments du graphe hydrologique qui sont renseignés par leur longueur, pente, vitesse de l'eau et temps de parcours. Pour chacun de ces segments, le nœud amont et le nœud aval sont trouvés. D'autre part, ce paquetage contient les objets caractérisés par une géométrie ponctuelle. Parmi les objets ponctuels, deux types de nœud sont particulièrement importants pour la construction du graphe. Il s'agit des points d'origine du ruissellement qui correspondent au centre de gravité de la parcelle ou de la maille de la grille pour les terrains non bâtis et au centre de gravité du bâtiment le plus grand pour les parcelles bâties. À partir de ce point la contribution de la parcelle au ruissellement va circuler dans le réseau.



Figure 3. Élément hydrologique.

Le second type particulier de nœud correspond aux exutoires vers lesquels l'eau sera acheminée. Ces exutoires seront identifiés comme points de déversement du réseau d'assainissement vers le milieu récepteur. Dans ce groupe d'objets se trouvent également les nœuds de connexion entre les tronçons des réseaux. Tous ces éléments constituent les nœuds du graphe connus par leur identifiant, leurs coordonnées et leur altitude.

Les paquetages décrits ci-dessus sont interconnectés. Les éléments linéaires et ponctuels du graphe sont liés puisque les nœuds du graphe amorcent et terminent les segments du graphe. Il existe aussi des liens entre le paquetage « graphe » et le paquetage « territoire physique ». En effet, la topographie permet d'extraire le réseau hydrologique et de caractériser les nœuds, alors que les points d'origine du ruissellement sont déterminés en fonction des EH. Les bassins, les segments et les nœuds constituent les entités géographiques pour lesquelles la modélisation hydrologique sera effectuée, elles seront caractérisées

par des paramètres hydrologiques évoluant dans le temps.

4. Méthode de détermination du cheminement de l'eau dans la ville

Notre approche générale pour étudier le comportement de la ville par temps de pluie se base sur l'analyse des hydrogrammes unitaires morphologiques (HUM), déterminés pour les bassins versants urbains de petite taille (Rodriguez, 1999). Cette approche mobilise le concept classique dans l'hydrologie – celui d'hydrogramme unitaire qui résume en une image synthétique et représentative la réponse du bassin à une pluie efficace, unitaire et uniforme (Sherman, 1932). Plus précisément l'HUM fait référence au concept d'hydrogramme géomorphoclimatique (Rodríguez-Inturbe *et al.*, 1982 ; Rodríguez-Inturbe et Rinaldo, 1997) introduit comme un des nombreux développements de la théorie de l'hydrogramme unitaire. Ce concept permet de rendre compte de la

réponse hydrologique des bassins en fonction de la morphologie du réseau et des sollicitations pluviométriques.

L'HUM est une forme simple d'hydrogramme unitaire distribué pour le calcul de laquelle trois hypothèses sont introduites. La première suppose que les HUM sont déterminés comme résultat d'une pluie unitaire et uniforme. La deuxième suppose que les surfaces contributives correspondent à des surfaces imperméables. La troisième enfin suppose que la fonction de réponse h_i de l' $i^{\text{ème}}$ élément hydrologique à une averse peut être exprimée par une fonction caractéristique f_i dépendante du temps de parcours dans le réseau. Cette dernière hypothèse est équivalente à ignorer la dispersion hydraulique le long des cheminements dans le réseau, ce qui peut se justifier par le fait que la taille des EH est négligeable par rapport à la taille des bassins (Rodriguez *et al.*, 2003).

L'HUM peut être défini comme une fonction de transfert morphologique qui permet de calculer le débit à l'exutoire d'un bassin dans un instant t , exprimé par la somme des apports résumés par les coefficients de ruissellement en fonction des surfaces contributives et de la fonction de réponse qui se réfère au temps de parcours dans le réseau (Rodriguez *et al.*, 2003) :

$$Q_k = \sum_{i=1}^{n_e} c_i a_i h_i^k$$

– où Q_k est la valeur discrète du débit à l'exutoire au $k^{\text{ème}}$ pas de temps, a_i la surface des EH, c_i le coefficient de ruissellement ;

– où la fonction de réponse est $h_i(t) = f_i(t - t_1)$

– ou sous une forme discrète : $h_i^k = 1$ si $t \in [(k-1)\Delta t, k\Delta t]$ sinon $h_i^k = 0$

L'HUM représente une réaction du bassin à une impulsion pluvieuse unitaire et il correspond à la distribution des temps de parcours de l'eau dans le réseau à l'exutoire ou en tout nœud du réseau. La construction des HUM nécessite donc une bonne connaissance des cheminements de l'eau dans le réseau hydrologique urbain. L'application de cette méthode nous permettra d'obtenir des valeurs de débits à l'exutoire des bassins versants et à tous points du réseau, suite à une impulsion pluviométrique. De manière générale, nous pouvons considérer que la méthode de l'hydrogramme unitaire possède une valeur prévisionnelle puisqu'elle permet de déterminer l'hydrogramme quelle que soit la pluie. Cette méthode permet de définir la relation entre la pluie et le débit grâce à l'analyse des couples entrée-sortie (Chocat, 1997). Plus particulièrement, la méthode de l'HUM, appuyée sur les informations concernant la structure du réseau et les conditions de ruissellement, permet de prendre en compte des caractéristiques des bassins versants et leur évolution, elle possède donc aussi une

valeur décisionnelle. Dans le cadre de cette communication nous nous intéressons à une étape préalable à la modélisation hydrologique, il est néanmoins nécessaire de mentionner ici la nécessité de valider le modèle appliqué et de recourir à une étude de sa sensibilité.

Pour procéder à une description fine de la circulation de l'eau dans les bassins versants urbains nous allons tout d'abord proposer quelques hypothèses concernant les conditions de cette circulation :

– Nous considérons que l'eau tombée sur un EH hors l'agglomération urbaine emprunte un chemin en fonction de la topographie jusqu'à ce qu'elle atteigne la partie urbaine du réseau pour continuer son parcours vers l'exutoire, à l'exception de celle précédemment interceptée par un cours d'eau naturel.

– Nous supposons que l'eau tombée sur un EH dans l'agglomération urbaine est acheminée de la parcelle vers la voirie ou vers le réseau d'assainissement. À la sortie de la parcelle, l'écoulement surfacique sera structuré par le réseau viaire. Le réseau d'assainissement, qu'il soit unitaire ou séparatif, structure l'écoulement souterrain.

– Enfin notre dernière hypothèse est que le réseau hydrographique naturel constitue un exutoire du réseau d'assainissement et/ou du cheminement de l'eau sur la voirie. Les composantes du réseau hydrologique urbain ainsi décrit, leurs caractéristiques et leurs relations seront maintenant abordées par l'introduction de la notion de graphe hydrologique urbain reconstruit grâce aux techniques de la géomatique.

Nous proposons de construire un graphe hydrologique urbain en reprenant les travaux menés au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Rodriguez, 1999 ; Rodriguez *et al.*, 2003), en modifiant un certain nombre de règles appliquées et en proposant de nouvelles solutions techniques. Le graphe hydrologique urbain peut être défini comme la règle d'écoulement pour acheminer les eaux vers l'exutoire d'un bassin versant. Cette règle s'exerce sur les objets géographiques linéaires qui représentent les segments de voies, de réseau d'assainissement et de réseau naturel. La construction du graphe consiste à relier les segments de ces réseaux entre les points d'origine du ruissellement et l'exutoire de façon correcte du point de vue de l'écoulement de l'eau. Le graphe hydrologique urbain proposé dans cette étude correspond à l'articulation entre trois types de cheminement de l'eau dans un bassin versant urbain. La première composante du graphe hydrologique urbain est le graphe hydrologique topographique. Dans ce cas, qui concerne les parties amont des bassins partiellement situés en dehors de l'agglomération, l'eau circule sur les versants en fonction de la pente pour rejoindre le réseau urbain. Pour définir le cheminement de l'eau nous procédons à l'extraction du réseau hydrologique à partir d'un modèle numérique de terrain et à sa vérification en fonction du réseau hydrologique de référence (BD

CARTO, IGN). Comme pour toutes les composantes du graphe nous déterminerons pour chaque tronçon un nœud amont et un nœud aval. Chaque tronçon sera également connu par sa longueur, sa pente et sa

rugosité. Cette composante du graphe hydrologique urbain est définie en fonction du relief contrairement aux deux autres qui sont construites en fonction de la morphologie urbaine, comme l'illustre la figure 4.

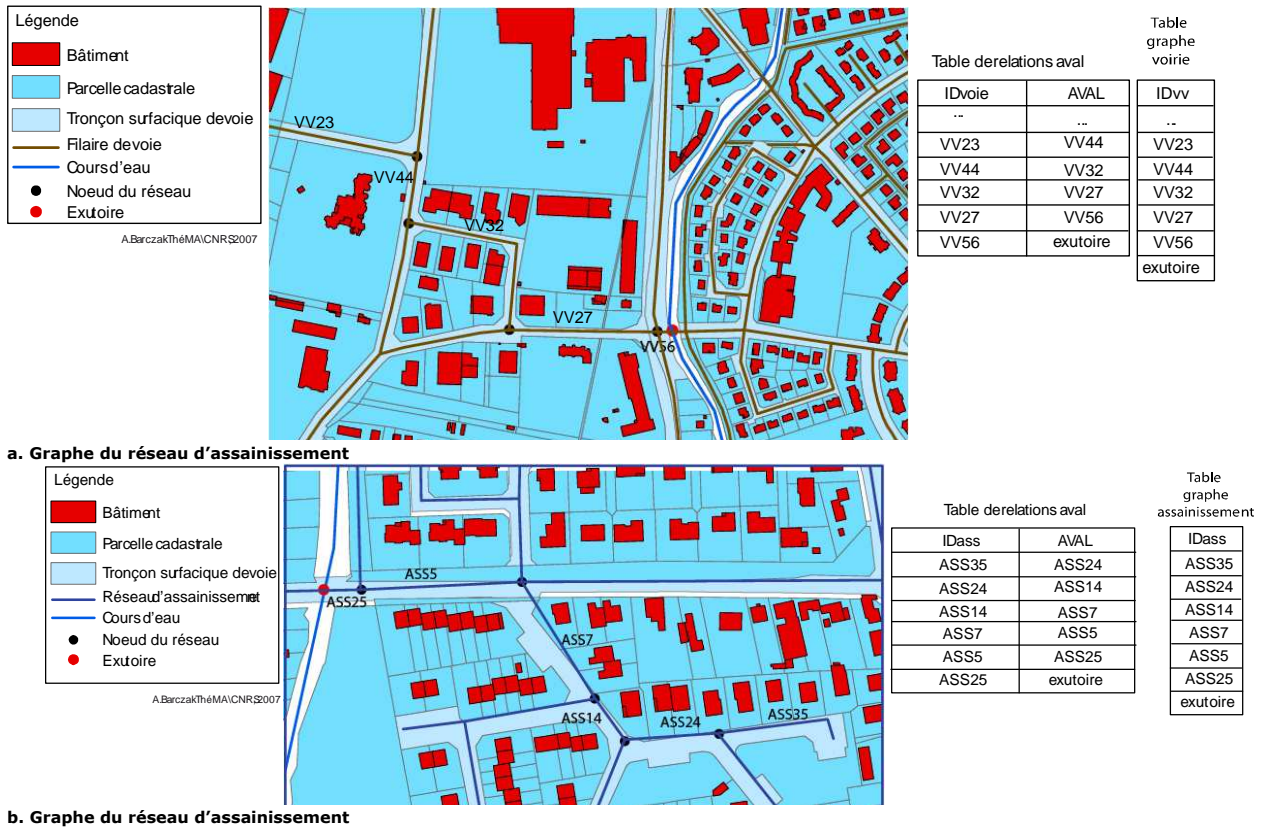
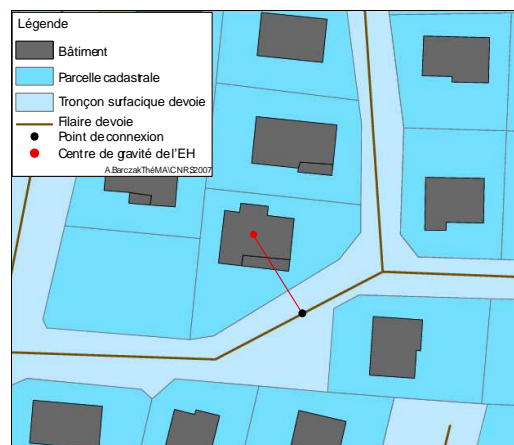


Figure 4. Circulation de l'eau en fonction de la morphologie urbaine et graphe de la voirie

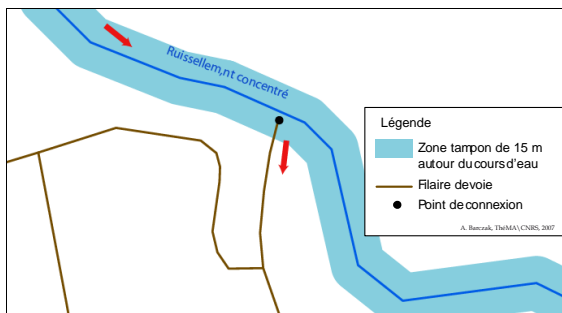
La deuxième composante du graphe correspond au graphe de la voirie. Dans cette configuration l'eau circule sur la surface des routes vers le réseau d'assainissement. Pour déterminer le parcours de l'eau dans la ville un chemin entre le nœud de départ et l'exutoire du bassin sera recherché en fonction de la pente et sur terrain plat en fonction de la distance. Pour chaque tronçon, un tronçon aval sera déterminé en examinant la pente des tronçons connectés. La troisième composante du graphe est le graphe du réseau d'assainissement. Dans ce cas l'eau circule dans le réseau d'assainissement vers l'exutoire du bassin. Pour chaque tronçon, un tronçon aval sera déterminé en examinant la pente des tronçons connectés. Pour cette composante du graphe, en plus des caractéristiques mentionnées précédemment le taux de remplissage des conduites sera connu. Les composantes du graphe sont reliées entre elles à travers les connexions suivant des règles particulières, ces différents types de connexions sont résumés par la figure 5.

tronçon connecté. Le deuxième type de connexion est celle entre le ruissellement concentré sur les versants et la voirie (figure 5b). Cette connexion sera recherchée en appliquant une zone tampon autour des cheminements du ruissellement surfacique linéaire pour intercepter le tronçon de route le plus proche du nœud amont du tronçon de cheminement naturel.

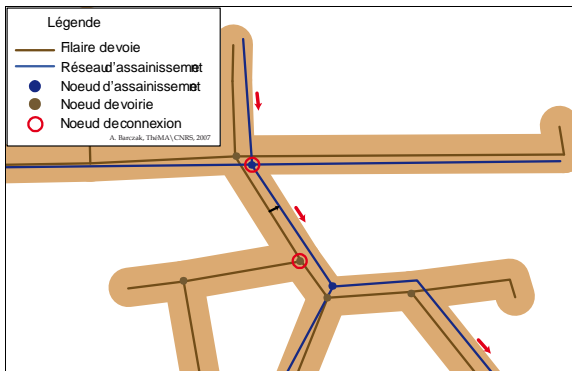
La première connexion se fait entre un EH et le réseau (figure 5a). Cette connexion sera représentée par la distance la plus courte entre le point d'origine du ruissellement et le réseau. L'apport de l'eau correspondant à l'EH sera attribué au nœud amont du



a. Connexion entre EH et le réseau



b. Connexion entre le ruissellement concentré et la voirie



Connexion entre le réseau viaire et le réseau d'assainissement

Figure 5. Connexions reliant les composantes du graphe hydrologique urbain.

L'apport d'eau correspondant à ce tronçon du cheminement naturel sera attribué au nœud amont du tronçon de voie connecté, à condition que ce cheminement ne corresponde pas à un cours d'eau, auquel cas l'eau sera évacuée vers l'aval du bassin par ce

cours d'eau naturel. Le troisième type de connexion relie le réseau viaire au réseau d'assainissement (figure 5c). Un tampon autour d'un segment routier permettra de recenser les tronçons d'assainissement à proximité. Le tronçon d'assainissement présentant la plus grande longueur dans le buffer sera associé au segment de route. L'apport d'eau correspondant au nœud aval du tronçon de voirie sera attribué au nœud amont du tronçon du réseau d'assainissement. Un cas particulier se présente lorsque pendant une averse la capacité du réseau d'assainissement est atteinte (figure 6). À ce moment le débordement est localisé sur un segment d'assainissement et le tronçon de route le plus proche est recherché pour attribuer l'excès d'eau à l'écoulement surfacique. La connexion se fait au nœud amont du segment de la voirie. L'eau continue le parcours vers l'exutoire, d'un côté dans le réseau d'assainissement, et de l'autre sur les routes.

Les différents types de cheminement et de connexions présentés ci-dessus sont des éléments constitutifs du graphe hydrologique urbain qui s'emboîtent de manière à créer une représentation du parcours de l'eau en milieu urbain entre l'endroit où elle tombe sur la surface du bassin jusqu'à celui où elle se jette dans le milieu récepteur. Le cheminement de l'eau dans chaque sous-bassin versant s'effectue vers son exutoire. Ces sous-bassins sont intégralement couverts par les EH. Toute eau interceptée par la surface d'un bassin circule le long du graphe à partir des EH vers un exutoire. Des tables relationnelles (figure 5) seront établies afin de reconstruire le parcours de l'eau tronçon par tronçon et de décrire les connexions entre les différents types de réseau.

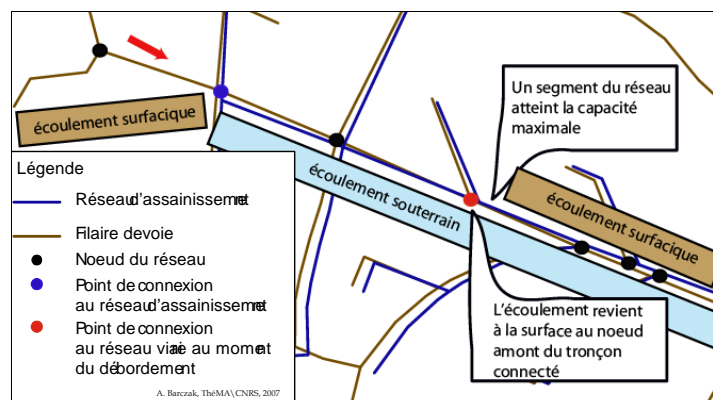


Figure 6. Circulation dans le graphe en cas de débordement.

L'application de notre démarche se fera principalement sur le territoire de l'agglomération dijonnaise qui est localisé sur les bassins versants des trois affluents de la Saône : de la Tille, de l'Ouche et de la Vouge. Ces trois bassins versants seront décomposés en petits sous-bassins en fonction de la topographie et de la morphologie du réseau d'assainissement. Parmi ces sous-bassins, ceux qui intersectent avec l'agglomération

seront choisis pour l'étude. Dans ces bassins, la circulation de l'eau se fera en fonction de la morphologie urbaine dans l'agglomération alors que la topographie décidera du parcours de l'eau dans les bassins situés en dehors de l'agglomération.

5. Limites liées à la méthode et à la qualité des données

Les premiers tests de la méthode nous ont permis d'identifier certaines limites liées, d'une part aux hypothèses faites pour l'application de la démarche, et d'autre part à la qualité des données. L'étape d'acquisition des données n'étant pas encore achevée, ce premier diagnostic est loin d'être exhaustif, mais il nous donne un premier aperçu des difficultés d'application de la méthode.

En premier lieu nous allons exposer les problèmes posés par l'analyse de la topographie. La première difficulté apparaît à l'étape d'extraction du réseau hydrologique naturel à l'aide d'un algorithme d'extraction automatique à partir d'un MNT. Pour l'analyse du relief nous disposons d'un MNT à résolution planimétrique de 50 mètres avec des altitudes indiquées en mètres. Dans un premier temps nous avons eu recours à un algorithme conventionnel d'écoulement unidirectionnel D8 (Jenson et Domingue, 1988 ; O'Callaghan et Mark, 1984). Deux limites intrinsèques à cette méthode affectent fortement les résultats. La première se traduit par la génération de zones plates liées au comblement des dépressions. La deuxième a pour effet de produire des cheminements parallèles à cause des choix arbitraires de direction d'écoulement faits dans les zones plates (Charleux-Demargne, 2001). Ces limites s'avèrent particulièrement contraignantes pour extraire le réseau sur notre territoire d'étude qui se caractérise par une extension importante des terrains plats dans sa partie Est. Par ailleurs, dans la partie Ouest de la zone d'étude la présence de nombreuses vallées sèches, mais jouant un rôle important pour la concentration de l'écoulement pendant les épisodes pluvieux rend difficile la vérification du réseau extrait à l'aide du réseau de référence. Pour l'instant les essais pour enrichir le protocole en ajoutant une étape de traitement des pixels « puits » et des pixels plats afin de forcer l'écoulement n'ont pas donné de résultats satisfaisants. De nombreux travaux sur le sujet ont prouvé le rôle de la résolution horizontale (Zhang et Montgomery, 1994 ; Wolock et Price, 1994, Xinhao et Zhi-Yong, 1998) et verticale (Kenward *et al.*, 2000) des MNT pour des applications dans le domaine de l'hydrologie. Les difficultés rencontrées se traduisent pour nous par la nécessité d'acquérir une information de haute précision pour l'analyse de la topographie. Il est également envisagé d'appliquer différents algorithmes d'extraction du réseau hydrologique (*eg.* Trucotte *et al.*, 2001 ; Garbrecht et Martz, 1997) afin de les comparer et d'aboutir à une solution optimale pour cette application.

Une deuxième difficulté de même ordre apparaît à l'étape de délimitation des sous-bassins. Pour les besoins de notre méthode, cette délimitation se fait en trois temps. D'abord un algorithme de délimitation automatique des sous-bassins à partir d'un MNT et en fonction de la localisation des exutoires des conduites

de grand diamètre est mis en place. Ensuite nous procédons à une analyse des raccordements des parcelles au réseau d'assainissement. Enfin les deux résultats obtenus sont ajustés et les EH sont regroupés selon leur appartenance aux bassins. Ici encore nous nous heurtons au problème de la qualité des données altimétriques dans un contexte d'extension importante des terrains plats. En effet, si nous voulons délimiter un bassin relativement à son exutoire (O'Callaghan et Mark, 1984), nous avons besoin de déterminer préalablement les directions d'écoulement afin d'identifier les cellules appartenant au bassin et retrouver ainsi les deux lignes de plus grande pente aboutissant à l'exutoire et la ligne de crête les joignant (Charleux-Demargne, 2001).

Un deuxième groupe de problèmes a été identifié lors des premiers examens du réseau viaire et du réseau d'assainissement. En effet, nous avons localisé plusieurs tronçons du graphe pour lesquels plusieurs tronçons sont candidats à l'aval. Cette configuration apparaît plus fréquemment sur le graphe de la voirie, mais elle n'est pas totalement absente sur le graphe du réseau d'assainissement. Notre démarche nécessite la détermination d'un cheminement de l'eau unique pour tous les EH (à l'exception du cas particulier du débordement du réseau d'assainissement). Pour cette raison lorsque plusieurs cheminements sont possibles en aval d'un tronçon, nous allons procéder à un choix parmi les tronçons candidats. Premièrement ce choix se fera en fonction de la pente la plus forte, mais vue la spécificité du territoire étudié discutée précédemment, dans de nombreux cas ce critère apparaît insuffisant. C'est pourquoi, dans la configuration où nous ne pourrions pas recourir à l'intensité de la pente, le calcul du plus court chemin interviendra pour déterminer le cheminement de l'eau. Cette solution étant partielle, il sera nécessaire d'entreprendre une vérification rigoureuse du graphe et de faire des ajustements manuels.

6. Bilan et perspectives

La méthode présentée a pour l'objectif de produire une information spatialisée pour une analyse hydrologique de la réponse de la ville à un évènement pluvieux. À la fin de nos traitements nous disposerons d'un cheminement complet de l'eau à travers la ville. Ce résultat intermédiaire fournira des informations détaillées sur les caractéristiques hydrologiques du territoire et il constituera une base pour la construction d'un modèle hydrologique. Grâce à l'analyse des réseaux, il nous sera possible de décrire le cheminement de l'eau en trois dimensions, en tenant compte de la formation du ruissellement sur les surfaces urbaines, de sa canalisation sur les routes et enfin de son parcours souterrain avant de gagner le milieu récepteur. Les informations concernant le type de réseau et son diamètre nous permettront de tenir compte du phénomène de déversement des réseaux d'assainissement.

Notre approche qui consiste à retracer le parcours de l'eau dans la ville grâce à la construction d'un graphe hydrologique urbain offre des opportunités intéressantes pour l'analyse du fonctionnement hydrologique de la ville. Tout d'abord, elle permet d'acquérir des informations spatialisées sur le bassin. La connaissance fine de la nature du réseau et du cheminement de l'eau permettra de procéder à une analyse de paramètres hydrologiques tels que : la vitesse de l'eau, le temps de transfert, la hauteur d'eau. La connaissance de ces paramètres hydrologiques nous permettra de produire une cartographie du territoire en fonction de sa propension à aggraver ou à réduire un épisode de ruissellement. Parmi ces paramètres les temps de parcours peuvent être analysés plus aisément grâce à leur représentation sous forme d'isochrones.

À partir du graphe nous pouvons également réaliser la classification hiérarchique élaborée par Horton (1945) et par Strahler (1952) qui permet de décrire l'organisation structurelle du réseau à partir des tronçons et des nœuds qui le composent. Grâce à la construction du graphe il est possible de représenter le réseau hydrologique urbain sous forme de branches correspon-

dant chacune à un ordre de classification. Cela permet d'étudier la morphologie du réseau et de faire des comparaisons avec des systèmes naturels. Une analyse de la dimension fractale des réseaux serait aussi intéressante. Cette approche permettrait de rendre compte de la complexité morphologique des réseaux urbains qu'ils soient ramifiés ou non.

Enfin, l'analyse du graphe hydrologique urbain permet de produire une information synthétique à l'exutoire des bassins versants urbains ou à tout autre nœud du réseau concernant la réponse à une impulsion pluvieuse, grâce au calcul des hydrogrammes unitaires morphologiques discutés précédemment.

Une telle démarche, fondée sur une description fine du territoire, apportant des résultats spatialisés, mais aussi synthétiques au niveau du bassin versant, vise une meilleure compréhension du fonctionnement des systèmes urbains et ouvre une perspective pour analyser l'impact de certains facteurs spatiaux (morphologie du réseau, occupation des sols, état des sols, etc.) sur ce fonctionnement.

7. Références bibliographiques

- Beck E., 2006, Approche multi-risque en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin), Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- Bédard Y., 1999, Visual Modeling of Spatial Databases Towards Spatial Extensions and UML, *Geomatica*, 53(2), 169-186.
- Charleux-Demagne J., 2001, Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'Hydrologie. Application à la Caractérisation du Régime de Crues des Bassins Versants, Thèse de doctorat, Université de Marne-la-Vallée - Cemagref-Engref, Montpellier.
- Chocat B. (dir.), 1997, *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*, Lavoisier/Tec&Doc, Paris.
- Collectif (Ministère de l'Environnement, EURYDICE 92, Institut de prévention et de Gestion des Risques Urbains), 1994, *Ruissellement pluvial urbain. Guide de prévention. Evaluation du risque. Eléments de méthode*, La Documentation Française, Paris.
- Dubois-Maury J., Chaline C., 2002, *Les risques urbains*, Armand Colin, Paris.
- Garbrecht J., Martz L., 1997, The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models, *Journal of Hydrology*, 193, 204-213.
- Horton R. E., 1945, Erosional development of stream and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology, *Bulletin of the geological society of America*, 56, 275-370.
- Jenson C., Domingue J. O., 1988, Extracting topographic structure from Digital Elevation data for geographic information system analysis, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54(11), 1593-1600.
- Kenward T., Lettenmaier D. P., Wood E. F., Fielding E., 2000, Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions, *Remote Sensing of Environment*, 74, 432-444.
- Ledoux B., 2006, *La gestion du risque inondation*, Lavoisier/Tec&Doc, Paris.
- O'Callaghan J. F., Mark D. M., 1984, The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, 323-344.
- Rodriguez F., 1999, Intérêt des banques de données urbaines pour l'hydrologie. Détermination des fonctions de transfert de bassins versants urbains, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble - Laboratoire Central de Ponts et Chaussées, Nantes.
- Rodriguez F., Andrieu H., Creutin J. D., 2003, Surface runoff in urban catchment: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks, *Journal of Hydrology*, 283, 146-168.
- Rodríguez-Inturbe I., Gonzalez-Sanabria M., Bras R. L., 1982, A geomorphoclimatic theory of the instantaneous unit hydrograph, *Water Resources Research*, 18, 877-886.
- Rodríguez-Inturbe I., Rinaldo A., 1997, *Fractal River basins. Chance and Self-Organisation*, Press syndicate of the University of Cambridge, Cambridge.
- Scarwell H.-J., Laganier R., 2004, *Risque d'inondation et aménagement durable des territoires*, Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq.
- Sherman L. K., 1932, Streamflow from rainfall by the unit hydrograph method, *English News Record*, 108, 501-505.

- Strahler A. N., 1952, Hypsometric (area-altitude) analysis applied to fluvially eroded landforms, *Bulletin of the geological society of America*, 69, 279-300.
- Trucotte R., Fortin J. P., Rousseau A. N., Massicotte S., Villeneuve J. P., 2001, Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network, *Journal of Hydrology*, 240, 225-242.
- Wolock D. M., Price C. V., 1994, Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model, *Water Resources Research*, 30, 3041-3052.
- Xinhao W., Zhi-Yong Y., 1998, A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales, *Journal of Hydrology*, 210, 221-241.
- Zhang W., Montgomery D. R., 1994, Digital elevation model grid size, landscape representation and hydrologic simulation, *Water Resources Research*, 30, 1019-1028.