



Utilisation des banques de données urbaines pour la délimitation des bassins versants pluviaux de l'agglomération caennaise

Zeidane Moulaye Zeine

► To cite this version:

Zeidane Moulaye Zeine. Utilisation des banques de données urbaines pour la délimitation des bassins versants pluviaux de l'agglomération caennaise. Ingénierie de l'environnement. 2009. dumas-00551312

HAL Id: dumas-00551312

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00551312>

Submitted on 3 Jan 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES DES ENVIRONNEMENTS URBAINS

SPÉCIALITÉ ATMOSPHÈRE, EAU ET ENVIRONNEMENTS URBAINS

Année 2008 /2009

Thèse de Master STEU

*Diplôme cohabilité par
l'École Centrale de Nantes,
l'École Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes
l'École Supérieure d'Architecture de Nantes,
l'Université de Nantes*

Présentée et soutenue par :

ZEIDANE MOULAYE ZEINE

le 29 septembre 2009

à l'École Centrale de Nantes

TITRE

**UTILISATION DES BANQUES DE DONNEES URBAINES POUR LA
DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS PLUVIAUX DE
L'AGGLOMERATION CAENNAISE**

JURY

Président :	Jean-François Sini	Professeur à l'ECN
Examineurs :	Laurent Perret Jean-Michel Rosant Jean-François Sini Fabrice Rodriguez	Maître de Conférences Chargé de Recherche au CNRS Professeur à l'ECN Chargé de Recherche au LCPC

Directeur de mémoire : Fabrice Rodriguez
Laboratoire/Institution : G2C Environnement / Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)
Co-encadrant : Christophe Demoles (G2C)

Résumé

L'utilisation des Systèmes d'Informations Géographiques par les collectivités locales, pour l'exploitation des banques de données urbaines, a connu ces dernières années un essor considérable. Cet travail est consacré à l'exploitation des banques de données urbaines de l'agglomération de Caen dans le cadre d'une étude générale de son système d'assainissement. Une analyse hydrologique basée sur ces informations géographiques a été réalisée. Cette analyse permet de déterminer le chemin de l'eau pluviale depuis chaque parcelle cadastrale jusqu'à un exutoire donné. Un diagnostic de données géographiques disponibles et un prétraitement ont été nécessaires afin d'améliorer la qualité de ces données. La mise en œuvre de cette analyse sur l'ensemble de la ville de Caen s'est concrétisée par deux applications hydrologiques : la délimitation automatique des bassins versants associés à des points de rejet vers le milieu naturel et la distribution spatiale du coefficient d'imperméabilisation. Les résultats ainsi obtenus fournissent des informations détaillées sur les caractéristiques hydrologiques de la ville, et constituent une base solide pour mener à bien un diagnostic et une simulation des réseaux d'assainissement à l'aide de modèles hydrologiques.

Mots-clés : bassin versant urbain, réseau d'assainissement pluvial, Système d'Information Géographique.

Discipline : Hydrologie

Abstract

The use of Geographical Information Systems in Urban areas has considerably increased for the last decade. This work is devoted to making the most of available databases for a sewer evaluation study of Caen urban agglomeration. A hydrological analysis based on the geographical information was performed. This analysis identifies the stormwater path from each cadastral parcel to a given outlet. An inventory of the available geographical data was made and thanks to a preliminary validation step, their quality was improved. The implementation of this analysis on the entire city of Caen has resulted in two hydrological applications: the automatic delineation of watersheds associated with a set of outflows connections to the stream river network and the spatial distribution of the imperviousness coefficient. The results obtained provide detailed information on the hydrological features of the city, and constitute a solid basis to carry out both sewer evaluation studies and the simulation of the storm sewer system by the means of hydrological models.

Key-words : Urban catchments, Storm drainage, Geographical Information system.

Remerciements

Je remercie Fabrice Rodriguez, mon maître de stage, pour m'avoir donné l'occasion de travailler avec lui dans la division Eau et Environnement du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes et pour m'avoir aidé tout au long de mon stage pour mener à bien ce travail. Ces six mois de stage m'ont permis d'avoir une expérience enrichissante à plus d'un titre grâce à sa patience et son esprit critique.

Je tiens aussi à remercier Laurent Lassabatère pour son soutien technique et moral.

Un grand merci à tous les stagiaires, doctorants, post-doctorants et les permanents de la division Eau et Environnement pour l'ambiance conviviale qui a régné dans la division tout au long de la période de mon stage.

Sommaire

0. Introduction	4
I. Contexte du travail.....	6
I.1 Présentation des établissements d'accueil.....	6
I.1.1 G2C Environnement.....	6
I.1.2 Laboratoire Central des Ponts et chaussées.....	8
I.2 Projet de l'Etude Générale du Système d'Assainissement de l'Agglomération de Caen.....	10
I.2.1 Contexte réglementaire du projet	11
I.2.2 Objectif du projet	12
I.3 Objectif du stage dans le cadre du projet.....	13
I.4 Méthodologie développée et outils du travail	14
II. Les banques de données urbaines et l'hydrologie	16
II.1 Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG)	16
II.1.1 Définitions.....	16
II.1.2 les SIG dans les villes.....	19
II.2 L'intérêt de l'utilisation des SIG en hydrologie urbaine	20
II.2.1 Généralités:.....	21
II.2.2 Les applications des SIG en hydrologie urbaine	24
II.3 Développement de la méthode de délimitation des bassins versants	33
II.3.1 Les données géographiques utilisées.....	33
II.3.2 Méthodologie	35
II.3.3 Délimitation automatique des bassins	40
III. Mise en œuvre de la méthode de délimitation.....	41
III.1 Analyse des données	41
III.2 Prétraitement des données	46
III.3 Mise en œuvre de la méthode.....	50
III.4 Interprétation des résultats.....	53
III.5 Coefficient d'imperméabilisation.....	60
Conclusion.....	64
Références bibliographiques	67
Annexe	68

0. INTRODUCTION

Le phénomène de l'étalement urbain, constaté en France et partout dans le monde, affecte d'une manière considérable le cycle de l'eau en milieu urbain. En effet, l'urbanisation souvent associée à une imperméabilisation des surfaces modifie les conditions de ruissellement des eaux pluviales. L'imperméabilisation des surfaces urbaines augmente les volumes d'eau disponible au ruissellement et réduit le temps de réponse du bassin versant ; ce qui augmente le risque d'inondation. Les polluants lessivés des surfaces urbaines et entraînés par les eaux de ruissellement aboutissent au même milieu récepteur et peuvent en dégrader la qualité. Aujourd'hui, l'enjeu majeur est de parvenir à une gestion de la partie urbaine de cycle de l'eau qui se conforme aux exigences d'un développement durable. Ces exigences sont stipulées dans les différentes lois successives sur l'eau (La directive européenne du 21 mai 1991, la loi sur l'eau de 3 janvier 1991 et la directive cadre européenne du 23 octobre 2000).

C'est dans ce contexte d'une gestion équilibrée de la ressource en eau que se situe le projet de l'étude générale du système d'assainissement de la communauté d'agglomération de Caen la Mer (CACLM). Visant à répondre à ces exigences et en particulier en établissement des zonages réglementaires, le projet est réalisé par un groupement composé du Bureau d'études G2C Environnement comme mandataire, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes (LCPC) et la société COMA spécialisée en métrologie et diagnostic de réseau.

L'apport du LCPC à ce projet consiste, en premier lieu, à réaliser une délimitation des bassins versants de la CACLM. Cette délimitation, préliminaire à toute modélisation hydrologique pour reproduire la réaction d'un bassin versant à un événement pluvieux, est réalisée en utilisant une méthode de délimitation automatique développée par la division Eau et Environnement du LCPC. Cette application fait partie d'une analyse hydrologique plus globale du milieu urbain visant à tirer profit de la richesse des banques de données urbaines en terme d'informations géographiques pour caractériser le mieux possible une zone urbaine donnée du point de vue hydrologique. En effet, les banques de données urbaines fournissent des informations détaillées sur le milieu urbain.

L'exploitation de ces informations couplée avec les outils des Systèmes d'Information Géographique (SIG) permet d'intégrer la variabilité spatiale du milieu et d'envisager une modélisation distribuée afin de mieux apprécier l'influence des aménagements urbains sur le cycle de l'eau.

Ce travail vise à réaliser une délimitation des bassins versants de la CACLM à partir des banques de données urbaines disponibles.

L'étude présentée ici se décompose en trois parties :

La première partie de ce rapport traite le contexte général du travail : la présentation des établissements d'accueil, le projet dans lequel ce travail s'inscrit et la méthodologie développée pour mener à bien cette étude.

La deuxième partie introduit les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) qui constituent les outils de base pour la mise en œuvre de la méthode de délimitation. Une revue bibliographique des travaux utilisant les SIG en hydrologie urbaine sera faite avant d'exposer en détails l'analyse hydrologique développée pour la délimitation des bassins versants.

La troisième partie sera consacrée à l'application proprement dite de cette analyse pour la délimitation automatique des bassins versant de l'agglomération de Caen la Mer. Les résultats seront analysés et interprétés afin d'évaluer la pertinence de la méthode utilisée.

I. CONTEXTE DU TRAVAIL

Ce travail s'inscrit dans le cadre de ma formation de Master II « Sciences et Techniques des Environnements urbains », spécialité Atmosphère, Eau et Environnement Urbain à l'Ecole Centrale de Nantes. le stage de fin d'études de six mois, du 30 mars 2009 au 25 septembre 2009, a eu lieu au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Nantes.

Ce travail s'inscrit également dans le cadre d'une étude générale du système d'assainissement de la Communauté d'Agglomération de Caen la Mer ; elle est menée par un groupement composé des membres suivants :

- ❑ G2C environnement (mandataire du groupement et signataire de la convention du stage) ;
- ❑ Laboratoire Central de Ponts et chaussées de Nantes (lieu du stage) ;
- ❑ COMA : Société spécialisée en métrologie Eau et Assainissement et diagnostic de réseaux.

Cette première partie du mémoire sera consacrée au contexte global du travail. Une présentation des établissements d'accueil (G2C & LCPC) et de l'étude globale dans laquelle ce travail s'inscrit sera exposée. Enfin, il s'agira d'introduire l'objectif du travail ainsi que la méthodologie développée et les outils employés pour y arriver.

I.1 Présentation des établissements d'accueil

I.1.1 G2C Environnement

G2C Environnement est une société d'ingénierie spécialisée dans le domaine de l'Eau et l'Environnement, l'Urbanisme et la Gestion des Services Publics.

Société par Action Simplifiée (SAS), G2C Environnement a été créée en 1989 avec pour objectif initial de fournir aux collectivités locales et territoriales des services de conseils et d'assistance technique pour une gestion optimale de leurs infrastructures d'eau et d'assainissement.

Au fil des années, G2C Environnement n'a cessé de développer des nouvelles compétences en fonction des besoins de sa clientèle en général et des collectivités locales en particulier. Aujourd'hui, G2C Environnement intervient dans quatre pôles de compétence, à savoir :

- ❑ Hydraulique et Environnement (Alimentation en eau potable, Assainissement, Aménagement des rivières...etc);
- ❑ Urbanisme et Aménagement (Urbanisme réglementaire, pré-opérationnel et opérationnel) ;
- ❑ Assistance à la Gestion des Services Publics ;
- ❑ Système d'Information Géographique (SIG).

Ayant son siège social à VENELLES, G2C environnement compte aujourd'hui 105 salariés en moyenne repartis sur 11 sites en France (Figure1.1).

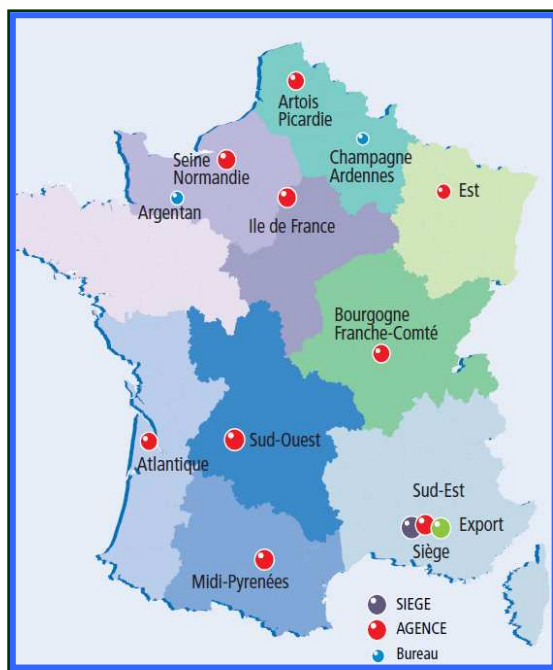


Figure 1.1: Implantation du G2C Environnement (www.g2c.fr)

En 2006, G2C Environnement a créé G2C informatique pour développer l'activité d'édition du logiciel "cart@jour". "cart@jour" est un SIG spécialement dédié aux collectivités avec toute une gamme d'applications métiers pour une meilleure gestion des infrastructures et des services des collectivités locales. Il équipe aujourd'hui plus de 200 collectivités de toutes tailles, dont la Communauté Urbaine du Grand Nancy.

I.1.2 Laboratoire Central des Ponts et chaussées

I.1.2.1 Présentation générale

Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST), placé sous la tutelle conjointe du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche et du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM).

Les activités de recherche menées par le LCPC couvrent les domaines des infrastructures et de leurs usages, de la géotechnique, des ouvrages d'art, du génie urbain ainsi que de leurs conséquences sur l'environnement.

Les programmes de recherche du LCPC visent à contribuer à la réalisation des objectifs suivants :

- ❑ Accroître la contribution de l'infrastructure à la sécurité routière ;
- ❑ Développer des matériaux et structures économes en ressources non renouvelables ;
- ❑ Assurer l'insertion des infrastructures dans l'environnement, notamment urbain et péri-urbain, et en prévenir les risques naturels ;
- ❑ Valoriser les infrastructures existantes : diagnostic et maintenances ;
- ❑ Développer les outils et les méthodes du génie civil.

Le LCPC compte, à fin 2006, 537 agents permanents, avec un total d'environ 650 personnes dont environ 300 ingénieurs, chercheurs et doctorant et 350 techniciens qualifiés et personnel administratif. Cette équipe est répartie dans les quatre sites du LCPC ; à savoir le siège social à Paris, le site de Marne la vallée, le site de Satory (près de Versailles) et enfin le site de Nantes.

I.1.2.2 Le LCPC de Nantes

Le site de Nantes a été créé en 1975 sur la commune de Bouguenais située au sud ouest de l'agglomération nantaise. Il abrite, du fait de sa grande surface, de 150 ha, la majorité des "équipements remarquables" du LCPC. Il s'agit des équipements scientifiques expérimentaux remarquables par leur taille et leurs performances.

Le site Nantes abrite 250 agents du laboratoire et huit unités de recherche dont la division Eau et Environnement dans laquelle s'est déroulé le stage.

I.1.2.3 Division Eau et Environnement

Les activités de recherche de la division Eau et Environnement sont structurées par les axes suivants :

- ❑ Hydrométéorologie quantitative appliquée aux hydro-systèmes urbains ;
- ❑ Diagnostic et conception de système d'assainissement ;
- ❑ Dynamique des polluants dans les milieux urbains ;
- ❑ Valorisation des co-produits et sous-produits industriels et domestiques.

La division vise à avoir une meilleure connaissance de l'impact des aménagements urbains sur le cycle de l'eau en général. Ainsi, les recherches menées par la division visent à améliorer la qualité des milieux aquatiques, à accroître les performances des systèmes d'assainissement ainsi qu'à prévenir les risques d'inondation.

La division Eau et Environnement est organisée en deux sections :

- ❑ **Caractérisation et Transfert des Polluants (CTP) :**

Cette section abrite 5 chercheurs, 6 techniciens et administratifs et 3 doctorants en moyenne. Elle étudie plus particulièrement les sources et les devenir des pollutions dans les sols et les milieux aquatiques ainsi que les impacts sur l'environnement des déchets utilisés en construction routière (MIOM, laitiers d'aciérie).

- ❑ **Hydrologie et Assainissement (HA) :**

Cette section, dans laquelle ce travail a été effectué, compte 6 chercheurs, 7 techniciens et administratifs et 3 doctorants. Elle s'intéresse à l'étude hydrologique de bassins versants urbains et au diagnostic des réseaux d'assainissement (mesures de débits, turbidimétrie,...), ainsi qu'à l'évaluation du risque hydrologique (inondations).

C'est dans la thématique « diagnostic des réseaux d'assainissement » traitée par la section Hydrologie et Assainissement que se situe le projet de la Communauté de l'Agglomération de Caen la Mer.

I.2 Projet de l'Etude Générale du Système d'Assainissement de l'Agglomération de Caen La Mer

La Communauté d'Agglomération de Caen la Mer (CACLM) compte 29 communes représentant environ 220 000 habitants répartis sur un territoire de 18 431 hectares. En pleine phase de création, la CACLM a pris en charge de nouvelles compétences dont celle de l'assainissement. Dans un objectif de gestion optimisée de la compétence assainissement et d'une maîtrise complète du service public, Caen la Mer a décidé de réaliser une étude générale du système d'assainissement de son territoire.

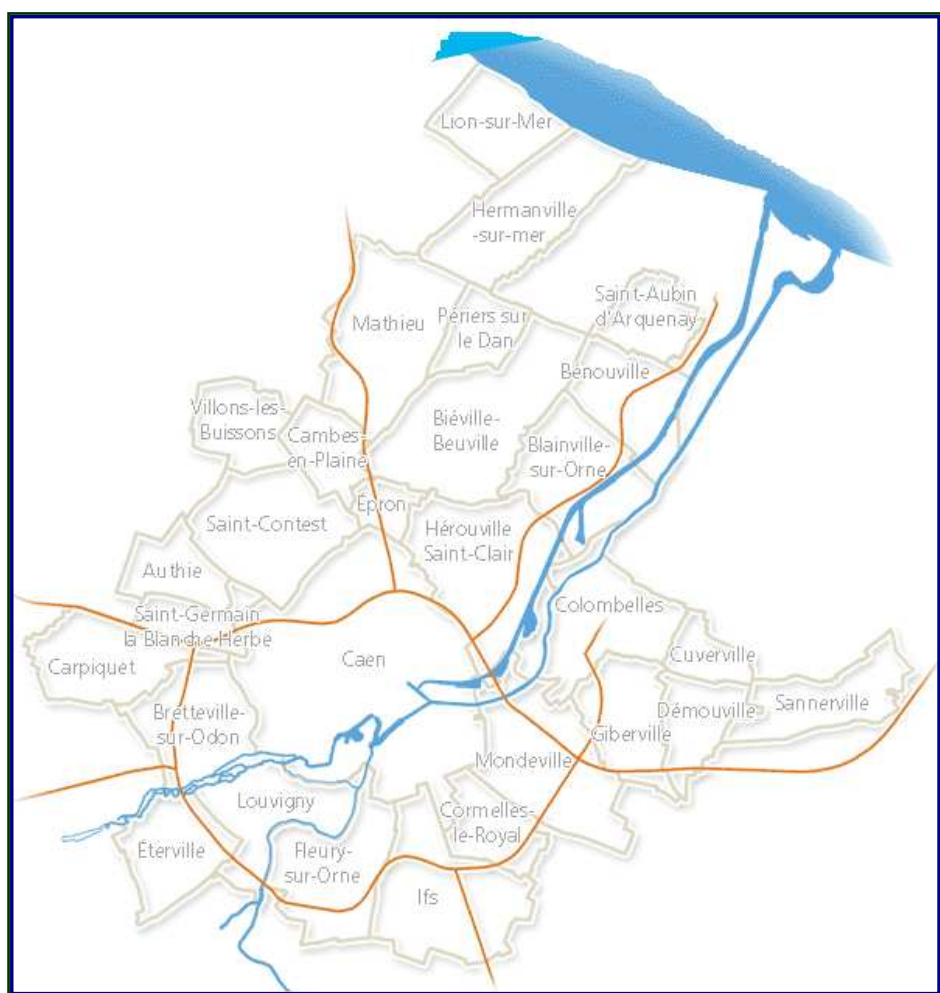


Figure 1.2 : Carte de l'agglomération (www.caenlamer.fr)

Le patrimoine géré et maintenu par l'agglomération est actuellement d'environ 810 km d'égouts, d'une centaine de stations de relèvement d'eaux usées et de 2 stations d'épuration.

I.2.1 Contexte réglementaire du projet

L'appareil législatif et réglementaire résultant de la directive européenne du 21 mai 1991, puis de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 et enfin de la directive-cadre européenne du 23 octobre 2000, a permis de reformuler le débat sur la compétence et le rôle des communes et groupement des communes en matière d'assainissement ainsi que sur les enjeux environnementaux liés à la préservation de la qualité des eaux et des milieux aquatiques.

La directive européenne du 21 mai 1991 obligeait les communes à avoir une approche de l'assainissement par agglomération et non par commune. Elle stipule l'obligation d'une collecte et d'un traitement des eaux usées efficaces.

La loi sur l'Eau du 3 janvier 1992 impose désormais aux communes et à leurs groupement un certain nombre d'obligations, à savoir :

- ❑ délimiter, après enquête publique, les zones d'assainissement collectif et non collectif ;
- ❑ en cas de besoin, délimiter les zones où des mesures doivent être prises pour limiter l'imperméabilisation des sols afin d'assurer la maîtrise du débit des eaux pluviales à l'aval des réseaux ;
- ❑ Avant de programmer et de réaliser des travaux d'assainissement, les communes ou leurs groupements doivent établir un diagnostic de fonctionnement des dispositifs d'assainissement existants, déterminer l'efficacité des ouvrages en matière de collecte et de traitement et prévoir leur évolution en réalisant un schéma directeur d'assainissement.

La directive cadre européenne du 23 octobre 2000 est appelée à jouer un rôle stratégique en matière de politique de l'eau. Elle vise à établir un cadre pour la protection des eaux intérieures de surface, des eaux de transition, des eaux côtières et des eaux souterraines.

Elle apporte des innovations importantes par rapport aux principes de gestion de l'eau définis en droit français par la loi sur l'eau de 1992, dont on peut citer :

- ❑ L'objectif de bon état des eaux devient la règle, les reports éventuels des délais de réalisation et, le cas échéant, la définition d'objectifs moins stricts devant être justifiés ;
- ❑ Les programmes de surveillance de la qualité des eaux devront répondre à des exigences précises, tant pour la définition des sites que pour les analyses et leur fréquence. La directive demande notamment de densifier la surveillance là où les objectifs n'apparaissent pas pouvoir être atteints, ceci afin de mieux identifier les responsabilités et les actions à engager.

La directive précise qu'il est nécessaire d'adopter des mesures scientifiques contre la pollution de l'eau par certains polluants ou groupe de polluants, dits *substances prioritaires*, présentant un risque significatif pour ou via l'environnement aquatique, notamment des risques auxquels sont exposées les eaux utilisées pour le captage d'eau potable.

Ainsi, s'impose la nécessité de prendre en compte les rejets intermittents de temps de pluie des systèmes d'assainissement *eaux usées* et *eaux pluviales*.

L'assainissement des eaux usées et eaux pluviales est donc devenu l'un des chantiers majeurs pour les collectivités locales. Il constitue un élément indispensable au maintien, voire à la reconquête de la qualité des milieux naturels.

I.2.2 Objectif du projet

Dans un objectif d'assurer un exercice optimisé de sa compétence assainissement tant du point de vue de l'exploitation que de l'investissement, la CACLM a décidé de réaliser une étude générale du système d'assainissement eaux usées et eaux pluviales sur son territoire. Cette étude générale fait suite à l'étude du schéma général de traitement réalisée en 2003-2004.

L'étude se décompose de la manière suivante :

- Système d'assainissement eaux usées :
 - Diagnostic
 - Schéma Directeur
 - Zonage eaux usées
- Système d'assainissement eaux pluviales :
 - Diagnostic
 - Schéma Directeur
 - Zonage eaux pluviales.

I.3 Objectif du stage dans le cadre du projet

L'étude générale du système d'assainissement de CACLM est structurée, selon la méthodologie développée par l'équipe du projet, en sept phases, à savoir :

Phase 1 : Prédiagnostic ;

Phase 2 : Reconnaissance de terrain ;

Phase 3 : Campagne de mesures ;

Phase 4 : Localisation précise des anomalies ;

Phase 5 : Modélisation ;

Phase 6 : Schéma directeur d'assainissement des eaux usées ;

Phase 7 : Schéma directeur d'assainissement des eaux pluviales.

Le travail présenté ici, s'inscrit dans la phase 1 «Prédiagnostic ». Cette phase comporte la fastidieuse tâche de collecte des données, une synthèse des études existantes et un état des lieux du système d'assainissement.

L'objectif de ce travail est la délimitation des bassins d'apport pluviaux contribuant au ruissellement des eaux pluviales en un point connu. Cette délimitation des bassins constitue une étape préalable à toute modélisation hydrologique pour simuler les comportements de ces bassins suite à un évènement pluvieux. Il permettra en outre de déterminer la répartition spatiale des surfaces imperméabilisées qui jouent un rôle primordial pour la détermination des eaux disponibles au ruissellement. Les résultats ainsi obtenus seront utilisés dans la phase 5 pour la modélisation de bassins d'apport pluviaux.

Pour cela, une méthode de délimitation automatique des bassins, développée par la division Eau et environnement du LCPC de Nantes (Fabrice RODRIGUEZ et al.), sera utilisée. Cette méthode est basée sur les banques de données cadastrales et les principales données caractéristiques du milieu (voirie, bâti, réseau d'assainissement, topographie).

Ces informations (délimitation et coefficient d'imperméabilisation) seront remis au bureau G2C environnement en fin d'études.

I.4 Méthodologie développée et outils du travail

a) Méthodologie

Dans le but de réaliser l'objectif de ce travail cité auparavant, une méthodologie de travail à été développée. Elle se caractérise par la répartition du processus global du travail en cinq phases principales présentées ci-dessous.

Phase 1 : Analyse des données disponibles

Cette phase consiste à faire un état des lieux des données disponibles dès le démarrage de l'étude. Les données sont archivées avec le logiciel SIG cart@jour, développé par le bureau G2C environnement. Cette étape permettra de remarquer toutes les anomalies et les insuffisances des données nécessaires à l'application de la méthode de délimitation.

Une fiche des anomalies sera établie et remise au bureau G2C environnement pour information et prise des mesures adéquates. Les données disponibles seront ensuite transférées vers le logiciel SIG MapInfo[®] pour l'opération de pré-traitement.

Phase 2 : Pré traitement des données

Elle consiste à traiter les différentes couches de données, une par une, afin qu'elles soient compatibles avec le programme de délimitation. Cette phase est la plus fastidieuse et consommatrice de temps.

Phase 3 : Prise en main de l'outil de délimitation

Il s'agit de découvrir l'ensemble des travaux déjà réalisés sur le sujet, et notamment la thèse de Rodriguez (1999) pour comprendre la méthodologie utilisée pour la délimitation des bassins versants.

Phase 4 : Application de la méthode de délimitation

Les données de base du programme étant traitées, les programmes corrigés et réadaptés à ces données, il ne restera plus que l'application de la méthode utilisée pour délimiter les différents bassins d'apports pluviaux.

Phase 4 : Analyse et interprétation des résultats

Les résultats de l'application de l'outil de délimitation automatique seront examinés. Il sera procédé à une vérification que toute la zone d'étude a été prise en compte dans la délimitation et que cette délimitation est bien conforme au relief du terrain et à la topographie du réseau d'assainissement.

Il sera procédé par la suite à la cartographie thématique des différents sous-bassins (délimitation et coefficient d'imperméabilisation). Les résultats devront être ensuite remis au bureau G2C environnement afin d'être intégrés dans le SIG qui sera remis à son tour au maître de l'ouvrage.

b) Outils du travail

Les outils du travail employés sont principalement les outils logiciels suivants :

- **MapInfo Professional (version 8.5)**

C'est un logiciel SIG qui permet l'analyse, la visualisation et l'édition des données géographiques de différents formats. Il constitue l'outil principal utilisé dans ce travail.

Il servira, en plus d'analyse de données, à l'affichage des différents bassins délimités ainsi qu'à la création des cartes thématiques relatives au coefficient d'imperméabilisation.

- **MapBasic (version 8.5)**

C'est un logiciel de programmation utilisant un langage structuré de type BASIC. Il permet à l'utilisateur de personnaliser une application MapInfo et de créer des applications cartographiques puissantes et qui sont impossibles sous MapInfo seul.

- **Cart@jour**

C'est un logiciel SIG développé par la division informatique de G2C Environnement. Il sera utilisé dans la première phase de ce travail pour établir un état des lieux préliminaire avant d'exporter les données vers MapInfo.

II. LES BANQUES DE DONNEES URBAINES ET L'HYDROLOGIE

L'objectif de ce travail est l'utilisation des banques de données urbaines pour la délimitation des bassins versants de l'agglomération de Caen La Mer. Il est à présent nécessaire de s'interroger sur les moyens disponibles pour exploiter et gérer ces banques de données. Les Systèmes d'Information Géographiques (notés ici SIG) sont devenus les outils incontournables pour la gestion des bases de données urbaines.

Dans ce chapitre, une introduction au domaine des SIG sera exposée. Par la suite, une synthèse bibliographique non exhaustive des travaux antérieurs, utilisant les données géographiques urbaines pour des études hydrologiques, sera menée. Enfin, il sera procédé au développement de la méthodologie d'analyse hydrologique utilisée dans ce travail pour la délimitation des bassins d'apport pluviaux.

II.1 Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG)

En ville, ou en milieu rural, les cartes géographiques sont des outils indispensables d'aide à la décision. la création, la mise à jour et l'exploitation de ces cartes nécessitent la manipulation d'un grand nombre de données surtout dans un environnement urbain qui ne cesse de se transformer. L'avènement des outils informatiques performants a largement facilité cette tâche. C'est ainsi que les SIG ont évolués d'une manière spectaculaire depuis leur création au milieu des années 80.

II.1.1 Définitions

a) Information géographique

L'information géographique peut être définie comme une représentation de la réalité localisée dans le temps et dans l'espace. Elle comporte une donnée géographique (composante spatiale) et un certain nombre de renseignements ou "attributs" (composante thématique). La donnée géographique est un objet repéré sur la surface terrestre par des coordonnées géographiques issues de la projection sur une surface plane des points de l'ellipsoïde terre. Elle permet d'avoir l'information sur la position de l'objet ainsi que sur ses caractéristiques géométriques. La composante thématique permet d'avoir des renseignements sur la nature de l'objet (bâti, voirie, etc..) ou toute autre information contextuelle (nombre d'habitants, type ou superficie d'un bâtiment). Ces renseignements sont stockés dans une base des données géographiques sous forme d'un ensemble des données structurées.

b) Système d'Information Géographique

Un SIG est un système informatisé qui comprend une base des données sur un ensemble d'unités géographiques et un ou des logiciels permettant de gérer le stockage, la mise à jour, un accès efficace aux informations, le traitement et la représentation visuelle de ces données (Béguin et Pumain, 1994).

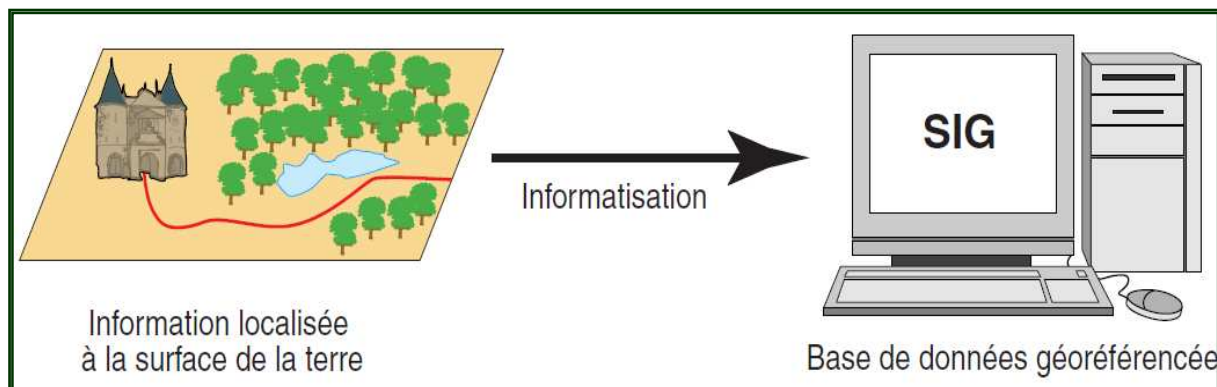


Figure 2.1 Définition d'un SIG

Un SIG ne se limite pas à un outil logiciel. C'est un système d'information sur les objets, phénomènes et processus spatiaux. Il est constitué de cinq composantes : les logiciels, les données, les matériels informatiques, les savoir-faire et les utilisateurs. Les deux principales composantes d'un SIG sont les logiciels et les données.

- Les logiciels assurent toutes les fonctionnalités d'un SIG, regroupées sous les termes « 5A », à savoir : l'Acquisition des données, Archivage, Analyse, Affichage et Abstraction.
- Les données utilisées dans un SIG sont de deux types : les données alphanumériques structurées en base de données et les données spatiales organisées en couches.

Un système de coordonnées terrestres permet de référencer les objets dans l'espace et de positionner l'ensemble des objets les uns par rapport aux autres. Les objets sont généralement organisés en couches (Figure 2.2), chaque couche rassemblant l'ensemble des objets homogènes (bâti, rivières, voirie, parcelles, etc.).

Deux modes de représentation des objets géographiques sont possibles :

- le mode vectoriel (format vecteur): les objets géographiques sont représentés par des points, des lignes, des polygones ou des polygone creux (emprise). Le mode vecteur

permet de gérer facilement les objets et leurs caractéristiques thématiques et spatiales. Il est bien adapté à la modélisation des réseaux hydrographiques et à une gestion simple des relations amont-aval.

- le mode matriciel (format raster) : il s'agit d'une image, d'un plan ou d'une photo numérisée et affichée dans le SIG en tant qu'image. Cette image est décomposée en une grille régulière et rectangulaire, organisée en lignes et en colonnes, chaque maille de cette grille ayant une intensité de gris ou une couleur. La juxtaposition des points recrée l'apparence visuelle du plan et chaque information. Le mode raster est indispensable pour intégrer des photographies aériennes ou des images satellitaires. Il est bien adapté à l'analyse spatiale et à la gestion des données continues.

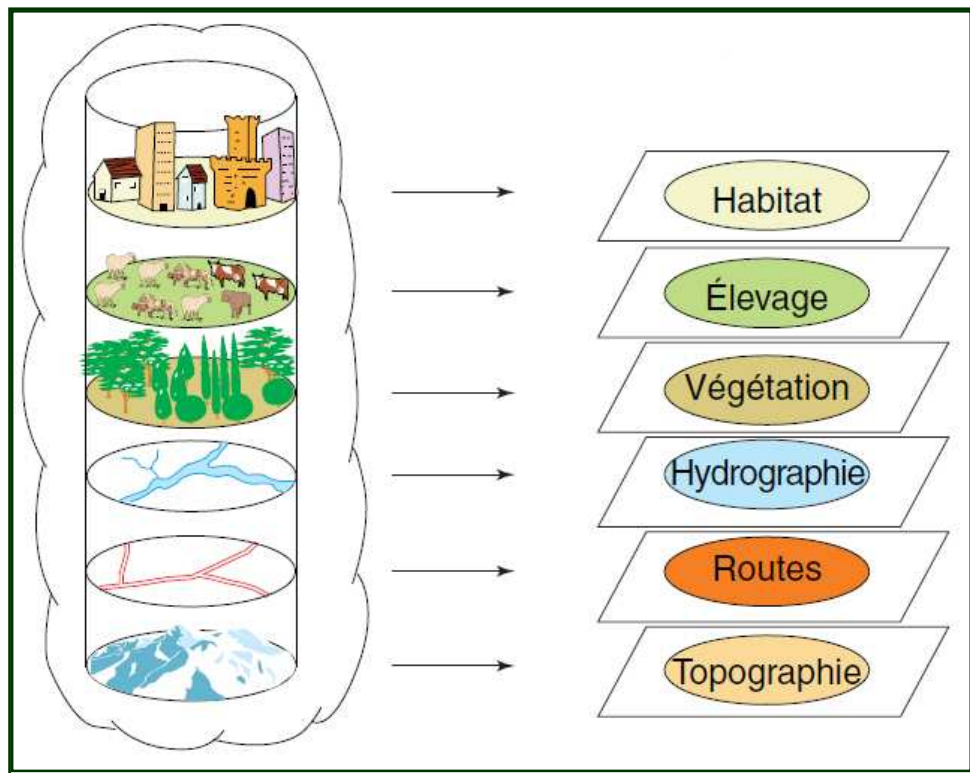


Figure 2.2 : superposition des couches de natures différentes

Dans le cadre de ce travail, les données utilisées seront structurées en mode vecteur. Le mode vecteur, en plus de son adaptabilité à la modélisation des réseaux linéaires, permet d'avoir des représentations cartographiques de qualité. Les objets géographiques sont bien identifiés et le calcul de leur caractéristiques géométriques (longueur, surface, pente) est facilité.

II.1.2 les SIG dans les villes

Vu l'importance de données à gérer au quotidien, l'utilisation des S.I.G en milieu urbain est devenu indispensable. Leur ergonomie intuitive permet de procéder à des requêtes très évoluées tout en n'exigeant pas obligatoirement une expertise poussée. C'est ainsi que les services techniques de l'administration ont senti le besoin pour l'installation d'un SIG qui leur permet de gérer leurs bases de données géographiques. L'installation du SIG est généralement pilotée par des sociétés extérieures aux collectivités. A titre d'exemple, la Communauté d'Agglomération de Caen La Mer a sélectionné, en 2007, STAR-APIC pour la mise en œuvre d'un SIG complet ainsi que l'intégration des données et des différents réseaux. Le SIG sera par la suite pris en main par le service gestionnaire de la banque des données urbaines qui prendra la responsabilité de sa mise à jour continue. Cette dernière tâche représente un défi majeur pour toute politique d'installation d'un SIG en raison de l'évolution continue des travaux de construction en ville. Les couches de données principales qu'on peut avoir dans un SIG d'une ville sont :

- les plans cadastraux : cette couche représente le référentiel spatial de la ville. Elle fait généralement l'objet d'une convention entre la Direction Générale des Impôts (DGI) et la collectivité locale. Cette couche peut donner à elle seule la surface totale de la ville.
- et les autres couches relatives aux thèmes de la voirie, la topographie, les bâtiments, les réseaux d'assainissement et des photos aériennes.

L'enrichissement d'un SIG en terme de nombre de couches géographiques dépend principalement du budget alloué, de la nature des projets qui sont à mener et de la pro-réactivité du service gestionnaire en terme de mise à jour de données.

En hydrologie, les données géographiques généralement utilisées sont les plans cadastraux, les bâtiments et surfaces imperméabilisées, la topographie du terrain, le réseau hydrographique et le réseau d'assainissement des eaux pluviales.

II.2 L'intérêt de l'utilisation du SIG en hydrologie urbaine

L'hydrologie urbaine est une branche de l'hydrologie qui traite les zones urbaines. Elle s'intéresse particulièrement aux effets des aménagements urbains sur le cycle de l'eau.

Dans un contexte de développement durable, les préoccupations environnementales font de l'hydrologie urbaine une composante importante des sciences de l'environnement en milieu urbain. En effet, dans un milieu urbain, la pression anthropique affecte la surface du milieu et le proche sous-sol. Les surfaces imperméabilisées gagnent du terrain et les réseaux hydrographiques sont transformés et artificialisés. Cette évolution augmente les débits des volumes d'eau pluviale en direction du milieu récepteur, ce qui engendre les risques des inondations. En lessivant les surfaces urbaines, cette eau pluviale augmente aussi le risque de la pollution du milieu. Le cycle de l'eau se voit modifié d'une manière progressive. Cette modification est étroitement liée aux phénomènes de l'étalement urbain.

L'hydrologie urbaine s'intéresse, désormais, au développement de nouvelles techniques d'aménagement de l'espace visant à protéger les agglomérations contre diverses nuisances liées à l'eau et à protéger et le milieu naturel contre les pressions anthropiques urbaines. Ces nouvelles techniques dites *techniques alternatives* sont fondées, en général, sur le principe de l'infiltration et du stockage (Bassin de retenue, noue, chaussée à structure réservoir, puit d'infiltration, etc....).

C'est dans ce contexte, qu'il est important de comprendre le comportement d'une zone urbaine suite à un événement pluvieux. La connaissance des caractéristiques géométriques et physiques du milieu semble être indispensable pour une meilleure description du milieu urbain. Le développement des SIG a largement contribué à une documentation de plus en plus détaillée des banques de données urbaines. Cette documentation associée aux capacités de l'outil SIG permet d'avoir une analyse spatiale détaillée du milieu urbain.

L'intérêt des SIG en hydrologie urbaine se manifeste par le fait qu'ils sont des outils performants pour stocker, gérer, mettre à jour, analyser et représenter des données géographiques utiles à un processus hydrologique.

L'une des premières applications possibles et pertinentes des SIG est leurs utilisation dans la modélisation hydrologique. Bien que la modélisation proprement dite ne sera pas traitée dans ce travail, nous rappelons tout de même des généralités qui peuvent aider à la compréhension des paragraphes suivantes.

II.2.1 Généralités :

a) bassin versant

La bassin versant est la surface élémentaire pour l'étude hydrologique. Il est défini en un point donné comme étant la surface géographique drainée par le cours d'eau et ses affluents en ce point. C'est une surface fermée où tout excédent de précipitation s'évapore ou s'écoule par une seule section à l'exutoire. Il dispose des caractéristiques physiques qui influencent son comportement hydrologique suite à une sollicitation pluvieuse. Ces caractéristiques sont classées en deux types :

- ❑ Les caractéristiques géométriques : la géométrie du bassin (surface, pente et relief du terrain) et celle de son réseau hydrographique (structure du réseau, longueurs et pentes du réseau);
- ❑ Les caractéristiques relatives à la nature et l'occupation du sol : couverture et nature du sol et la géologie du substratum.

Il est bien évident que l'urbanisation affecte la quasi totalité de ces caractéristiques du bassin, et par conséquent son fonctionnement hydrologique. L'étude du comportement d'un bassin versant urbanisé afin d'appréhender son débit se fait généralement en conjuguant expérimentation et modélisation.

b) Modélisation hydrologique :

La modélisation hydrologique vise à représenter la réponse d'un bassin versant à une sollicitation pluvieuse. Elle accorde généralement une importance majeure au ruissellement sur les surfaces imperméabilisées qui sont les principales sources d'écoulement.

En hydrologie, le phénomène de transformation de la pluie en débit est composé de deux concepts souvent considérés comme indépendants et se succèdent dans le temps : la fonction de production et la fonction de transfert.

La fonction de production détermine la part de la pluie brute qui contribuera au ruissellement (pluie nette), la part infiltrée et évaporée.

La fonction de transfert transforme la pluie nette ou efficace précédente en un débit ruisselé à l'exutoire du bassin.

Cette répartition classique en deux concepts est schématisée dans la figure 3. Elle montre la partie de la pluie brute (pluie nette), située au-dessus de la courbe du régime d'infiltration,

qui contribuera au ruissellement (fonction de production), ainsi que l'hydrogramme de crue généré par cette pluie nette (Fonction de transfert). Le calcul de la pluie nette fait intervenir toutes les caractéristiques du bassin versant. Dès lors, il est difficile de définir une relation analytique rigoureuse pour la fonction de production. Par ailleurs, l'analyse des mesures des pluies précipitées et des débits à l'exutoire du bassin permet d'obtenir des informations pertinentes sur la fonction de transfert.

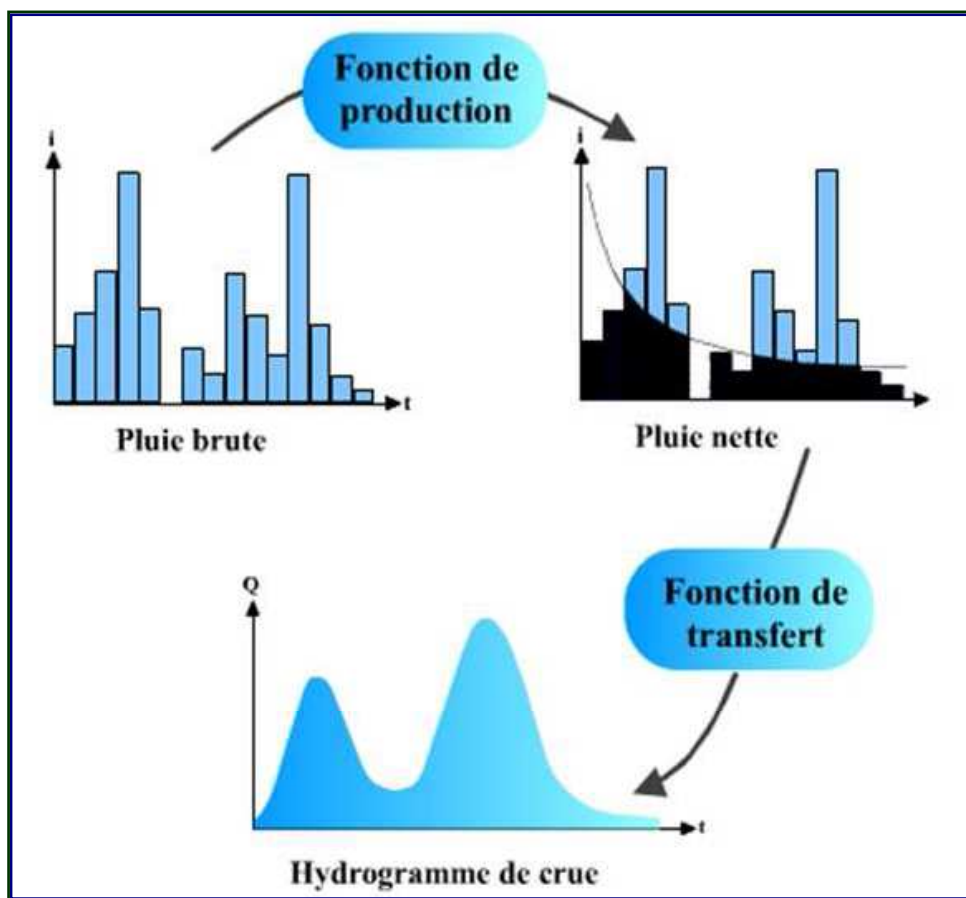


Figure 2.3 : transformation de la pluie en débit (hydrologie générale, Musy-2002)

c) Types de modèles

Il existe dans la littérature quatre types de modèles : les modèles probabilistes, les modèles empiriques, les modèles conceptuels et les modèles à base physique ou mécaniste.

Les modèles probabilistes : ils supposent que les phénomènes étudiés sont essentiellement des événements aléatoires. Ils constituent des relations entre les variables décrivant les phénomènes et leurs probabilités d'atteindre ou non certaines valeurs. Ils sont rarement utilisés en hydrologie urbaine.

Les modèles empiriques : ils se basent sur des similitudes de comportement fondées sur de nombreuses observations. Ils ont peu d'intérêt en milieu urbain vu le caractère évolutif de ce milieu.

Les modèles conceptuels : ils sont fondés sur une schématisation du bassin (réservoir ou série des réservoir par exemple) en l'identifiant à des processus de transformation de flux entrant en flux sortant.

Les modèles à base physiques ou mécaniste : ils cherchent à décrire les phénomènes en se basant sur la résolution des différentes équations aux dérivées partielles décrivant les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Les modèles utilisés pour la transformation de la pluie en débit en hydrologie urbaine sont principalement les deux derniers types, à savoir : Les modèles conceptuels et les modèles à base physique. Ces modèles peuvent être différenciés, par le type de représentation spatiale du bassin versant qu'ils utilisent, en deux groupes de modèles : modèles globaux et modèles spatialisés (ou distribués).

Les modèles globaux : le modèle est dit global « ou boîte noire » lorsqu'il traite, en entrée, le bassin comme une seule et unique entité. Il restitue généralement en sortie le débit à l'exutoire, en utilisation des formules mathématiques simples. L'avantage de ce type de modèle est le fait qu'il ne nécessite pas une connaissance du terrain sur lequel le processus est étudié.

Les modèles spatialisés (ou distribués) : à la différence des modèles globaux, ces modèles fragmentent le bassin en plusieurs entités élémentaires qui sont traitées séparément. Ces modèles prennent en compte la variabilité spatiale des caractéristiques physiques du milieu étudié ainsi que la variabilité spatiale de la pluie, ce qui leur permet d'améliorer les résultats fournis par les modèles précédents.

II.2.2 Les applications SIG en hydrologie urbaine

Une revue de la littérature montre que les études de modélisation se sont focalisées essentiellement sur le domaine de l'hydrologie rurale. Des modèles distribués ont été développés en utilisant les outils d'analyse spatiale intégrés dans les SIG (en mode raster principalement). Des applications utiles à la modélisation hydrologique ont été développées. Ces applications visent généralement à réaliser les tâches suivantes :

- L'élaboration des modèles numériques de terrain (MNT) à partir des données topographiques ;
- Extraction du réseau hydrographique à partir du MNT ;
- Délimitation du bassin versant et calcul de son coefficient d'imperméabilisation;
- Calcul des paramètres d'entrée des modèles hydrologiques ;
- Détermination de la fonction du transfert du bassin versant.

En hydrologie urbaine, l'utilisation des SIG vise à tirer profit des banques de données urbaines, riches en information, pour la modélisation des bassins versants urbains.

En effet, une modélisation spatialisée, utilisant les capacités des SIG, permet de simuler plusieurs scénarios d'un aménagement urbain, de comprendre les conséquences d'un tel aménagement sur la quantité (inondation) et la qualité (pollution) des eaux de ruissellement qui seront générées. Il est donc très judicieux, de concevoir des modèles hydrologiques s'appuyant sur le contenu des banques de données urbaines.

Si l'utilisation des SIG a commencé au début des années 80, leur utilisation dans le domaine de l'hydrologie urbaine n'a été véritablement entamée que vers les années 90.

Nous présentons ici une chronologie non exhaustive des applications des SIG en hydrologie urbaine ainsi que les analyses hydrologiques développées dans ces applications.

II.2.2.1 Chronologie des applications SIG en hydrologie urbaine

Djokic et Maidment (1991) estiment que l'avènement des SIG et les modèles numériques de terrain qui leur sont associés permet d'automatiser la représentation du terrain en utilisant des objets géographiques rattachés à une base de données attributaires.

Les auteurs remarquent l'utilité des applications des SIG utilisées dans le milieu rural pour la délimitation du bassin, l'extraction du réseau hydrographique et la détermination de la fonction de transfert, et veulent tester si ces applications peuvent être adaptées au milieu urbain. Ils précisent que la principale difficulté à prendre en compte est l'hétérogénéité du milieu. Le milieu urbain est composé en fait de deux types de terrain : un terrain d'origine avec son réseau de drainage naturel sur lequel vient se superposer un terrain urbanisé avec un réseau de drainage anthropique qui modifie considérablement les écoulements d'eau. En milieu urbain, l'écoulement superficiel de l'eau ne suit pas nécessairement la direction de la plus forte pente. L'eau est interceptée par des ouvrages de drainage (canaux, ruisseaux) pour être guidée vers les avaloirs du réseaux d'assainissement. Ce qui représente une différence importante avec la majorité des applications en hydrologie rurale basées sur cette approche. En plus de cet écart, deux réseaux sont à considérer en milieu urbain : réseau d'écoulement superficiel et le réseau d'assainissement souterrain. Suite à cette hétérogénéité du milieu urbain, une description physique détaillée de la zone d'étude est devenue indispensable afin de déterminer avec précision le cheminement de l'eau jusqu'à l'exutoire. Les auteurs affirment qu'avec une résolution suffisante (des données géographiques), un modèle numérique de terrain peut être élaboré pour une zone urbaine, mais la difficulté serait d'utiliser les applications destinées à l'hydrologie rurale pour l'appliquer à ce modèle, vu le volume énorme des données à gérer. Ils préconisent ainsi une approche distribuée pour la modélisation en milieu urbain au lieu d'une approche globale souvent adoptée en milieu rural. L'étude menée a utilisée les fonctionnalités d'un logiciel SIG (ARC/INFO) pour déterminer tous les paramètres d'entrée du modèle. Elle a démontré que les outils SIG, à travers leurs flexibilité et efficacité dans la gestion des données géographiques, se sont révélés être une option viable pour la modélisation urbaine.

Greene et cruise (1995) précisent que la majorité des modèles d'usage courant sont des modèles conceptuels d'approche global « boîte noire » qui ne prennent pas en compte la variabilité spatiale au sein du bassin versant urbain. ils soulignent que la qualité des modèles utilisés pourrait être améliorée d'une manière significative si cette variabilité spatiale des caractéristiques du bassin versant urbains est prise en compte dans le processus hydrologique. Cette approche a été facilité par l'avènement et le développement des SIG.

Les auteurs ont remarqué, suite une revue de littérature, que peu d'études hydrologiques ont utilisé les SIG pour l'analyse hydrologique en milieu urbain. Ces études utilisent les outils des SIG soit pour calculer les paramètres d'entrée d'un modèle, soit pour afficher et stocker les caractéristiques physiques du bassin étudié. Si ces études ont mis en exergue l'importance des SIG pour l'amélioration de la productivité de l'utilisateur dans les études de modélisation hydrologique, toutes les capacités des SIG ne sont pas encore exploitées dans les modèles hydrologiques urbains.

Les auteurs proposent donc de développer un outil qui intègre davantage les capacités d'analyse spatiale d'un SIG dans l'analyse hydrologique du bassin versant urbain. Les SIG ne sont plus utilisés en amont ou en aval de la modélisation mais plutôt pour être une partie intégrante de l'ensemble du processus de la modélisation hydrologique. L'hétérogénéité spatiale du milieu a été prise en compte à travers le géoréférencement de l'ensemble des couches nécessaires à la modélisation hydrologique (topographie, nature et occupation du sol, surface perméabilisées et imperméabilisées, le réseau de drainage, réseau de voirie). Les coordonnées planimétriques (x,y) des objets géographiques ont été calculées et stockées dans la base des données pour être utilisées dans l'analyse spatiale. Les coordonnées (x ;y) permettent d'identifier (1) quelles sont les surfaces contributives au ruissellement vers un tel avaloir; (2) les dimensions de ces zones et les distances entre ces zones et leurs avaloirs associés ; (3) la longueur d'un collecteur entre un avaloir identifié et l'avaloir situé en aval.

Le modèle développé par cette étude permet de simuler les conséquences d'un aménagement urbain à plusieurs échelles (propriété privée, îlot, etc....) sur le comportement hydrologique du bassin. En revanche, l'utilisation de ce modèle nécessite l'acquisition d'une base des données exhaustive et principalement orientée vers l'hydrologie, ce qui n'est pas le cas des banques de données urbaines qui sont plutôt destinées aux applications dans l'urbanisme, de transport , du marketing, ou de la gestion des risques.

Zech et al.(1994) utilisent un modèle distribué qui adopte une discrétisation spatiale très fine (5m x 5m) pour tenir compte de l'hétérogénéité spatiale du milieu. Un modèle numérique de terrain à mailles régulières, utilisant les capacités des SIG, est élaboré pour représenter le milieu modélisé. L'eau générée au niveau de chaque cellule est acheminée vers la cellule voisine selon la direction de la plus forte pente, et ceci jusqu'à l'exutoire. Ce module utilise la capacité de l'analyse spatiale intégrée dans les SIG en mode raster pour la détermination du débit à l'exutoire. Les couches des bâtiments, des collecteurs et de mode d'occupation du sol sont reconnaissables à l'échelle d'une maille de 25m². Elles peuvent être générées à partir du traitement des images des satellites (SPOT). Les différentes couches sont superposables au modèle numérique de terrain. Les outils SIG sont utilisés ici pour le calcul des paramètres d'entrée du modèle.

Ce modèle requiert un travail important de préparation des données vue la discrétisation très fine adoptée, d'autant plus que la résolution des images des satellites est plus grosse que la résolution de 5m utilisée : la meilleure résolution disponible sur le marché est de 10m (Zech et Escarmelle, 1999).

Rodriguez (1999) précise que l'hydrologie urbaine peut tirer un grand bénéfice de l'utilisation des banques de données urbaines. L'auteur a voulu dans cette étude exploiter les informations contenues dans ces banques de données pour la réalisation d'une modélisation hydrologique spatialement distribuée et à base physique.

L'auteur estime que le milieu urbain se prête bien à une approche à base physique grâce à la richesse de ces banques de données, mais les informations qui y sont contenues ne sont pas forcément adaptées aux besoins de l'hydrologie. Il note par exemple l'absence quasi-générale d'une couche relative aux caractéristiques hydrodynamiques du sol dans une banque de données urbaines, pourtant indispensable pour la définition de la fonction de production.

Une analyse hydrologique spécifique au milieu urbain a été élaborée à partir des banques de données urbaines. Cette analyse a permis de dégager des applications concrètes utiles pour la modélisation ainsi que pour la gestion du bassin versant urbain, dont on peut citer :

- Délimitation du bassin versant urbain ;
- Calcul du coefficient d'imperméabilisation du bassin ;
- Détermination du graphe hydrologique qui permet d'avoir un cheminement complet de l'eau à partir de n'importe quel point du bassin jusqu'au l'exutoire ;

- Définition des caractéristiques morphologiques du réseau hydrographique urbain (longueurs et pentes des cheminements possibles).

Une fonction de transfert a été définie à partir du graphe hydrologique. L'approche générale adoptée se base sur l'analyse des hydrogrammes unitaires morphologiques, déterminés pour les bassins versants urbains de petite taille. L'hydrogramme Unitaire Morphologique (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. Sa construction nécessite donc une bonne connaissance du cheminement de l'eau dans le réseau hydrographique urbain, ce qui est devenu possible grâce à la construction du graphe hydrologique. Les outils SIG utilisés dans cette étude permettent de calculer directement les caractéristiques géométriques (longueur, pente) des branches du réseau qui seront utilisées pour l'estimation de la distribution spatiale des temps de parcours, qui constitue l'hydrogramme unitaire.

II.2.2.2 Les analyses hydrologiques développées

Les difficultés rencontrées dans les modèles hydrologiques distribués en milieu urbain sont souvent liées à la discrétisation de la zone d'étude. L'hétérogénéité du milieu urbain impose des conditions sur la dimension de l'objet élémentaire à prendre en compte dans la discrétisation du milieu. Une revue de littérature montre qu'on peut utiliser différents types de spatialisation du milieu (Figure 2.4) :

- spatialisation par zonage ou regroupement logique (Surface imperméabilisée ou perméabilisée ; zones d'habitat collectif ou zone d'habitat individuel) ;
- spatialisation par maillage arbitraire (maillage carrées régulières et maillage triangulaire irrégulières) ;
- spatialisation par approche objet : à chaque objet sont associés des attributs qui permettent de décrire ses différentes caractéristiques.

En plus, les modèles numériques de terrain utilisés ne permettent plus d'avoir le bon cheminement des eaux de ruissellement en surface, étant donné la présence des bâtiments, des voiries et des avaloirs du réseau d'assainissement.

Les modèles distribués évoqués auparavant présentent des approches différentes pour simplifier la tâche de la modélisation hydrologique en milieu urbain.

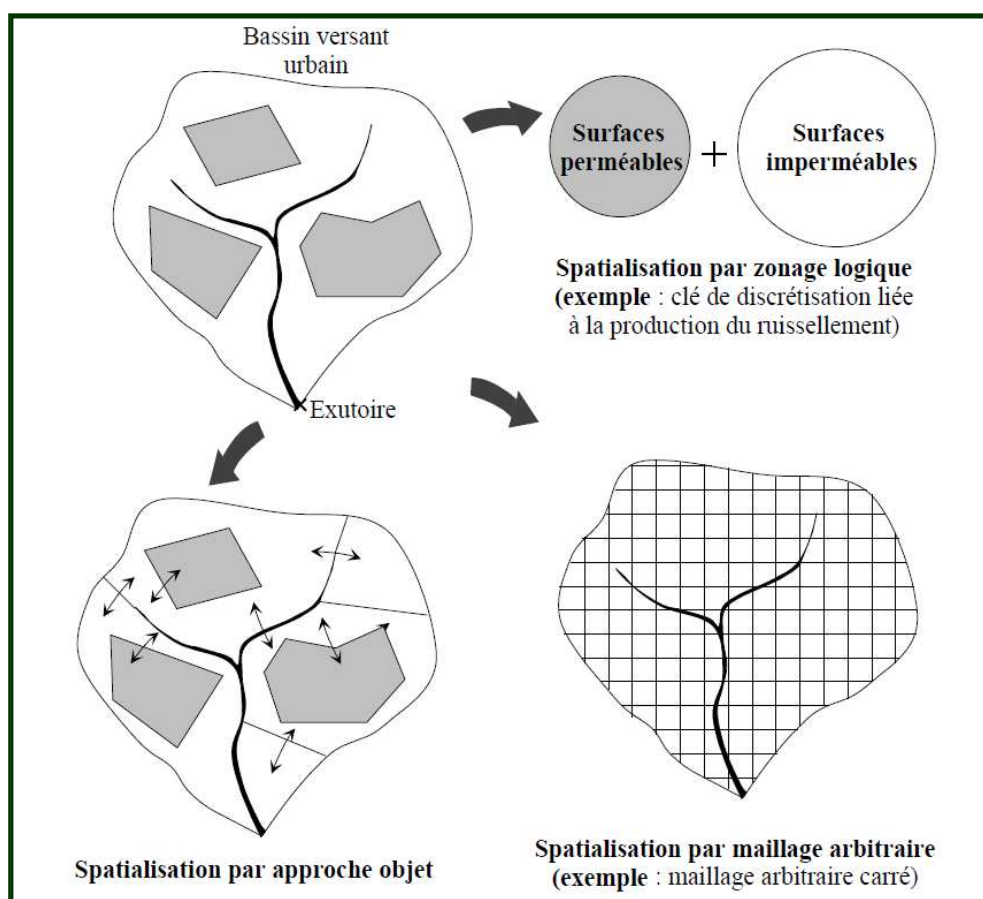


Figure 2.4 : Exemples de spatialisations possibles d'un bassin versant (Hingray, 1999)

Djokic et Maidment (1991) adoptent une spatialisation par approche objet. Il définissent le milieu urbain, d'un point de vue hydrologique, comme étant un milieu qui est constitué de trois éléments principaux : la surface du sol, les avaloirs du réseau d'assainissement et le réseau d'assainissement lui-même. Cette répartition est inspirée d'une répartition selon le type d'écoulement ; la surface du sol est le lieu d'un écoulement de surface ; le réseau d'assainissement est le lieu d'un écoulement sub-surfacique ; les avaloirs sont les points de connexion entre les deux types d'écoulement.

Chaque élément est associé à une couche de données géographiques et attributaires. L'avaloir est représenté par un point et le réseau d'assainissement est représenté par des segments de lignes. La surface du sol est représenté par un modèle numérique de terrain TIN (*Trigulated Irregular Network*) enfermé d'un polygone qui représente le sous-bassin versant de l'avaloir située en aval. Le TIN est une manière de concevoir le modèle numérique de terrain. Le principe consiste à conserver les points significatifs du relief de terrain, en retenant les sommets obtenus par triangulation. Ce maillage réduit la redondance dans les zones planes, ce qui permettrait un gain de stockage et un gain de temps nécessaire pour interpoler une altitude. Les auteurs jugent que les réseaux triangulaires irréguliers ont l'avantage de pouvoir facilement épouser les contours des différents objets urbains et de pouvoir prendre en compte des dénivellations importantes telles que celles associées à des surfaces bâties.

Cette surface contributive pour l'écoulement des eaux vers l'avaloir qui lui est associée représente l'objet élémentaire de cette discrétisation. Elle est délimitée manuellement sur le terrain à partir d'un contrôle des écoulements des eaux pluviales en cours de l'averse.

L'élément de connexion entre les trois bases des données ainsi constituées est l'avaloir du réseau d'assainissement. L'identification de l'avaloir dans les attributs d'un tronçons de réseau permet, par exemple, de savoir la surface contributive qui participe au ruissellement vers ce tronçon.

Après le calcul de tous les paramètres du modèle, utilisant les fonctionnalités d'un SIG (ARC/INFO) et après les vérifications du réseau de drainage, une modélisation hydrologique est développée pour déterminer la surface d'apport de chaque collecteur et en déduire si le dimensionnement du collecteur est approprié ou pas et ceci pour des événements pluvieux de période de retour de 10 ou 25 ans. Ainsi, un programme de renouvellement des canalisations présentant des défaillances d'adduction peut être proposé.

Greene et cruise (1995) adoptent, eux aussi, une approche de spatialisation par objet. L'objet élémentaire utilisé dans cette modélisation distribuée peut être un lot ou un ensemble de lots selon l'échelle souhaitée par l'utilisateur. La zone d'étude est discrétisée en plusieurs zones dites « zones contributives au ruissellement » représentées par des polygones. Ces zones sont discrétisées à nouveau en zones perméables et imperméables (Figure 2.5). Un SIG (ARC/INFO) est utilisé pour la création d'une base de données spatialisée présentant toutes les caractéristiques hydrologiques du sol de la façon la plus réaliste possible. Des programmes sont élaborés à l'intérieur du SIG pour pouvoir déterminer l'ensemble des surfaces qui contribuent au ruissellement en un point donné du réseau de drainage. Un modèle TIN est

utilisé pour le calcul des longueurs et pentes du cheminement de l'eau. Les techniques de superposition des couches d'un SIG sont utilisées pour l'exploitation des différentes couches. Ainsi, la superposition des polygones des surfaces perméables sur le TIN et sur la nature du sol permet d'extraire la conductivité hydraulique, la capacité du stockage et la pente moyenne du polygone. L'utilisation des coordonnées des points constituant chaque polygone (surface contributive) dans l'analyse spatiale est à signaler. La richesse de données relatives à la nature du sol a permis de définir une fonction de production de chaque objet en utilisant la méthode SCS (*Soil Conservation Service*). La fonction de transfert est déterminée en utilisant un modèle hydraulique basé sur la résolution des équations de l'onde cinématique.

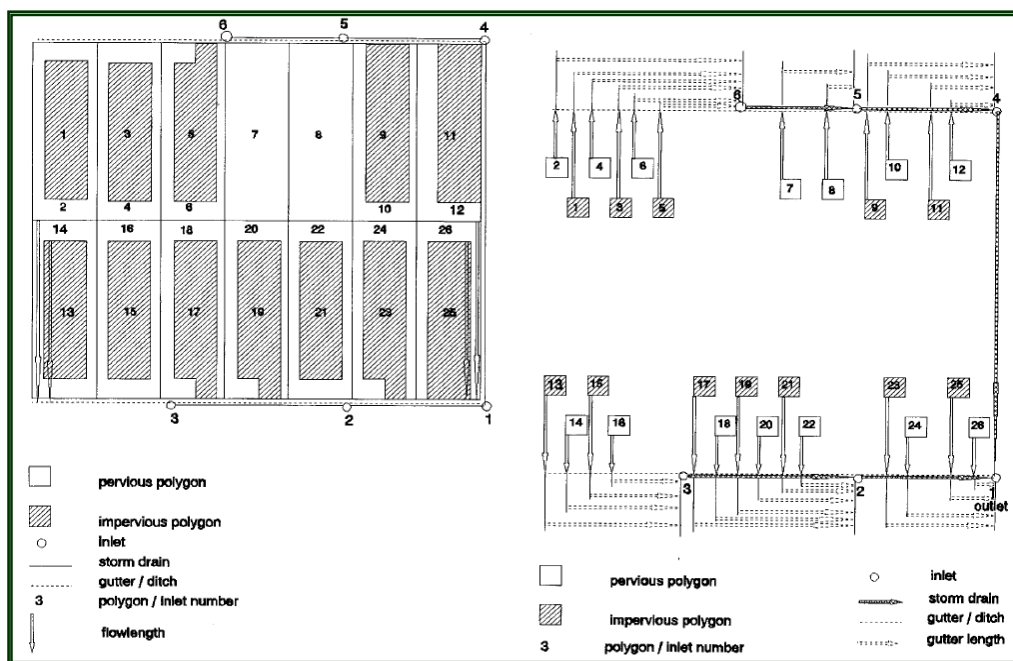


Figure 2.5 : Discretisation de l'espace urbain et schématisation du cheminement des eaux de ruissellement, (greene et Cruis,1995)

Zech et al.(1994) proposent un modèle distribué. La discrétisation du milieu urbain est à mailles carrées régulières. L'élément unitaire est une cellule de 25 m² de surface. Un modèle numérique de terrain à maille régulière (5x5m) est utilisé. Les altitudes des mailles sont surélevées lorsqu'elles correspondent à des bâtiments ou des obstacles ; ainsi, on est sûr que le cheminement de l'eau modélisé va les contourner. Par contre, les altitudes des mailles sont abaissées lorsqu'elles correspondent à des éléments drainants, ce qui rend possible l'utilisation d'un seul MNT pour toute la surface du bassin (Figure 2.6).

Un traitement spécial est prévu pour forcer les eaux recueillies par les toitures des bâtiments à s'écouler dans le collecteur le plus proche.

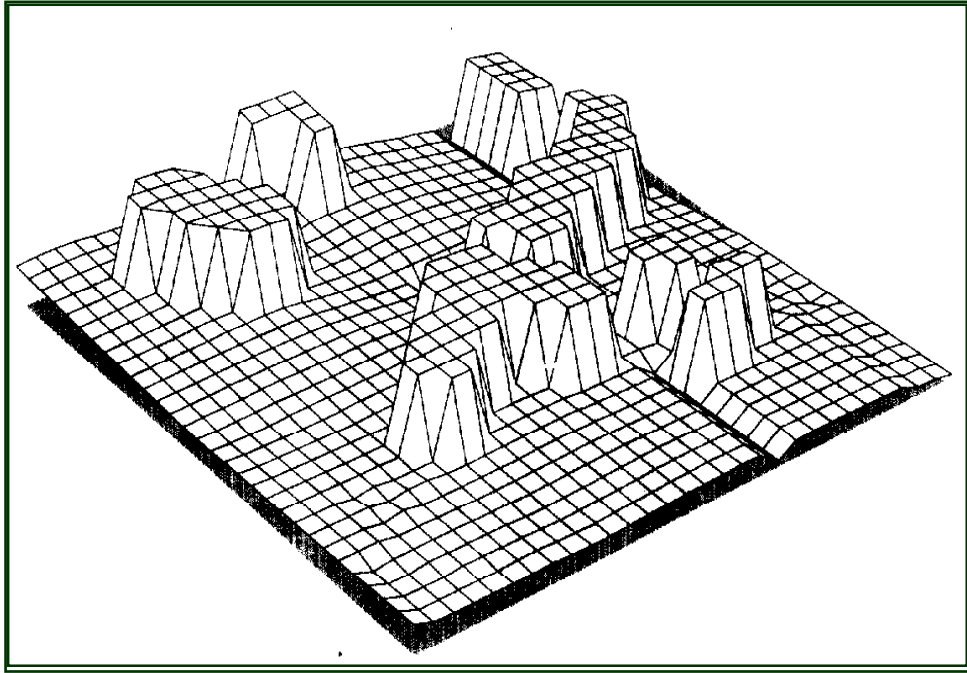


Figure 2.6 : modèle numérique de terrain pour un bassin versant urbain

Ce modèle est caractérisé par une discrétisation très fine du milieu urbain. Une telle discrétisation est nécessaire pour être sûr que les bâtiments ne seront pas omis par le modèle d'une part, et que les tranchées fictives qui représentent le réseau de drainage n'affectent pas significativement la représentation fidèle du terrain. Ce modèle accouplé aux fonctionnalités du SIG en mode raster permet de calculer le débit à l'exutoire. Les auteurs affirment que les comparaisons entre les résultats du modèle et les mesures montrent une excellente concordance.

Rodriguez (1999) propose une modélisation distribuée basée sur une approche objet. La discrétisation spatiale du milieu s'appuie sur le cadastre. Les parcelles cadastrales constituent les éléments unitaires « implicites » de l'analyse. Elle s'appuie également sur le réseau de filaire de voie et le réseau d'assainissement, dont les nœuds constituent les nœuds du réseau de drainage des eaux pluviales. Cette analyse hydrologique est revue en détails dans la paragraphe suivante.

II.3 Développement de la méthode de délimitation des bassins versants

La méthode de délimitation automatique des bassins qui sera utilisée dans ce travail est une méthode développée par le LCPC de Nantes (Fabrice RODRIGUEZ et al.). C'est une méthode basée sur une analyse hydrologique détaillée du milieu urbain utilisant exclusivement les capacités de l'outil SIG et le contenu des banques de données urbaines. Cette analyse hydrologique a pour but la modélisation d'un bassin versant urbanisé pour simuler sa réponse hydrologique suite à une impulsion pluvieuse donnée. Il convient de signaler que la phase qui concerne la délimitation automatique de bassin ne constitue qu'une application de cette analyse hydrologique globale.

Cette méthode de délimitation a été appliquée à plusieurs bassins versants de l'agglomération nantaise dont le bassin des *Renards* (60ha) et le bassin de *Gohards* (180ha). L'application de la délimitation a donné satisfaction par rapport aux limites du bassin de référence, déterminées manuellement et par enquête de terrain.

II.3.1 Les données géographiques utilisées

Les couches de données nécessaires à la mise en œuvre de la méthode de délimitation sont illustrées sur la Figure 2.7 et résumées dans le Tableau 2.1.

- Les **parcelles** cadastrales : elles constituent les éléments unitaires implicites de l'analyse. Chaque parcelle est représentée par un objet géographique de type polygone;
- Les **bâtiments** : la couche de bâtiments représente une partie importante de la surface imperméabilisée. Elle se compose d'objets de type polygone ;
- **Filaire de voirie** : c'est une couche constituée d'objets type polyligne (segments). Chaque segment est situé dans l'axe de la voirie ; ses extrémités sont situées à l'intersection de deux rues ;
- **Tronçon surfacique de voie** : c'est une couche composée d'objets de type polygone qui constitue l'emprise de la voirie. Cette emprise comporte toute la largeur de la chaussée ainsi que le trottoir qui lui est associé ;
- **Le réseau hydrographique** : une couche constituée d'objets géographiques, de type polygone, présentant les lieux des écoulements surfaciques à ciel ouvert (rivières, fleuves, etc...).
- **Réseau d'assainissement** : cette couche représente l'ensemble de la canalisation du réseau séparatif d'assainissement d'eaux pluviales. Chaque canalisation est

représentée par un objet géographique de type polyligne (segment) dont les trois attributs nécessaires sont l'identifiant, l'altitude amont du segment (Zamont) et l'altitude aval (Zaval). La topographie du réseau d'assainissement joue un rôle primordial pour cette méthode de délimitation car elle permet de déterminer le cheminement de l'eau dans le réseau jusqu'à l'exutoire ;

- La **topographie** : cette couche est constituée par des points cotés ou d'un modèle numérique de terrain (MNT). Les points cotés sont connus grâce à un semis de points IGN(x,y,z). Un MNT peut être déduit par interpolation de ce semis de points, et permet d'estimer l'altitude au sol de tous les points d'intérêt, précisés par la suite et utiles dans le processus :
 - les extrémités des segments de filaire de voie ;
 - les points de connexion des éléments hydrologiques ;
 - les points de fond de parcelle.
- Les **exutoires** : la délimitation automatique consiste à déterminer les bassins d'apport pluviaux contribuant au ruissellement des eaux pluviales en un point connu. Pour la mettre en œuvre, il est nécessaire d'identifier un certain nombre d'exutoires : l'exutoire du bassin à délimiter, mais également les exutoires des réseaux limitrophes. La délimitation automatique associe à chaque exutoire identifié, le bassin versant de ce point particulier. D'où l'importance de cette couche constituée d'objets de type point.

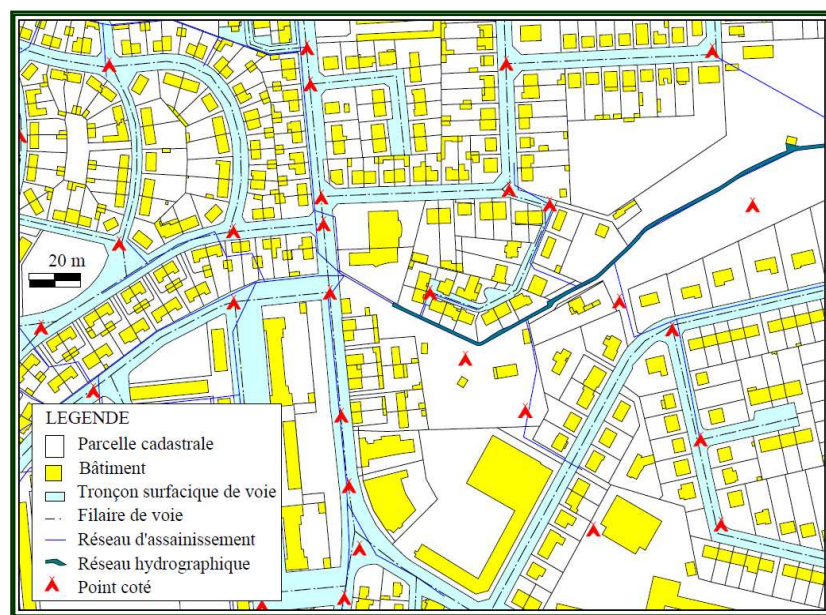


Figure 2.7 : les données géographiques utilisées (Rodriguez ,1999)

Nom de la couche	Type d'objet	Attributs
Parcelle cadastrale	polygone	Identifiant
Bâtiment	polygone	Identifiant
Tronçon surfacique de voie	polygone	Identifiant
Filaire de voie	polyligne	Identifiant
Réseau d'assainissement	polyligne	Identifiant Zamont Zaval
Points cotés connus	point	Z (altitude)
Exutoires connus (x,y,z)	point	Identifiant

Table 2.1 : les couches nécessaires pour l'application de la méthode

II.3.2 Méthodologie

La méthodologie développée pour la mise en œuvre de cette méthode est composée de deux étapes principales : Caractérisation des Eléments Hydrologiques et construction du graphe hydrologique.

Etape 1 : caractérisation des Eléments Hydrologiques

L'analyse hydrologique développée prévoit le découpage du bassin versant étudié en plusieurs éléments unitaires appelés « Eléments Hydrologiques (Ehs) ». L'élément hydrologique est défini par cette analyse comme le regroupement d'une parcelle cadastrale et de la portion de la voirie qui lui est adjacente (*Figure 2.8*). Ainsi, la surface totale des Eléments Hydrologiques (Ehs) est égale à toute la surface urbaine. L'analyse ne prévoit pas la création d'une couche géographique séparée et dédiée aux Ehs. Toutefois, elle crée un attribut dans la couche des parcelles cadastrales qui correspond à la surface de l'EH associée à chaque parcelle. Deux types de parcelles sont distingués : les parcelles viaires qui sont adjacentes avec la voirie et les parcelles masquées qui n'ont pas de connexion avec la voirie. La surface de l'EH est égale, dans ce dernier cas, à celle de la parcelle cadastrale. La surface de la

portion de la voirie adjacente des parcelles viaires est calculée en réalisant une redistribution de la surface de chaque tronçon surfacique de voie sur les parcelles adjacentes.

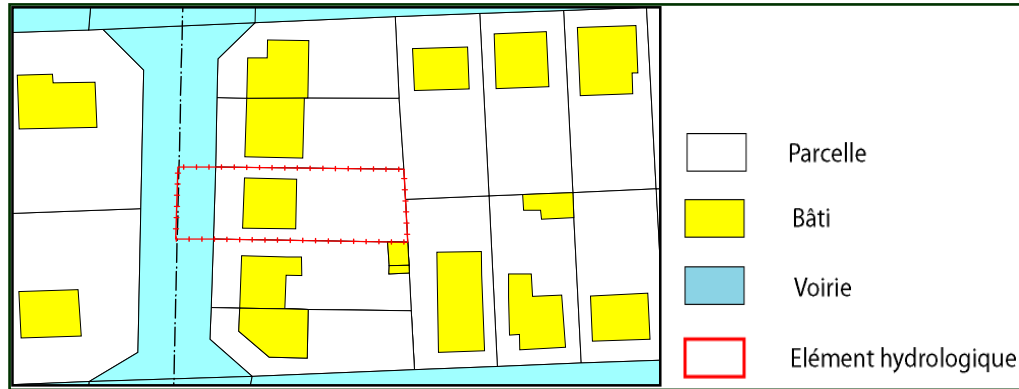


Figure 2.8 : L'élément hydrologique, défini par Rodriguez (1999)

Chaque EH possède des caractéristiques géométriques et physiques qui influent sur la quantité d'eau qui serait disponible au ruissellement suite à un évènement pluvieux. Les caractéristiques utilisées dans cette analyse et qui peuvent être déduites des banques de données urbaines sont (Figure 2.9) :

- La surface de l'élément hydrologique : $S_{totale} = S_{parcelle} + S_{voie\ adjacente}$;
- La surface bâtie " $S_{bâti}$ " qui représente la somme des surfaces de tous les bâtiments présents sur la parcelle de l'EH ;
- La distance voirie-bâti " D_{vb} " : elle correspond à la distance entre le bâtiment situé sur la parcelle et la voirie adjacente ;
- La surface imperméabilisée : $S_{imp} = S_{bâti} (1+F) + S_{voie\ adjacente} + 2 \times D_{vb}$
où F est un facteur qui représente les surfaces imperméabilisées constituées d'éléments non référencés dans le cadastre, (parking et terrasse privés, chemin bitumé reliant l'habitation à la voirie, abri de jardin).
- Le coefficient d'imperméabilisation : $C_{imp} = S_{imp} / S_{totale}$;
- Le centre de gravité de l'EH " C_g " qui correspond au centre de gravité du plus grand bâtiment situé sur la parcelle si elle est bâtie ou au centre de la parcelle sinon ;
- Le point de connexion " P_c " qui correspond à la projection orthogonale du point C_g sur le filaire de voie le plus proche. C'est le point qui permet de relier chaque EH au graphe hydrologique constitué de la voirie et du réseau d'assainissement

- Le point de fond " P_f " défini comme le point de la parcelle le plus éloigné du point de connexion ;
- La longueur de l'EH " $Long$ " qui correspond à la distance entre " P_c " et " P_f " ;
- La pente transversale de l'EH " $Pente$ " qui correspond à la différence d'altitudes entre ces deux points divisée par la longueur de l'EH " $Long$ ".

Toutes ces caractéristiques sont déterminées automatiquement sur l'ensemble du bassin versant à partir de cette étape de caractérisation.

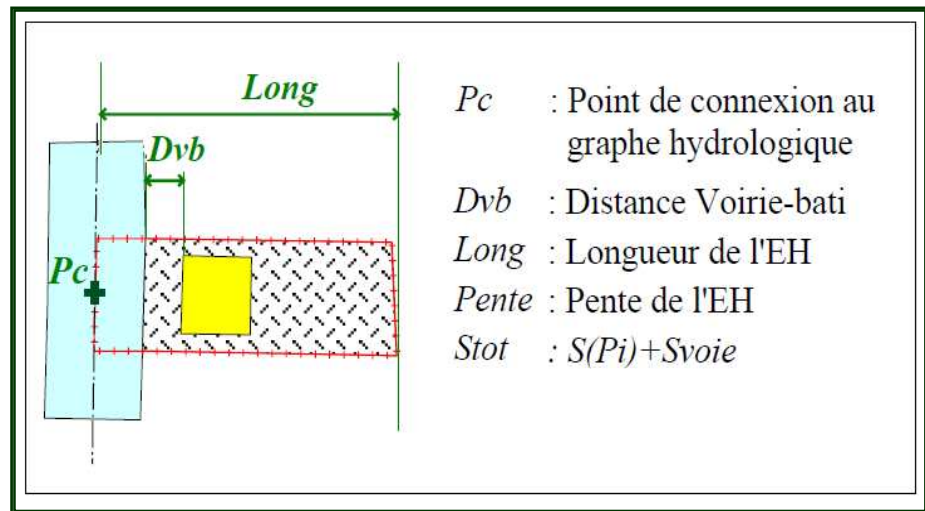


Figure 2.9 : Caractéristiques de chaque élément hydrologique (noté EH)

Etape 2 : construction du graphe hydrologique :

Le graphe hydrologique, ou réseau hydrographique urbain, est la structure linéaire qui permet l'acheminement des eaux pluviales reliant tous les Eléments Hydrologiques du bassin à son exutoire. L'eau est tout d'abord drainée de la surface de la parcelle jusqu'à la voirie adjacente où elle sera injectée au point de connexion défini auparavant. Elle va ensuite suivre un cheminement de surface empruntant un ou plusieurs filaires de voie avant d'être interceptée par un avaloir du réseau d'assainissement situé à priori à un carrefour de la voirie. L'eau sera par la suite acheminée par un ou plusieurs filaires du réseau d'assainissement et ceci jusqu'à l'exutoire.

La construction du graphe hydrologique est élaborée en trois étapes principales , à savoir :

- 1) **Construction du graphe d'assainissement** : ce graphe est construit à partir des seules données de la couche réseau d'assainissement. Chaque filaire est relié aux filaires voisins par un test sur ses extrémités. Pour savoir si un segment est relié à un autre, la concordance des coordonnées x et y est évaluée. Une fois deux filaires reliés,

un examen des cotes z de chaque filaire est effectué pour déterminer le filaire amont et le filaire aval (Figure 2.10).

- 2) **Interface entre la voirie et le réseau d’assainissement** : à chaque filaire de voie est attribué le segment d’assainissement le plus proche dans un rayon donné. Cette proximité est détectée en créant une « zone tampon » autour de chaque filaire de voie et en cherchant les segments du réseau d’assainissement qui interceptent ces zones tampon. Si un ou plusieurs segments du réseau d’assainissement sont interceptés , le filaire de voie est « interfacé », et le plus proche filaire d’assainissement est choisi ; dans le cas contraire, il est « non interfacé »(Figure 2.11).
- 3) **Graphe de filaires de voie non interfacés** : un cheminement surfacique empruntant les filaires de voie non interfacés est reconstitué de la même manière que pour construire le graphe d’assainissement. Le dernier filaire de ce graphe correspond au premier filaire de voie interfacé par le réseau d’assainissement (Figure 2.12).

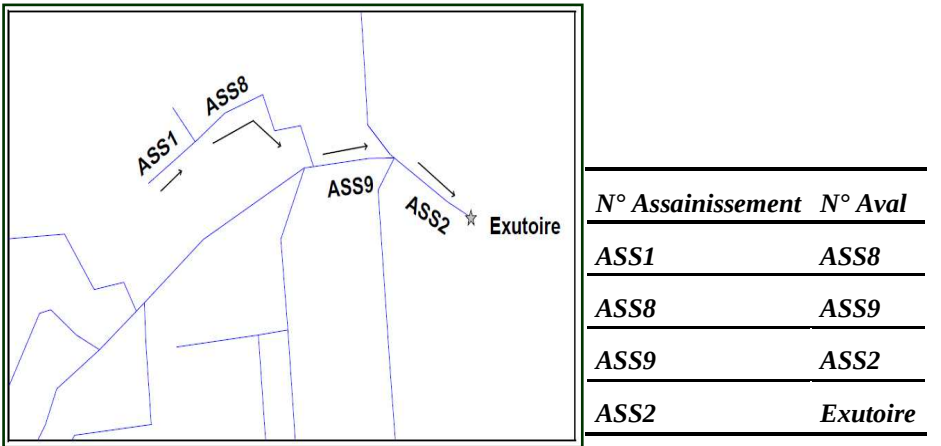


Figure 2.10 : graphe de l’assainissement

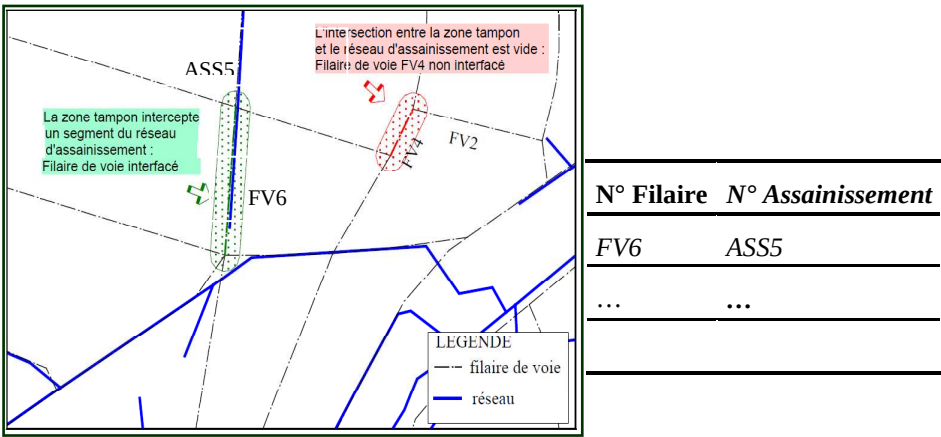


Figure 2.11 : Interface entre la voirie et le réseau d’assainissement

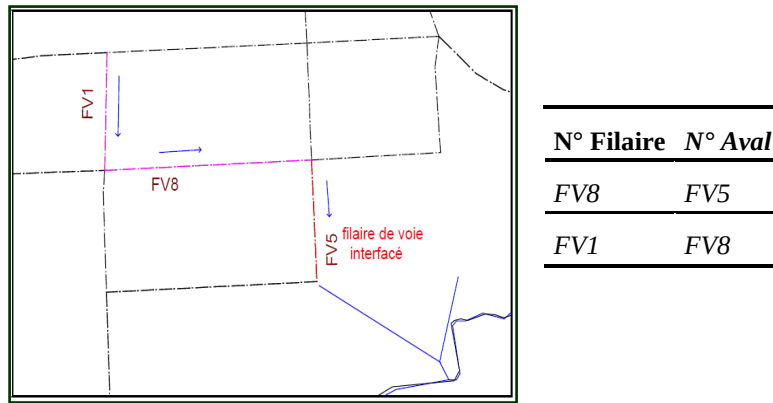


Figure 2.12 : graphe de voirie

Les sources du graphe hydrologique sont les Éléments Hydrologiques. La première branche du graphe hydrologique est la connexion entre les EHs et la voirie, c'est à dire le segment reliant le centre de gravité de l'EH " C_g " à son point de connexion " P_c ". Cette branche a été définie lors de l'étape de caractérisation. Le graphe hydrologique est finalement composé des cheminements de l'eau pluviales reliant tous les éléments hydrologiques du bassin versant à son exutoire (Figure 2.13).

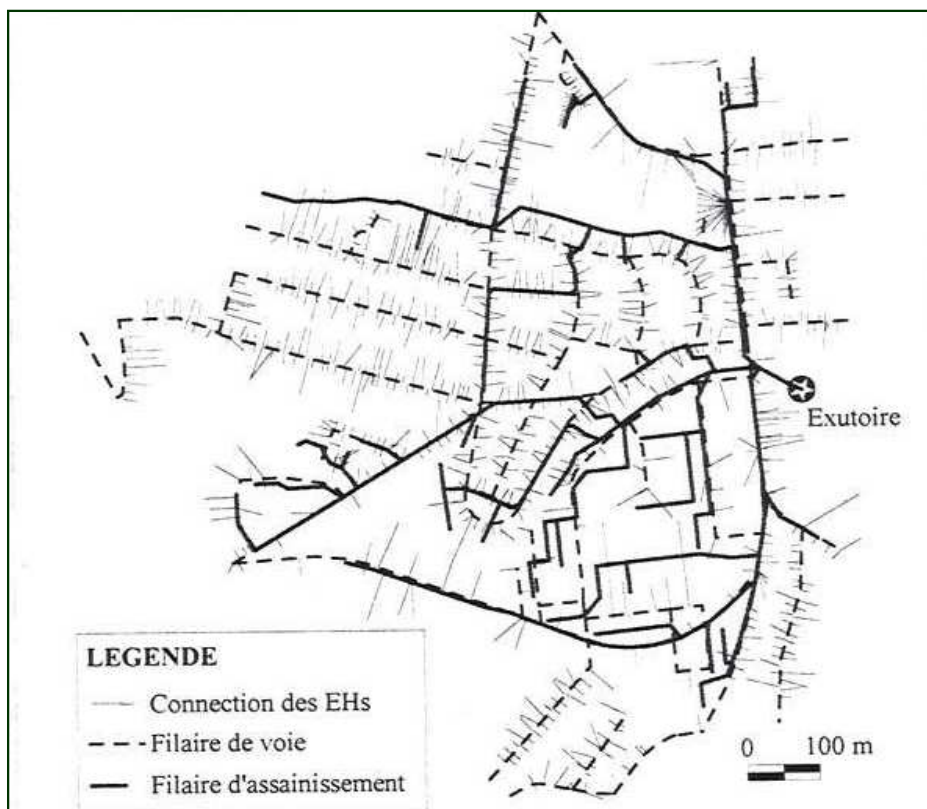


Figure 2.13 exemple du graphe hydrologique

II.3.3 Délimitation automatique des bassins

L'application de cette analyse hydrologique permet de délimiter un bassin versant associé à un exutoire donné. La méthode consiste à déterminer l'ensemble des éléments hydrologiques qui contribuent au ruissellement vers cet exutoire défini par l'utilisateur. En effet, tous les éléments hydrologiques sont connectés aux filaires de voie à travers les points de connexion. D'autre part, ces filaires sont eux aussi connectés aux collecteurs du réseau d'eaux pluviales à travers la table des filaires de voie interfacés. Le graphe hydrologique permet de connaître les tronçons du réseau d'assainissement des eaux pluviales et les filaires de voie qui drainent ces eaux vers l'exutoire prédéfini. Le bassin versant associé à cet exutoire est défini par l'ensemble des Eléments hydrologiques connectés à ces filaires de voie. Pour l'affichage du bassin délimité, il suffit d'afficher les tronçons surfaciques associés aux filaires de voie reliés à l'exutoire ainsi que les parcelles cadastrales qui sont connectées à ces filaires (Figure 2.14).

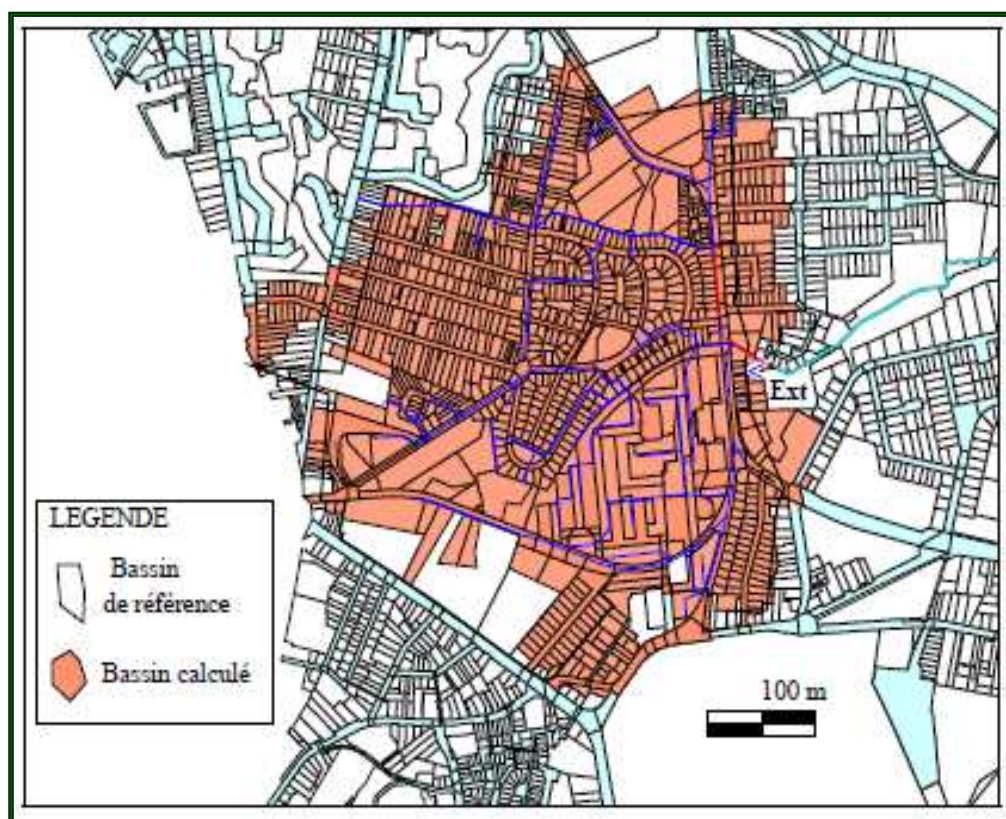


Figure 2.14 : Exemple d'application de la méthode au bassin de Renards dans l'agglomération nantaise, Rodriguez (1999)

III. Mise en œuvre de la méthode de délimitation

Après avoir présenté dans le chapitre précédent la méthode de délimitation des bassins qui sera utilisée, une application de cette méthode sera entamée dans ce chapitre. Tout d'abord, une analyse des données disponibles est exposée. Ensuite, une étape de prétraitement est entamée avant la mise en application de la méthode. Enfin, les résultats obtenus seront interprétés et corrigés avant de procéder à la cartographie thématique des différents sous-bassins obtenus (délimitation et coefficient d'imperméabilisation).

III.1 Analyse des données

Les données géographiques utilisées ont été transmises par le bureau G2C environnement. Le logiciel [Carta@jour](#) développé par ce bureau a été utilisé pour la visualisation et l'analyse des données disponibles. Un constat d'ordre général, nous permet de dire que le SIG de la communauté d'agglomération de Caen La Mer est bien structuré du point de vue de l'architecture des différentes couches des données. Néanmoins, plusieurs couches géographiques ne sont pas complètes et leurs attributs ne sont pas complètement renseignés. Un décalage entre les photographies aériennes qui couvrent toute la zone et les autres couches géographiques (Bâtiment, Cours d'eau) a été constaté. Du point de vue du réseau d'assainissement, toutes les communes de l'agglomération sont équipées d'un réseau séparatif à l'exception de la commune de Colombelles qui est équipée d'un réseau unitaire. L'agglomération est desservie par 824Km de réseaux d'eaux usées, 557 Km de réseaux d'eaux pluviales et 15Km de réseaux unitaires. Cette analyse des données portera essentiellement sur les couches géographiques nécessaires à la bonne conduite de l'analyse hydrologique développée précédemment. Elles regroupent les parcelles cadastrales, les bâtiments, la voirie, les éléments du réseau d'assainissement, les éléments liés aux rivières et aux fleuves, et les données topographiques.

a) les parcelles :

La couche de parcelles comporte un total de 63173 parcelles. Elle présente les anomalies suivantes :

- ❑ 168 auto intersections : le contour de la parcelle présente des intersections avec lui-même ;
- ❑ 1639 recouvrements : des parcelles se chevauchent avec d'autres parcelles ;
- ❑ 163 parcelles se situent à l'intérieur des emprises des bâtiments qui leurs sont associées ;
- ❑ les parcelles ne couvrent pas toute la zone d'étude (présence des zones vierges).

La *Figure 3.1* montre un exemple type d'une parcelle (en rouge) présentant des anomalies d'intersection et de recouvrement; on constate également des zones blanches non couvertes par la couche de parcelles.

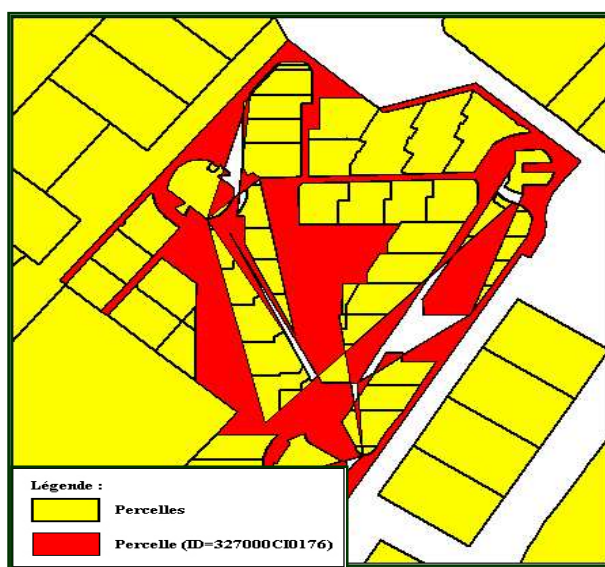


Figure 3.1 : exemple d'une parcelle présentant des anomalies

b) les bâtiments :

La couche de bâtiments comporte 76 352 bâtiments. Elle présente les anomalies suivantes :

- plusieurs bâtiments ont une superficie très faible (exemple 125 ayant une surface inférieure à 1 m²) ;
- 171 anomalies d'intersection avec le filaire de voirie ont été détectées (*Figure 3.2*).

c) la voirie :

Deux types de données composent la voirie :

- Tronçons surfaciques : une absence quasi-complète des tronçons surfaciques de la voirie et des surfaces imperméabilisées en général (hors bâtiments) a été remarquée.
- Filaire de voie : la couche de filaire de voie est incomplète (Figure 3.3). Le manque de filaire de voie est observé principalement dans les communes de la périphérie.

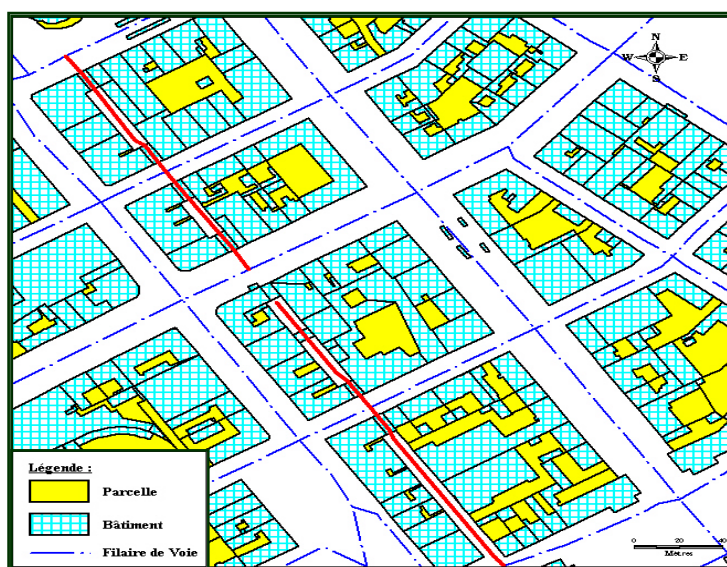


Figure 3.2 : exemple d'une intersection d'un filaire de voie (en rouge) avec des bâtiments



Figure 3.3 : exemple d'une couche de filaire de voie incomplète

d) le réseau d'assainissement :

La couche du réseau d'assainissement des eaux pluviales comporte 22013 tronçons. Les attributs d'un tronçon comportent l'altitude en amont (noté *Zamont*) et l'altitude en aval (noté *Zaval*). Ces deux attributs, indispensables pour notre analyse hydrologique, ne sont pas renseignés pour 15173 tronçons de réseau. Une cartographie des tronçons de réseau non renseignés permet de localiser cette insuffisance des données (*Figure 3.4*). On remarque à nouveau que ce manque de données (*Zamont/Zaval*) est principalement localisé dans les communes périphériques. L'analyse de cette couche a permis aussi de constater que les connexions entre les tronçons du réseau ne sont pas toujours correctes.

e) topographie :

Il existe un modèle numérique de terrain d'un maillage de 10x10m qui couvre toute la zone de l'agglomération.

f) Exutoires :

Un exutoire représente un point de rejet du réseau d'assainissement vers une rivière ou un ouvrage de traitement. La couche des exutoires de l'agglomération comporte 533 points dont 68 seulement sont renseignés en altitude.

Ce manque des données a été synthétisé dans un document et envoyé au bureau G2C environnement pour information. Cependant, aucun complément de données n'a été fourni par le bureau G2C ou par la communauté d'agglomération tout au long de la période du stage. Suite à ce manque des données constaté surtout en périphérie deux décisions importantes ont été prises :

1. limiter la zone de l'étude à la ville de Caen au lieu de toute l'agglomération;
2. Travailler avec les données disponibles en faisant tout le traitement nécessaire pour la mise en œuvre de la méthode de délimitation.

Les différentes couches nécessaires à l'analyse hydrologique sont par la suite exportées en format Mapinfo® pour la phase de prétraitement.

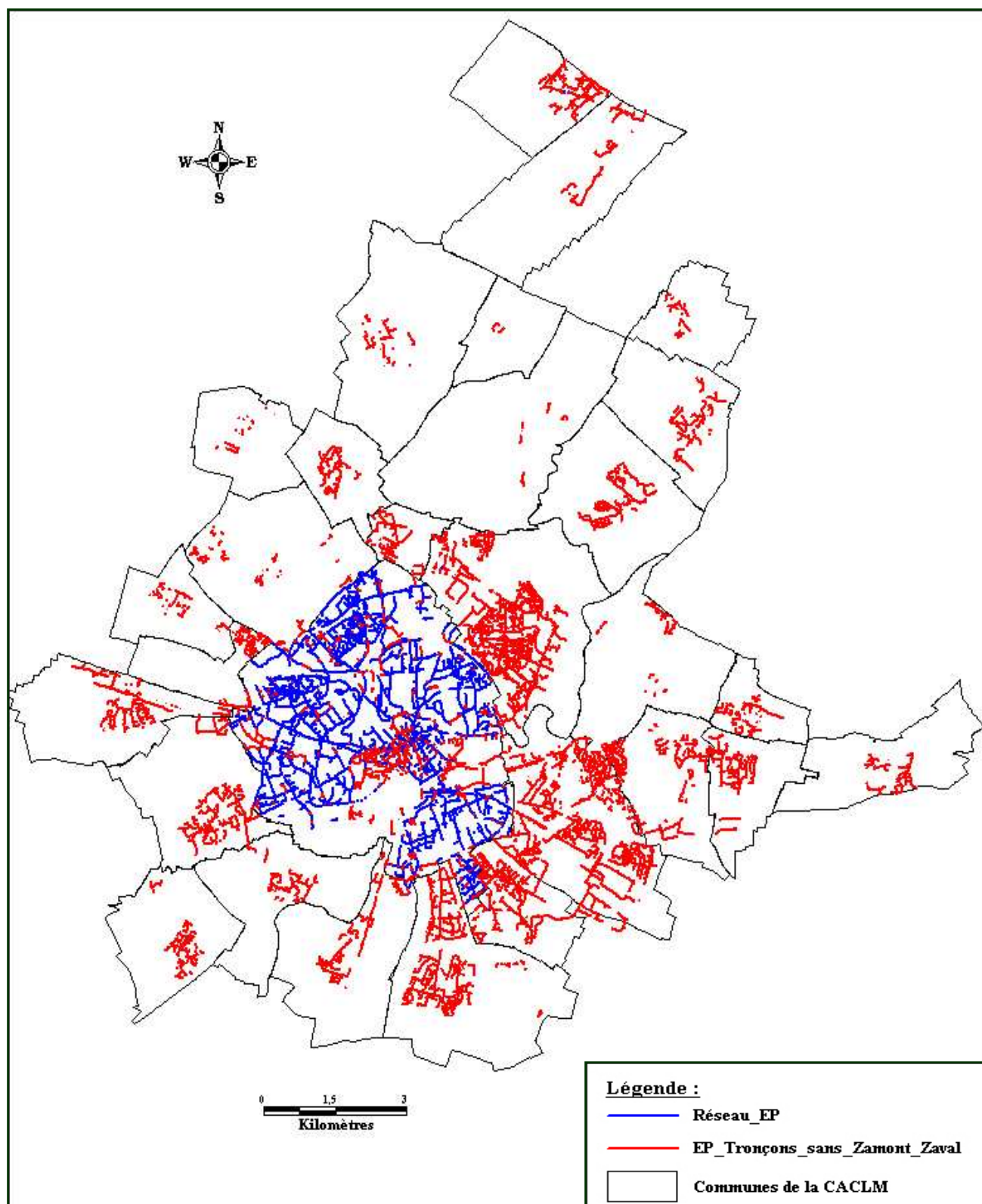


Figure 3.4 : Manque des données relatives à la topographie du réseau d'assainissement pluvial

III.2 Prétraitement des données

Il s'agit de traiter toutes les couches, une par une, afin qu'elles soient parfaitement compatibles avec le programme de délimitation.

Tout d'abord, il a été vérifié que toutes les couches ont été géo référencées dans le même système de projection, à savoir France Lambert-93 qui est associé au système géodésique légal en France RGF93. En effet, suite au décret n°2006-272 du 3 mars 2006, toutes les administrations de l'État, collectivités locales et entreprises chargées de l'exécution d'une mission de service public devront utiliser le système de référence RGF93 pour leurs échanges des données géoréférencées.

Ensuite, il a été procédé au traitement des différentes couches nécessaires pour l'analyse hydrologique.

a) *La couche de parcelles* : les auto intersections et les recouvrements ont été corrigés. La structure de la table des données attributaires a été modifiée en la transformant en une table qui contient un seul attribut, à savoir l'identifiant de la parcelle.

b) *La couche de bâtiments* : la structure de la table a été modifiée de la même manière que celle de la parcelle.

c) *La couche de tronçons surfaciques* : une couche de tronçons surfaciques a été créée à partir de l'hypothèse suivante : toutes les surfaces des voiries situées entre les parcelles sont imperméabilisées. Cette hypothèse est correcte en centre ville, car les espaces publics sont très souvent imperméabilisés, mais elle est plus discutable à la périphérie de la ville. L'idée consiste à créer une zone tampon de 25m autour de chaque filaire de voie et de supprimer par la suite la surface de cette zone qui correspond à une parcelle. La zone tampon est découpée selon le(s) filaire(s) de voirie qu'elle contient pour former plusieurs tronçons de voirie. L'objectif est d'avoir, dans la mesure du possible, un tronçon surfacique associé à un filaire de voie. Les recouvrements et les auto-intersections des tronçons surfaciques seront par la suite éliminés. La table de tronçons surfaciques, ainsi créée, contient un seul attribut qui correspond à l'identifiant du tronçon.

d) *La couche de filaire de voie* : Le traitement de la couche de filaire de voie a consisté à créer les filaires de voie qui ne sont pas disponibles dans les données initiales (*Annexe (Figure 2)*). Il a consisté en outre à vérifier que les extrémités étaient connectées les unes aux autres et que les intersections correspondaient à des extrémités de filaires. Pour l'analyse hydrologique utilisée, les filaires de voie guident l'écoulement superficiel des eaux de ruissellement, par

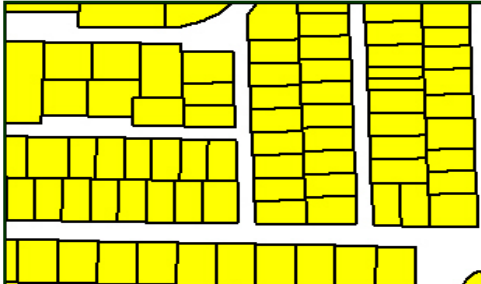
conséquent les cotes en amont et en aval devront être connues. Pour cela, le logiciel Matlab® a été utilisé pour l'interpolation de ces cotes à partir du modèle numérique de terrain. La table ainsi constituée comprend sept attributs par filaire, à savoir : l'identifiant, (x,y,z) de l'amont et (x,y,z) de l'aval.

e) *La couche de filaire d'assainissement* : le traitement a consisté principalement à renseigner les cotes des radiers non renseignées dans la couche des données initiales. Pour cela, les données relatives aux regards de réseau d'assainissement ont été utilisées; cette information permet de connaître l'altitude du radier du réseau d'assainissement en un ensemble des points réguliers, correspondant aux extrémités de chaque tronçon du réseau. Par la suite, il a été procédé à l'interpolation des altitudes des tronçons qui ne sont pas encore renseignés à partir d'un réseau de points cotés constitué des extrémités des tronçons renseignés et les points de regard du réseau. Une vérification à chaque extrémité était nécessaire pour vérifier que l'altitude ainsi interpolée est cohérente avec les extrémités voisines du réseau d'assainissement, le modèle numérique de terrain et le sens logique de l'écoulement en partant de l'hypothèse que les réseaux d'assainissement suivent le plus souvent la topographie du sol. Des tronçons supplémentaires ont été créés pour corriger les connexions entre les tronçons du réseau (*Annexe (Figure 1)*). La structure de la table des données attributaires est restructurée de la même manière que celle de filaire de voie.

f) *Couche des exutoires* : l'examen du réseau d'assainissement a permis de choisir 27 exutoires dans la zone d'étude, tous placés aux extrémités aval du réseau. La configuration de la table des données de l'exutoire est identique à celle d'un tronçon du réseau d'assainissement.

Voici un échantillon des informations géographiques, nécessaires pour la mise en œuvre de la méthode de délimitation, obtenues suite à cette phase de prétraitement :

a) *Parcelles cadastrales* :

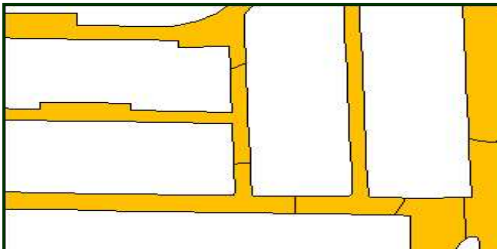
	NUMPAR
	PAR3700
	PAR3701
	PAR3702
	PAR3703
	PAR3704
	PAR3705
	PAR3706
	PAR3707
	PAR3708
	PAR3709
	PAR3710

b) Bâtiments :



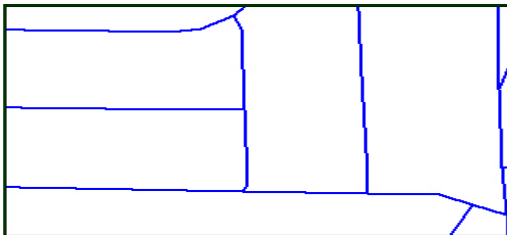
NUMOBJ
OBJ18500
OBJ18501
OBJ18502
OBJ18503
OBJ18504
OBJ18505
OBJ18506
OBJ18507
OBJ18508
OBJ18509
OBJ18510

c) Tronçons surfaciques de voirie



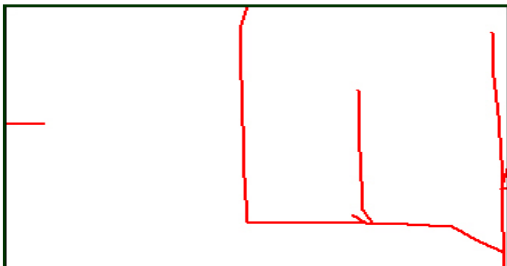
NUMOBJ
TRS1400
TRS1401
TRS1402
TRS1403
TRS1404
TRS1405
TRS1406
TRS1407
TRS1408
TRS1409
TRS1410

d) Filaires de voie



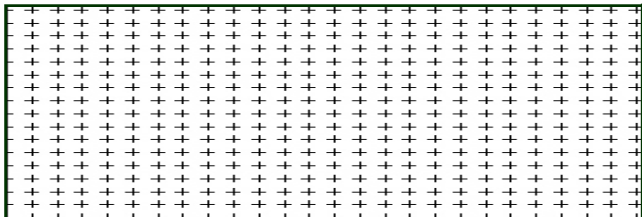
NUMOBJ	xd	yd	xa	ya	ZAMO	ZAVA
FLV1	404 230,12	1 170 269,40	404 300,01	1 170 060,97	62,22	58,00
FLV2	404 339,16	1 169 644,68	404 185,08	1 169 580,69	44,69	43,27
FLV3	404 399,97	1 169 543,81	404 442,41	1 169 557,77	37,28	37,00
FLV4	404 920,65	1 169 796,27	404 842,02	1 169 706,86	45,50	42,83
FLV5	404 897,73	1 169 605,42	404 940,62	1 169 545,29	36,53	34,18
FLV6	404 645,50	1 169 589,99	404 689,19	1 169 586,82	36,86	36,35
FLV7	403 537,55	1 169 349,34	403 701,05	1 169 442,27	38,19	35,46
FLV8	403 540,85	1 169 286,37	403 715,46	1 169 329,26	35,41	32,75
FLV9	403 542,66	1 169 223,29	403 700,49	1 169 219,66	33,00	30,62
FLV10	403 713,76	1 169 166,90	403 552,08	1 169 004,76	29,33	27,75
FLV11	403 534,38	1 169 493,89	403 733,39	1 169 526,11	46,06	39,05

e) Réseau d'assainissement



NUMOBJ	xd	yd	ZAMO	xa	ya	ZAVA
ASS81	402 323,75	1 170 732,44	59,133	402 335,32	1 170 739,92	59,06
ASS82	402 320,57	1 170 706,91	59,143	402 323,75	1 170 732,44	59,133
ASS83	402 344,51	1 170 694,99	58,62	402 349,39	1 170 723,70	58,32
ASS84	402 497,11	1 170 698,06	55,536	402 514,93	1 170 656,98	55,223
ASS85	403 471,18	1 171 617,77	55,99	403 480,26	1 171 576,47	55,91
ASS86	402 847,71	1 170 763,75	45,05	402 847,37	1 170 738,68	44,887
ASS87	402 851,34	1 170 833,64	46,333	402 847,71	1 170 763,75	45,05
ASS88	402 829,10	1 170 934,28	49,112	402 837,16	1 170 874,49	47,874
ASS89	402 837,16	1 170 874,49	47,874	402 837,61	1 170 865,07	47,737
ASS90	402 809,13	1 171 079,29	50,78	402 823,88	1 171 072,71	50,723
ASS91	403 492,62	1 171 524,62	55,86	403 504,31	1 171 476,63	55,75

f) La topographie



CoordX	CoordY	Altitude
397300	1171000	66,3081
397310	1171000	66,2795
397320	1171000	66,247
397330	1171000	66,2043
397340	1171000	66,1574
397350	1171000	66,1018
397360	1171000	66,0436
397370	1171000	65,9787
397380	1171000	65,9126
397390	1171000	65,8444
397400	1171000	65,7777

Figure 3.5 : les données géographiques traitées

Les différentes couches sont superposables afin de reconstitué le milieu urbain selon l'analyse hydrologique utilisée :

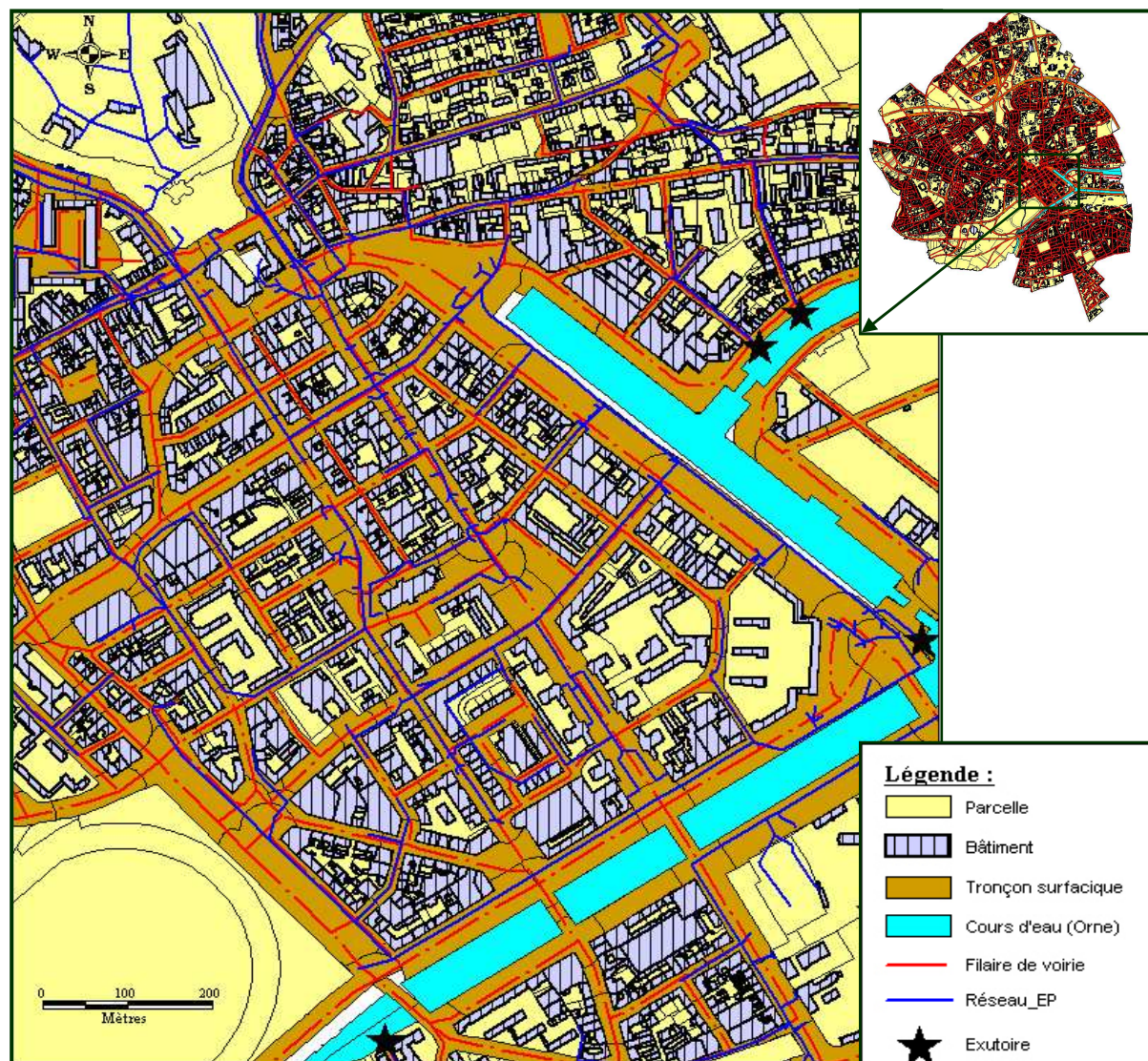


Figure 3.6 : le milieu urbain selon l'analyse hydrologique utilisée (zoom sur le centre ville de Caen)

III.3 Mise en œuvre de la méthode

Les différentes couches étant traitées, il ne reste plus qu'appliquer la méthode de délimitation des bassins d'apports pluviaux. Cette méthode, comme déjà mentionné auparavant, s'applique en deux étapes : la caractérisation des éléments hydrologique et la construction du graphe hydrologique. L'application de la première étape de caractérisation a permis de calculer les caractéristiques descriptives de chaque élément hydrologique (EH), à savoir (Tab 3.1):

- **spar** : Surface de la parcelle associée à l'EH;
- **sbati** : surface de l'ensemble des bâtiments situés sur cette parcelle;
- **svoieadj** : surface de la voie adjacente à la parcelle;
- **Stotale** : surface totale de l'EH;
- **Simp** : la surface imperméabilisée de l'EH;
- **Cimp** : coefficient d'imperméabilisation de l'EH,
- **NUMFIL** : le filaire de voie auquel l'EH est connecté;
- **Dvb** : distance voirie-bâti;
- **Dfond** : longueur estimée de l'EH;
- **Dist** : la distance entre le centre de gravité C_g et le point de connexion P_c ;
- **(xproj, yproj)** : coordonnées planimétriques du point de connexion P_c de l'EH;
- **(xfond, yfond)** : coordonnées planimétriques du point du fond P_f de l'EH;
- **(xg, yg)** : coordonnées planimétriques du centre de gravité C_g de l'EH.

NUMPAR	spar	sbati	svoieadj	Stotale	Simp	Cimp	NUMFIL	dvb	dfond	dist	xproj	yproj	xfond	yfond	xg	yg
PAR16118	1 092,31	170,979	179,325	1 271,63	392,206	0,308427	FLV474	3,85319	31,1906	16,7579	401 615,41	167 753,17	401 654,78	167 763,95	401 626,64	167 771,89
PAR16125	469,264	77,8652	0	469,264	107,813	0,229749	FLV471	7,18726	23,3213	10,6309	401 689,85	167 801,71	401 677,58	167 773,93	401 679,97	167 791,97
PAR16126	669,131	179,887	161,054	830,185	411,989	0,496262	FLV471	17,535	40,9774	29,876	401 689,81	167 801,74	401 663,06	167 755,55	401 662,04	167 774,38
PAR16111	334,556	115,211	83,7067	418,263	233,711	0,558766	FLV474	5,87532	27,6899	20,5168	401 625,62	167 649,46	401 660	1 167 638	401 651,37	167 641,86
PAR16102	991,367	152,338	410,796	1 402,16	628,463	0,44821	FLV474	17,4309	55,8153	32,616	401 629,07	167 652,82	401 637,64	167 724,92	401 621,76	167 694,62
PAR16099	403,101	99,1001	141,725	544,825	262,103	0,481077	FLV1926	0,72917	21,5301	12,0048	401 595,37	167 718,95	401 622,33	167 710,73	401 608,6	167 710,51
PAR16103	321,296	134,322	52,7473	374,043	252,649	0,675452	ASS5099	19,3575	40,4359	31,8876	401 656,48	167 657,61	401 652,39	167 710,05	401 649,33	167 698,48
PAR16104	323,324	90,8481	80,8965	404,22	192,752	0,476849	FLV1926	1,41894	23,7159	12,8855	401 613,39	167 670,17	401 634,35	167 692,92	401 627,89	167 678,74
PAR16105	299,714	147,414	74,9892	374,703	257,992	0,688524	FLV474	3,0529	27,0101	15,7327	401 625,62	167 649,46	401 640,71	167 681,23	401 633,11	167 668,53
PAR16106	306,247	102,531	126,901	433,148	250,937	0,579335	ASS5380	0,5	20,8042	10,2612	401 652,76	167 656,96	401 640,71	167 681,23	401 650,47	167 670,11

Tableau 3.1 : Caractérisation des éléments hydrologiques

La deuxième étape a permis de construire le graphe hydrologique. Tous les cheminements possibles des eaux de ruissellement sont ainsi déterminés. Les éléments hydrologiques qui contribuent à l'écoulement vers un exutoire donné sont sélectionnés pour former le bassin versant associé à cet exutoire. Les résultats de l'application de cette méthode de délimitation des bassins sont présentés dans la *Figure 3.7*.

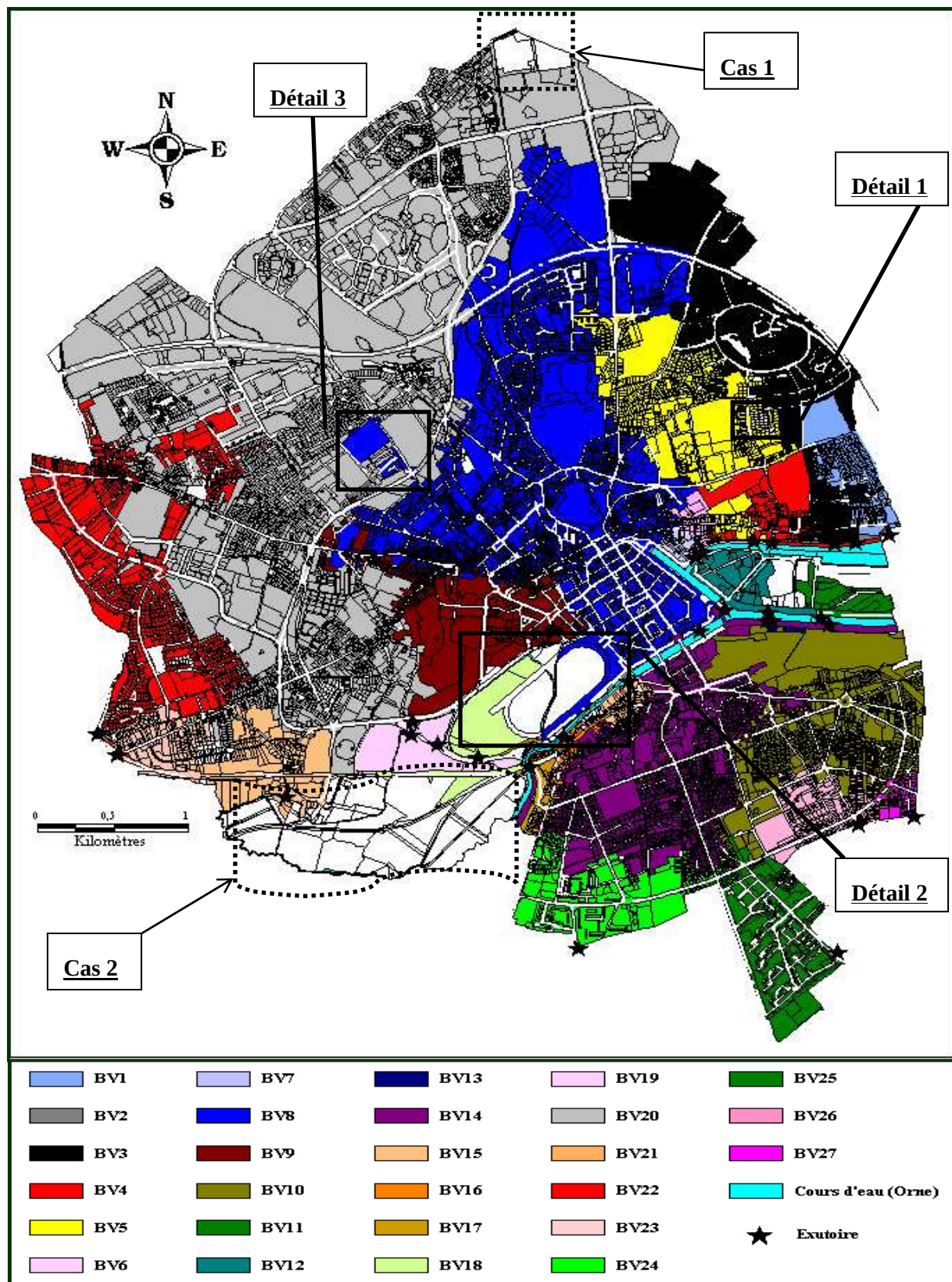


Figure 3.7 : résultats bruts de l'application de la méthode de délimitation

III.4 Interprétation des résultats

Au total, 27 sous-bassins versants ont été délimités. Ces bassins sont associés au 27 points de rejet qui ont été identifiés au préalable. Six exutoires parmi eux ont été choisis pour tenir compte des réseaux limitrophes; les bassins associés à ces exutoires sont drainés à l'extérieur de la ville de Caen. Il convient de signaler ici l'importance des données saisies manuellement pour combler les trous de manque des données. Par conséquent, il sera judicieux de vérifier, sur le terrain ou à travers l'apport des nouvelles données, la conformité des résultats obtenus. L'analyse des résultats bruts a permis de soulever quelques problèmes liés à l'analyse hydrologique utilisée. Des ajustements et corrections seront nécessaires pour affiner la précision des résultats obtenus.

a) Problèmes rencontrés :

La *Figure 3.7* montre que des parcelles situées à l'intérieur de la ville n'ont été raccordées à aucun sous-bassin. Ce phénomène peut avoir lieu essentiellement pour les deux raisons suivantes :

1. les parcelles sont raccordées à des rues dont le relief a tendance à acheminer les eaux pluviales en dehors de la zone d'étude (*Figure 3.7, Cas1*), ou vers les cours d'eaux sans passer par un réseau d'assainissement pluviales (*Figure 3.7, Cas2*).
2. les parcelles sont raccordées à des filaires de voie qui ne sont pas connectés au réseau d'assainissement suite à une dépression au niveau du relief du terrain. Les détails 1,2 permettent de comprendre ce problème de dépression.

Détail 1 :

Les parcelles ignorées (zones blanches) sont raccordées aux deux filaires de voie *FLV 1733* et *FLV 1743* qui se retrouvent dans une dépression au niveau carrefour (*Figure 3.8*) sans être interfacés par le réseau d'assainissement.

Détail 2 :

La même chose s'applique aux parcelles *PAR 15143* & *PAR15145* avec les filaires de voie *FLV 2436* et *FLV 1789* (*Figure 3.9*). Ces deux grandes parcelles sont vraisemblablement drainées vers le cours d'eau qui les sépare. Ceci permet de soulever un problème intrinsèque à l'analyse hydrologique utilisée. Cette analyse ne prend pas en compte le réseau hydrographique naturel. Les cours d'eau en ville ne sont pas intégrés dans la construction du graphe hydrologique. Cet exemple montre également un autre problème lié aux parcelles de

grande taille. En effet, selon l'analyse hydrologique utilisée, toute la surface de la parcelle « PAR 15143 » est drainée vers un seul filaire de voie, à savoir « FLV 1789 » alors qu'une bonne partie de cette grande parcelle pourrait bien être drainée par un autre filaire de voie.

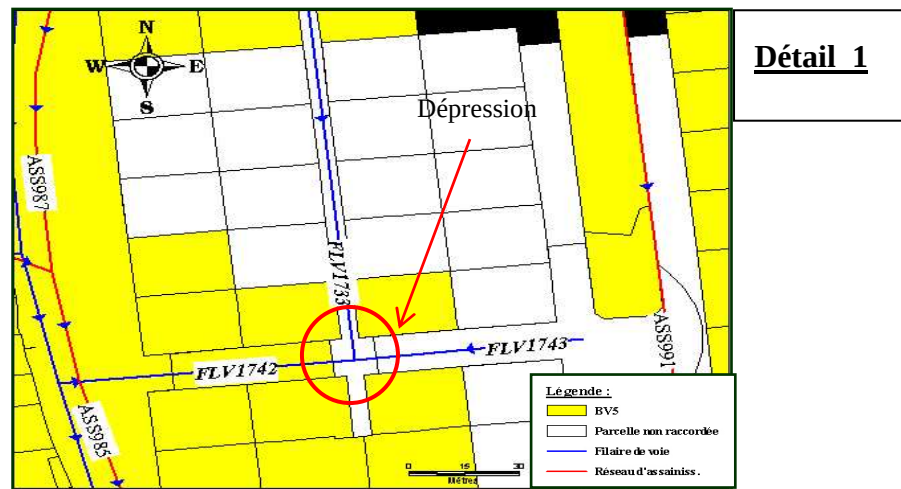


Figure 3.8 : détail 1, Dépression au niveau du bassin n°5

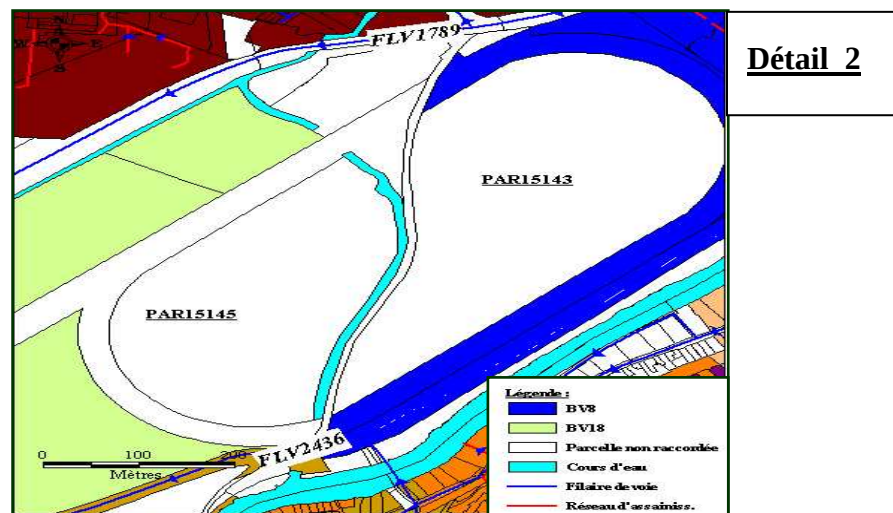


Figure 3.9 : détail 2, dépression au niveau du bassin n°18

On remarque également des parcelles attribuées à un bassin qui s'intercalent à l'intérieur dans un autre bassin. La Figure 3.10 représente un exemple type de ce cas.

Des parcelles du bassin n°8 sont situées à l'intérieur du bassin n°20, ce qui peut apparaître comme une anomalie. Une analyse détaillée de la situation permet de valider cette situation. Ces parcelles sont en fait drainées par un petit collecteur (ASS1875) qui passe au-dessus du collecteur principal (ASS1874) du bassin n°20, et se raccorde ensuite au réseau d'assainissement du bassin n°8.

Cette configuration assez particulière traduit bien l'avantage de l'approche objet utilisée par cette analyse hydrologique pour le traitement des réseaux d'assainissements complexes.



Figure 3.10 : détail 3, parcelles d'un bassin intercalées dans un autre

b) Corrections réalisées :

Il a été procédé par la suite à un traitement des dépressions au cas par cas pour raccorder les parcelles ignorées aux bassins versants les plus adéquats en terme du relief du terrain. La méthode de délimitation pourrait être améliorée pour tenir compte de ces dépression en les traitant automatiquement. Cette correction n'a pas été faite pour le cas des grandes parcelles (zone sud-ouest), car ces parcelles peuvent modifier d'une manière substantielle la surface du bassin délimité d'autant plus qu'on ne dispose pas des informations géographiques suffisantes pour valider un tel raccordement. Il a été enfin procédé au calcul des caractéristiques des bassins versants délimités. Le Tableau 3.2 présente, pour chaque bassin versant, la surface totale, la surface imperméabilisée, le coefficient d'imperméabilisation, le nombre d'éléments hydrologiques et la surface moyenne de ces éléments hydrologiques. Le nombre important des bassins peut être expliqué par les points de rejets multiples distribués sur les différents cours d'eau qui traverse la ville. Deux bassins (Bassin8 et bassin20) apparaissent comme les plus grands bassins délimités. Des bassins contenant quelques éléments hydrologiques sont remarqués. Ceci, peut être expliqué par le fait que ces bassins se composent souvent de quelques parcelles situées à proximité des cours d'eau.

N° Bassin	Stotale (m ²)	Simp (m ²)	Cimp (global)	Nbre EH	Surf_moy EH (m ²)
1	283 636	93 627	0.33	309	918
2	20 250	7 821	0.39	15	1 350
3	1 379 291	576 525	0.42	466	2 960
4	281 571	107 154	0.38	131	2 149
5	1 037 666	383 731	0.37	865	1 200
6	66 162	39 893	0.6	86	769
7	46 641	39 161	0.84	45	1 036
8	4 217 547	2 170 916	0.51	3 906	1 080
9	873 532	428 561	0.49	622	1 404
10	1 430 495	616 023	0.43	1 138	1 257
11	145 530	91 146	0.63	29	5 018
12	271 251	124 667	0.46	54	5 023
13	8 900	5 067	0.57	4	2 225
14	1 484 886	699 060	0.47	2 063	720
15	70 793	35 098	0.5	129	549
16	63 764	25 277	0.4	116	550
17	71 107	36 369	0.51	78	912
18	256 492	35 640	0.14	5	51 298
19	261 823	89 628	0.34	6	43 637
20	7 914 956	3 149 183	0.4	4 016	1 971
21	473 778	123 373	0.26	215	2 204
22	1 422 235	514 715	0.36	1223	1 163
23	232 161	87 374	0.38	211	1 100
24	573 047	226 636	0.4	239	2 398
25	593 505	309 343	0.52	304	1 952
26	305 119	126 729	0.42	370	825
27	62 717	25 312	0.4	76	825

Tableau 3.2 Caractéristiques des bassins délimités

La distribution des surfaces des éléments hydrologiques est présentée dans la *Figure 3.11*. L'analyse de cette distribution montre une hétérogénéité de la taille des éléments unitaires utilisés pour décrire le bassin versant dans cette analyse. Bien que la majorité des éléments hydrologiques ont une surface comprise entre 100 et 800 m², la surface moyenne des éléments hydrologiques est de 1500 m². Ceci est lié au fait qu'un nombre important des parcelles de grande taille a largement affecté la moyenne. Ce problème d'hétérogénéité des éléments hydrologiques est bien illustré dans la *Figure 3.12*; tandis que les deux grands bassins délimités (N°8 et N°20) ont pratiquement le même nombre d'éléments hydrologiques, la surface du bassin N°20 est pratiquement le double de celle du bassin N°8. Ceci est lié au fait qu'une bonne concentration des bâtiments collectifs est pavillonnaire est remarquée dans le bassin N°8 située au centre ville, alors que le bassin N°20, situé en périphérie, contient des grandes parcelles abritant des zones commerciales, des stades olympiques (stade d'Ornano et l'ancien stade de Caen) et des zones naturelles. Les parcelles de grande taille peuvent affecter considérablement la précision de cette délimitation des bassins versants, du fait qu'elles sont traitées de la même manière que les petites parcelles. Une parcelle de grande taille peut avoir en réalité plusieurs exutoires sur des rues différentes; ceci n'est pas envisagé dans cette analyse hydrologique où toute l'eau drainée de la parcelle est injectée à un seul point de connexion situé sur un filaire de voie. Cette hypothèse affectera en plus l'estimation du temps d'arrivée à l'exutoire ainsi que la longueur de cheminement hydrologique à partir de cette grande parcelle.

La *Figure 3.13* présente une cartographie des bassins versants délimités. L'absence des bassins de référence rend difficile la validation de cette délimitation. Le bassin de référence est généralement tracé par le service technique du réseau d'assainissement à partir d'une enquête sur le terrain lors d'une averse et d'une vérification du réseau d'assainissement pluvial.

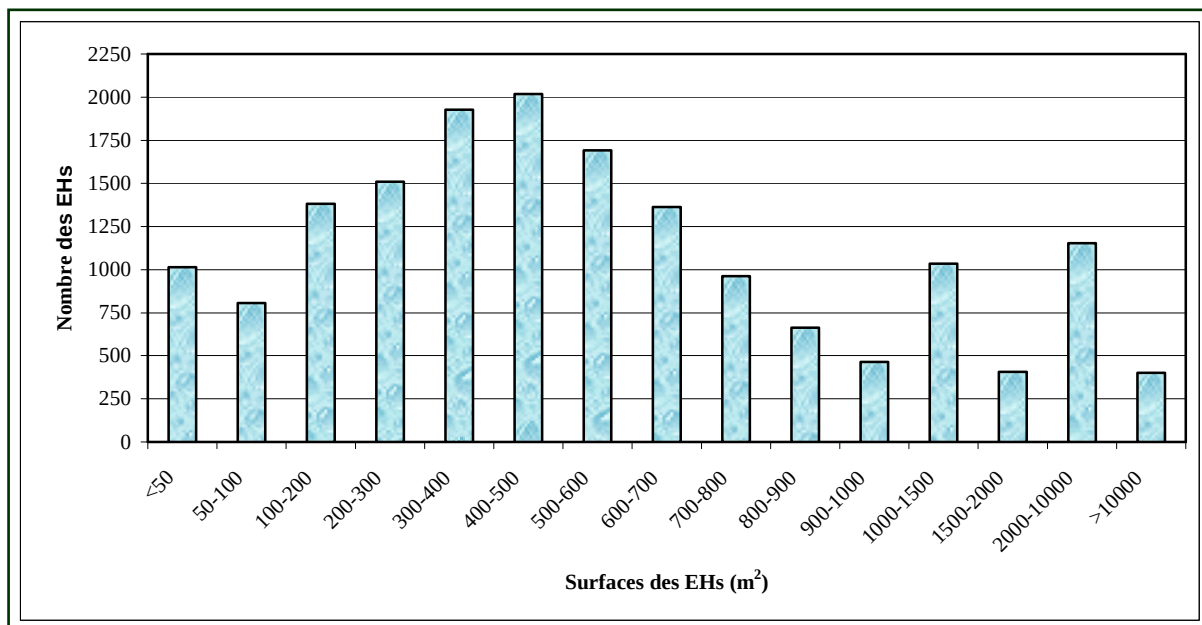


Figure 3.11 : distribution des surfaces des éléments hydrologiques

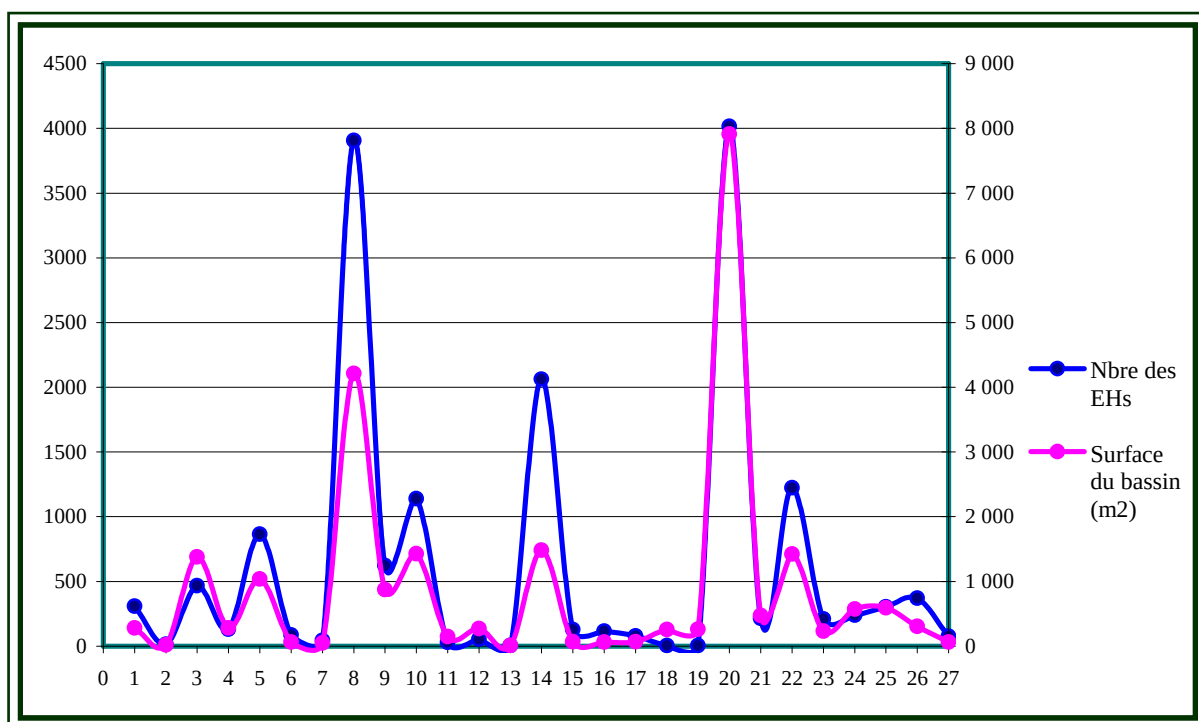


Figure 3.12 : Comparaison entre la surface et le nombre des éléments hydrologique d'un bassin versant

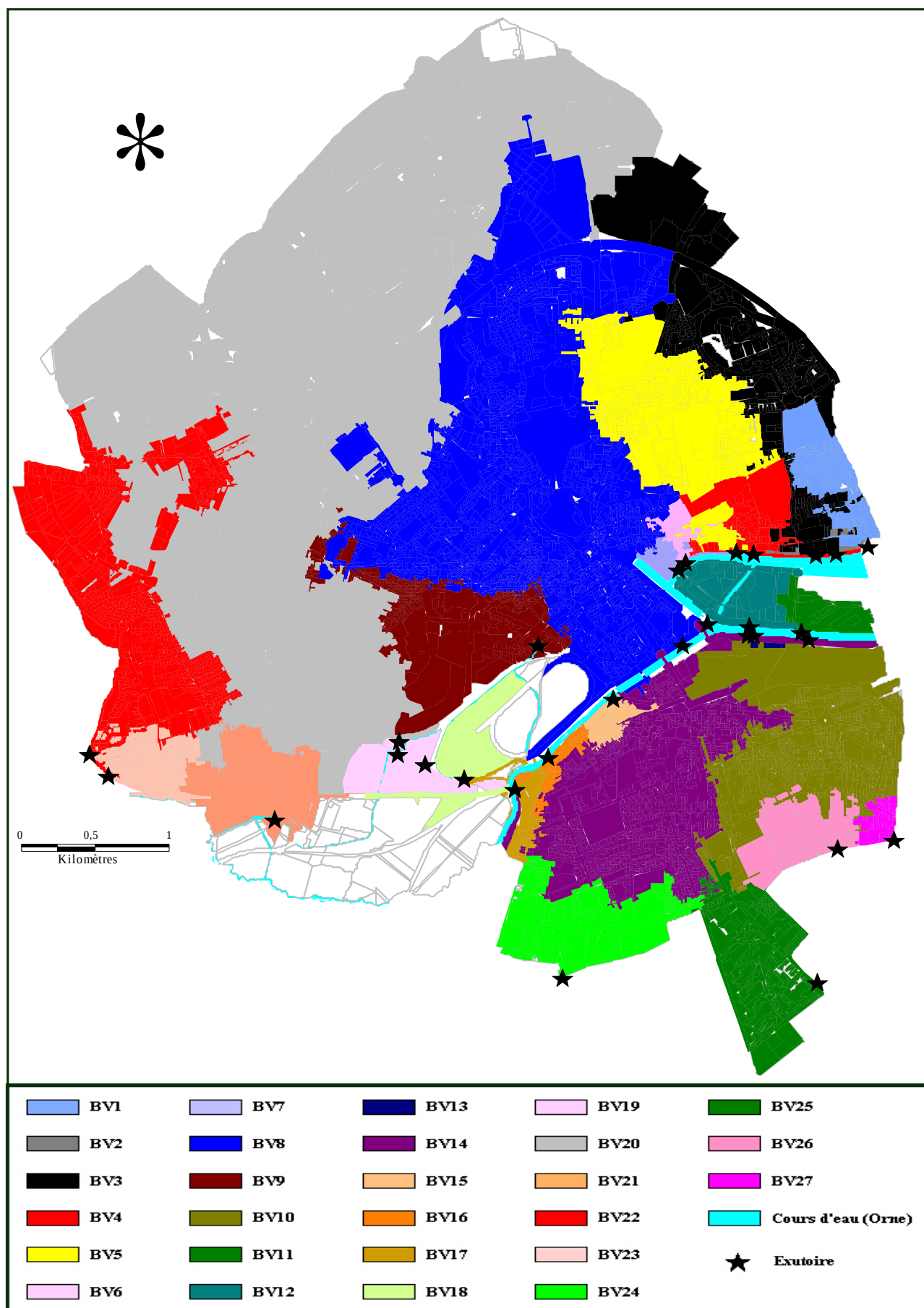


Figure 3.13 : Bassins versants de la ville de Caen

III.5 Coefficient d'imperméabilisation

Le coefficient d'imperméabilisation qui représente le rapport de la surface imperméabilisée sur la surface totale d'un bassin versant, constitue le principal facteur d'influence dans la modélisation de la transformation d'une pluie en débit en milieu urbain. L'analyse hydrologique utilisée permet de donner une estimation du coefficient d'imperméabilisation d'un élément hydrologique de façon cadastrale à partir de la surface bâtie et la surface de voirie :

$$C_{imp} = S_{imp}/S \quad \text{avec} \quad S_{imp} = S_{bâti} (1+F) + S_{voie} + 2 \times D_{vb}$$

Où : S est la surface totale de l'élément hydrologique;

S_{imp} : la surface imperméabilisée de l'élément hydrologique;

S_{voie} : la surface de voirie adjacente à la parcelle de l'élément hydrologique;

$S_{bâti}$: la somme de surface des bâtiments situés sur cette parcelle;

$2 \times D_{vb}$: le chemin reliant l'habitation à la voirie. Il est supposé bitumé et sa largeur est estimée à 2m.

F : est un facteur représentant l'imperméabilisation diffuse constituée d'éléments non référencés dans le cadastre, (parking et terrasse privés, abri de jardin).

La principale difficulté de cette approche de l'estimation du coefficient d'imperméabilisation est la détermination du facteur d'imperméabilisation diffuse "F". Une connaissance fine du mode d'occupation du sol permet d'avoir une bonne estimation de ce facteur. Ainsi, l'interprétation des photographies aériennes ou d'images satellite de haute résolution en terme d'occupation du sol permet d'avoir une estimation de l'imperméabilisation diffuse. Mais, la couleur et la luminosité d'un pixel ne permet pas souvent de déterminer si la surface est imperméable ou non. Ce facteur a été estimé dans le cadre de cette étude à 20% ; il a été supposé que l'imperméabilisation diffuse représente 20% de la surface totale de bâtiments de la parcelle. La *Figure 3.14* présente la distribution spatiale du coefficient d'imperméabilisation. Une forte imperméabilisation est observée au niveau du centre ville. L'imperméabilisation diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre. La zone d'étude peut être classée en terme d'imperméabilisation des éléments hydrologiques (EHs) en trois zones principales : une zone fortement urbanisée (30 % des EHs) dont le coefficient d'imperméabilisation est supérieur à 0.6, une zone périurbaine (60% des EHs) ayant un

coefficient compris entre 0.2 et 0.6 et une zone quasi-naturelle (10% des EHs) où l'imperméabilisation est inférieure à 20%.

Une comparaison entre les deux plus grands bassins, le bassin 20 et le bassin 8, est illustrée dans la *Figure 3.15*. Le bassin 20 est situé dans une zone périurbaine à l'ouest de la ville, tandis que le bassin 8 est un bassin très urbanisé situé au centre ville. Une imperméabilisation plus forte est constatée au niveau du bassin 8. La distribution des surfaces imperméabilisées est plus homogène au niveau du bassin 20 ; le bassin 8 présente une concentration des zones imperméabilisées dans la partie sud du bassin. Les coefficients d'imperméabilisation moyen des éléments hydrologiques du bassin 20 et 8 sont respectivement 0.44 et 0.65. La présence des grandes parcelles faiblement urbanisées au niveau de deux bassins a diminué les coefficients globaux d'imperméabilisation de deux bassins pour les ramener à 0.40 pour le bassin 20 et à 0.51 pour le bassin 8. Le coefficient d'imperméabilisation global (Tableau 3.2) est calculé à partir de la surface totale du bassin, tandis que le coefficient d'imperméabilisation moyen correspond à la moyenne des coefficients d'imperméabilisation des éléments hydrologiques constituant le bassin.

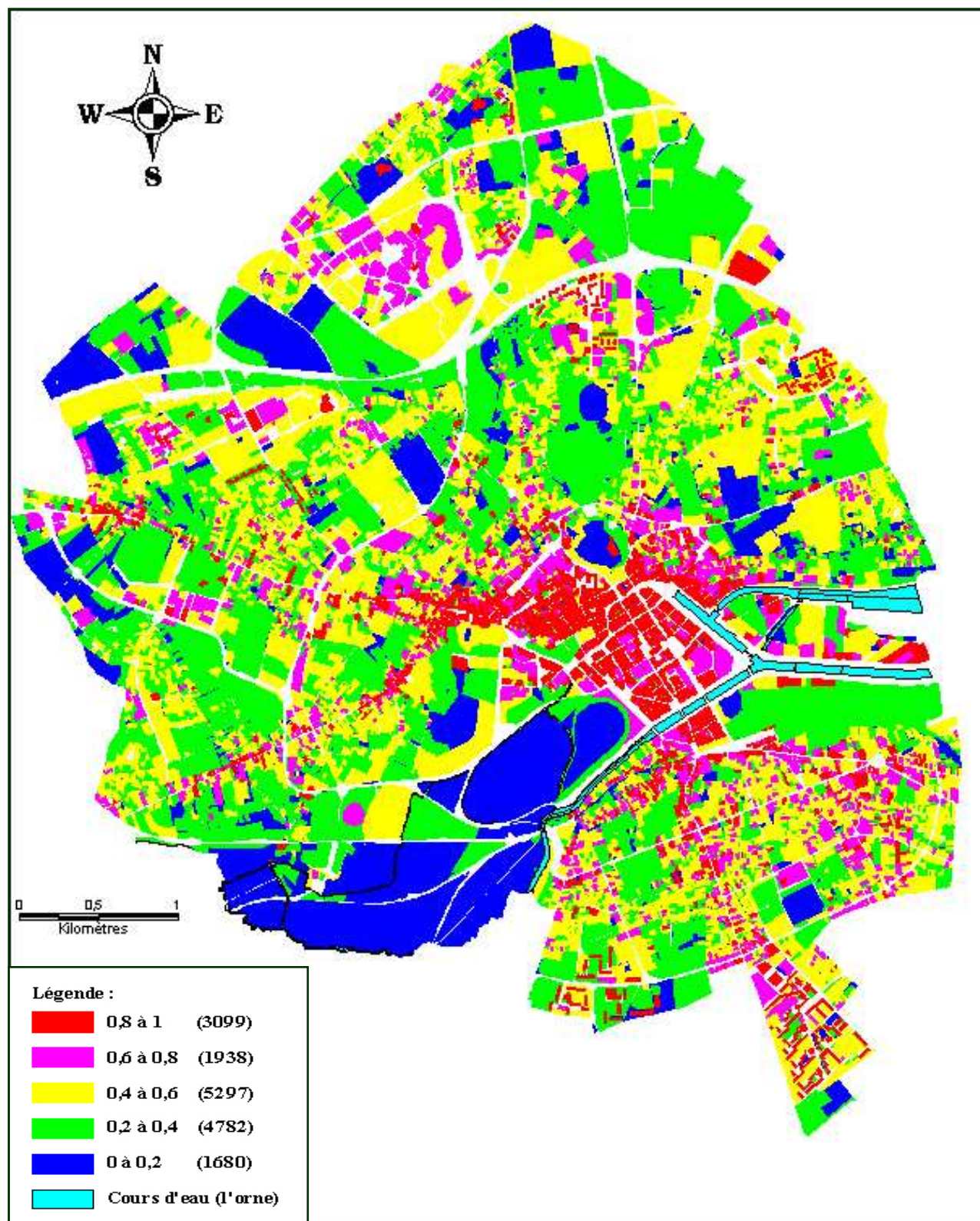


Figure 3.14 : Distribution du coefficient d'imperméabilisation

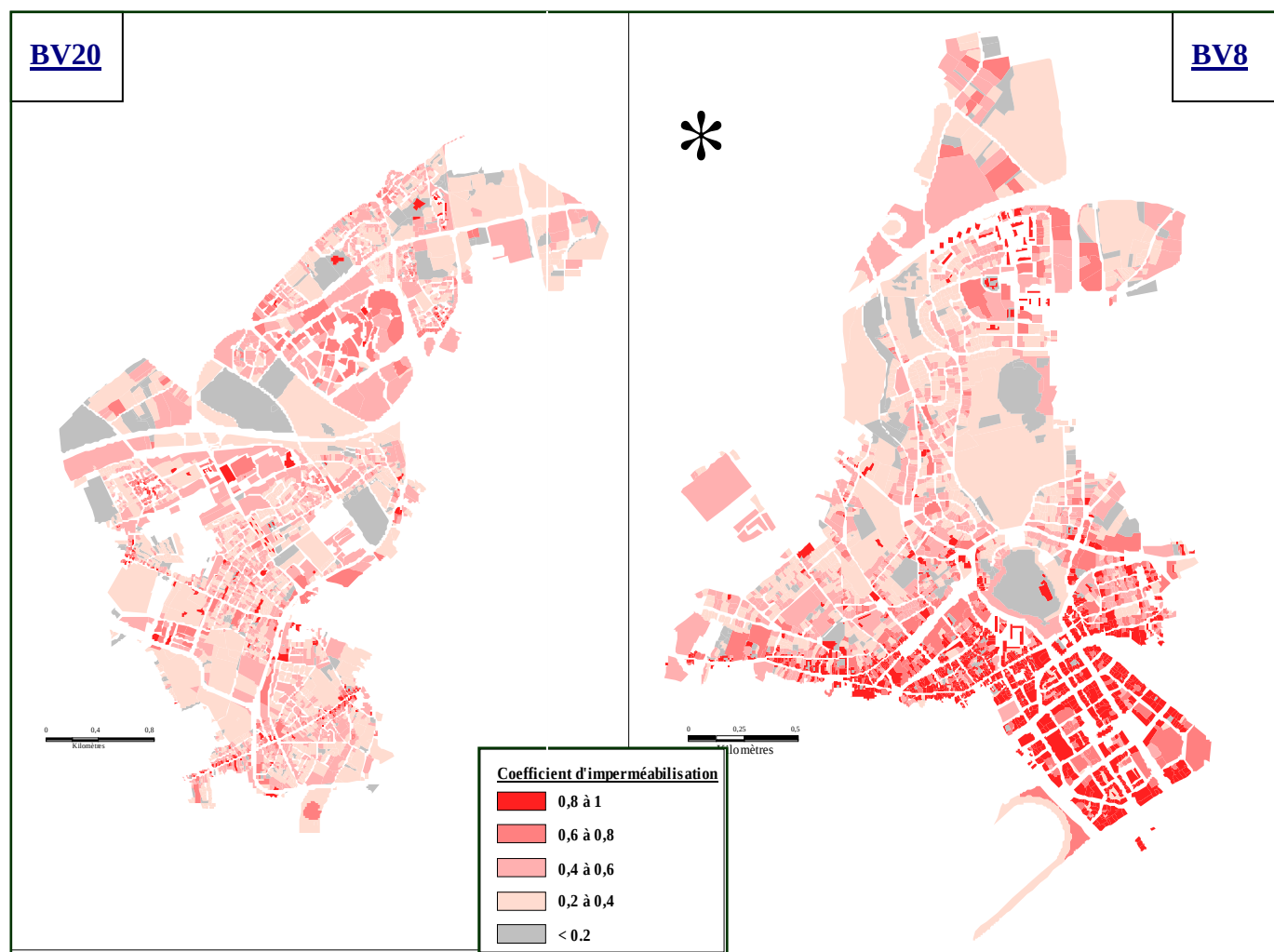


Figure 3.15 : Comparaison de l'imperméabilisation de deux bassins

CONCLUSION

Ce travail se situe dans le contexte de la modélisation hydrologique des bassins versants de l'agglomération de Caen la Mer. L'objectif de cette étude est de délimiter les bassins versants de l'agglomération, qui est une étape préalable à toute modélisation hydrologique. Pour ceci, une analyse hydrologique développée par la division Eau et Environnement du LCPC de Nantes (Rodriguez et al.) a été utilisée. Cette analyse utilise les banques de données urbaines disponibles en ville pour l'élaboration d'une description détaillée du milieu urbain du point de vue hydrologique. Adoptant une approche par objet, l'analyse hydrologique utilise les outils SIG pour le stockage, la gestion et l'analyse spatiale d'objets géographiques constituant le milieu urbain, permettant ainsi l'intégration de la variabilité spatiale des données et l'amélioration de la connaissance des processus hydrologiques.

Cette analyse hydrologique a été appliquée, dans le cadre de ce travail, en utilisant les banques de données urbaines de la ville de Caen. Les données géographiques disponibles se sont avérées être de qualité médiocre, ce qui a nécessité un travail considérable de prétraitement de ces données : modification d'objets géographiques, création d'une couche de données inexistante, vérification et correction des données attributaires. Le manque des informations géographiques nécessaires pour la mise en œuvre de cette analyse (en particulier la topographie du réseau d'assainissement) nous a incité à restreindre la zone d'étude à la ville de Caen au lieu de toute l'agglomération. A la fin du prétraitement, un cheminement complet de l'eau ruisselée à travers la ville a été déterminé. Ce cheminement tient compte de la formation des eaux de ruissellement sur la surface urbaine, de sa canalisation sur les routes et enfin de son parcours souterrain à travers le réseau d'assainissement des eaux pluviales. L'application de cette analyse a permis d'obtenir deux résultats concrets, à savoir : la délimitation automatique des bassins versants et l'estimation du coefficient d'imperméabilisation.

a) *Délimitation automatique des bassins versants*: l'application de la méthode de délimitation a permis de délimiter 27 bassins associés aux points de rejet du réseau d'assainissement des eaux pluviales vers le milieu naturel. Des caractéristiques pertinentes ont été déterminées pour chaque bassin. L'originalité de cette méthode provient du fait qu'elle peut délimiter automatiquement un bassin versant urbain et ceci uniquement à partir des banques de données urbaines sans avoir recours à d'autres sources de données.

b) Coefficient d'imperméabilisation : le coefficient d'imperméabilisation a été estimé de façon cadastrale à partir de la surface bâtie, la surface de voirie adjacente à la parcelle et d'une imperméabilisation diffuse tenant compte des surfaces imperméabilisées non représentées dans les plans du cadastre.

Ces résultats obtenus pourraient être directement utilisés pour implémenter les modélisations hydrologiques faites par le bureau G2C Environnement dans le cadre de son étude du diagnostic du réseau d'assainissement des eaux pluviales de l'agglomération de Caen.

Cependant, l'application de la méthode a décelé certaines limites liées, d'une part aux hypothèses faites dans l'analyse hydrologique, et d'autre part à la qualité de données.

1) Problème liés aux hypothèses faites dans l'analyse :

En premier lieu, l'hétérogénéité des éléments unitaires constituant le milieu urbain selon cette analyse a été remarquée. L'analyse discrétise la surface urbaine en prenant comme élément unitaire implicite la parcelle cadastrale ; chaque parcelle est connectée à un seul filaire de voie qui draine les eaux accumulées sur cette parcelle. Or, la taille de la parcelle peut varier de quelques mètres carrés à plusieurs hectares tandis que l'analyse hydrologique traite les éléments unitaires de la même manière. En réalité, une grande parcelle peut être drainée par plusieurs filaires de voie, ce qui n'est pas pris en compte par l'analyse. Des problèmes liés aux dépressions locales du terrain ont été aussi soulevés. Un filaire de voie non interfacé par le réseau d'assainissement et dont l'extrémité aval aboutit à une dépression du terrain conduit à identifier des parcelles non raccordées au réseau hydrographique. L'analyse ne permet pas de traiter d'une façon automatique les problèmes de dépression. Un autre problème a été identifié concernant le raccordement des parcelles situées à proximité d'un réseau hydrographique naturel. Ces parcelles sont vraisemblablement drainées vers ce réseau alors que l'analyse hydrologique ne permet pas d'intégrer les cours d'eau dans le graphe hydrologique urbain. En ce qui concerne le calcul du coefficient d'imperméabilisation, l'analyse hydrologique a révélé quelques limites pour une bonne estimation de l'imperméabilisation diffuse non comptabilisée dans les données cadastrales. Cette imperméabilisation diffuse n'a pas été réellement prise en compte dans cette analyse ; elle est simplement contrôlée par la valeur d'un coefficient "F" difficilement quantifiable en l'absence d'une donnée détaillée du mode d'occupation du sol.

2) Problème liés à la qualité de données :

L'utilisation de cette analyse requiert des banques de données urbaines bien renseignées (topographie du réseau, relief du terrain, et plans cadastraux mis à jours). Or, ces banques de données étaient principalement destinées à des utilisations cartographiques dans le domaine de l'urbanisme, du transport, du marketing et de la gestion des risques. Par conséquent, la qualité de données géographiques disponibles est souvent mise en cause pour une utilisation hydrologique. Parmi les informations qui nous ont fait défaut dans cette analyse hydrologique, les données relatives à la topographie du réseau d'assainissement (les cotes des radiers), les données incomplètes de la voirie et du réseau d'assainissement et l'absence quasi-complète des données relatives aux tronçons surfaciques de voie.

Perspectives :

L'analyse hydrologique utilisée dans cette étude offre des opportunités intéressantes pour une analyse détaillée du fonctionnement hydrologique de la ville. Cependant, des améliorations devront être apportées pour affiner les résultats obtenus à travers l'application de cette analyse. Le problème de la discrétisation de l'espace en éléments hydrologiques peut être revu. Les parcelles de grande taille pourraient être discrétisées en plusieurs parcelles de petite taille avant la caractérisation des éléments hydrologiques, et ceci pour une meilleure homogénéité des éléments unitaires de la discrétisation. Un programme peut être élaboré pour le traitement d'une dépression locale du terrain étant donné que les filaires de voie aboutissant à une dépression peuvent être connus. Le réseau hydrographique naturel peut être schématisé sous forme de filaires d'assainissement pour être intégré dans le graphe hydrologique urbain. Le traitement des photographies aériennes et d'images satellites, dont la résolution ne cesse de s'améliorer, pourrait apporter des informations intéressantes sur le mode d'occupation du sol et par conséquent sur l'estimation de l'imperméabilisation diffuse, et ceci pour une meilleure estimation du coefficient d'imperméabilisation.

Références bibliographiques

Barczak A. , 2008, Le graphe hydrologique urbain : structuration de données pour déterminer le cheminement de l'eau dans la ville, in : Foltête J.-C. (dir.), Actes des Huitièmes Rencontres de Théo Quant, Besançon, 12p.

Béguin M. , Pumain D. , 1994. La représentation des données géographiques. Statistique et Cartographie, Armand Colin, 192p.

Beven K.J., Moore I. D., 1991. Terrain analysis and distributed modelling in hydrology. J. WILEY & SONS Publication, 249p.

Che X., 2005, Extraction et reconstruction du réseau hydrographique à partir du modèle numérique de terrain. Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, 129p.

Djokic D. , Maidment D. R. , 1991. Terrain analysis for urban stormwater modelling. Hydrological processes, Vol. 5, p115-124.

Greene R. G. , Cruise J. F. , 1995. Urban watershed modeling using geographic GIS. Journal of water resources planning and management, Vol. 121, N°4, p318-325.

HINGRAY B., 1999. Comportement et modélisation hydraulique des zones bâties en situation d'inondation : *le cas des zones cloisonnées d'habitat individuel de Ouagadougou*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II - ORSTOM, 244p.

LAURENT F., 1996. Outils de modélisation spatiale pour la gestion intégrée des ressources en eau, *Application aux Schémas d'Aménagement et de Gestion des Eaux*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne – École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 357p.

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 des Ponts et Chaussées, 200p.

Rodriguez F. Andrieu H., Creutin J-D., 2003. Surface runoff in urban catchments : *morphological identification of unit hydrographs from urban databanks*. *Journal of Hydrology*, Vol. 283,p146-168.

Zech Y. , Escarmelle A. , 1999. Use of high-resolution geographical databases for rainfall-rauff relation in urbanised areas. *Water Science and Technology*, Vol. 39, N°9, p 87-94.

Zech Y. , Sillen X., Debources C., Hauwaert A. V., 1994. Rainfall Runoff modeling of partly urbanized watersheds. *Comparison between a distributed model using GIS and other models. Sensitivity analysis*. *Water Science and Technology*, Vol. 29, N°1-2, p 163-170.

Liens Internet :

- <http://hydam.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html>

- <http://www.g2c.fr/>

- <http://www.ign.fr/>

ANNEXE

Nous présentons dans cet annexe une cartographie globale des modifications significatives apportées aux réseaux de voirie et d'assainissement. Ces modifications ont été indispensables pour la mise en œuvre de la méthode de délimitation. Des tronçons ont été créés dans les deux couches de données géographiques afin de pouvoir combler les trous remarqués dans les données initiales. Nous présentons également une liste complète d'identifiants des filaires de voie qui aboutissent à une dépression locale du terrain. Le filaire de voie objet de cette dépression pourrait ainsi être identifié facilement sur le terrain à partir des données géographiques résultantes de cette étude afin de pouvoir mener à bien les investigations nécessaires.



Figure 1 : Tronçons rajoutés dans le réseau d'assainissement

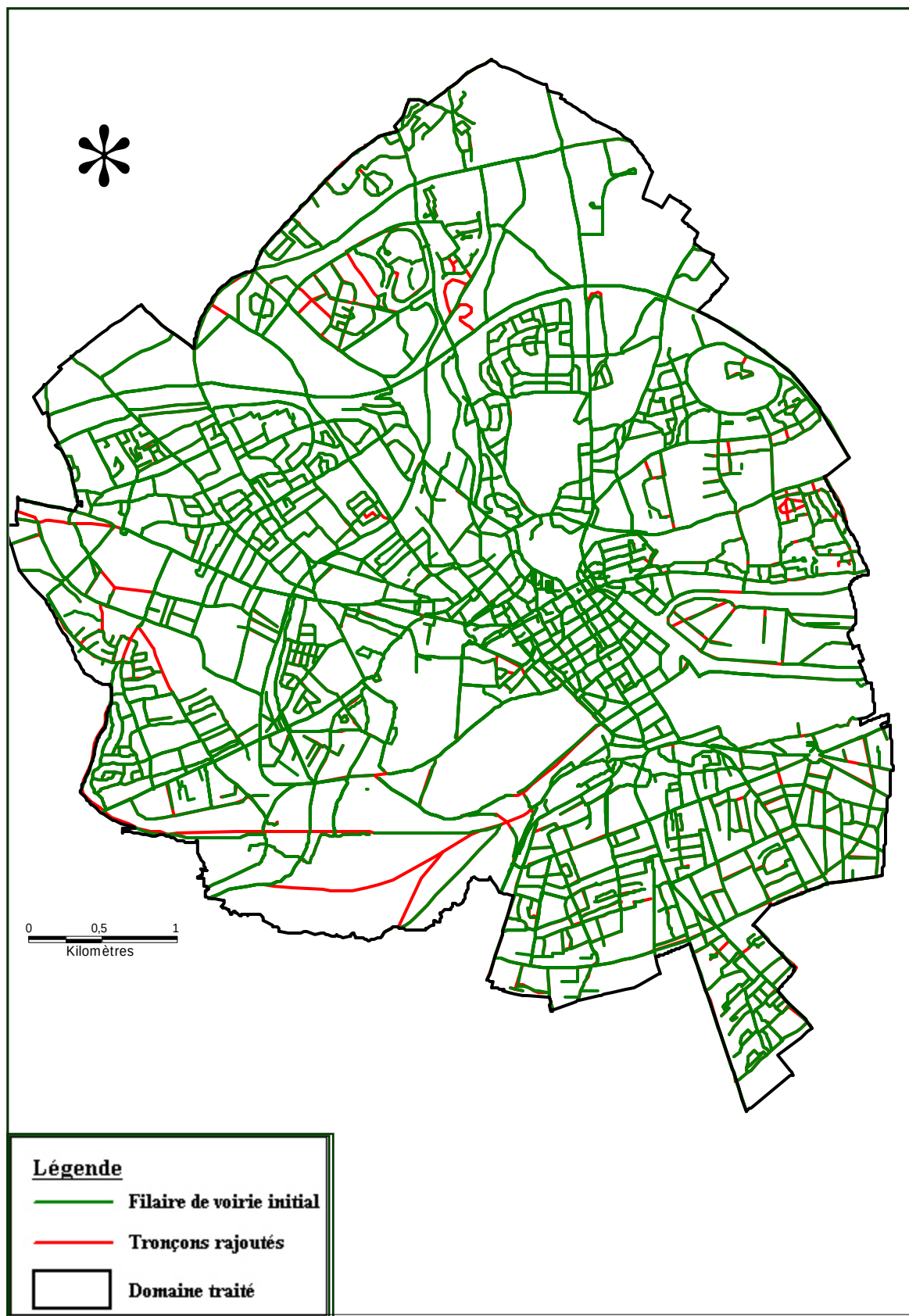


Figure 2 : Tronçons rajoutés dans le réseau de filaire de voie

FLV114	FLV2310	FLV371	FLV1515
FLV171	FLV2340	FLV446	FLV1534
FLV197	FLV2342	FLV451	FLV1535
FLV427	FLV2344	FLV455	FLV1558
FLV448	FLV2346	FLV463	FLV1585
FLV569	FLV2347	FLV466	FLV1743
FLV896	FLV42	FLV472	FLV1766
FLV897	FLV107	FLV522	FLV1788
FLV1536	FLV111	FLV527	FLV1933
FLV1541	FLV160	FLV576	FLV2035
FLV1733	FLV198	FLV586	FLV2125
FLV1789	FLV211	FLV587	FLV2184
FLV1838	FLV280	FLV895	FLV2222
FLV1839	FLV290	FLV1053	FLV2300
FLV1905	FLV292	FLV1336	FLV2337
FLV1906	FLV304	FLV1404	FLV2338
FLV1934	FLV337	FLV1405	FLV2341
FLV2034	FLV343	FLV1417	FLV2343
FLV2124	FLV367	FLV1446	FLV2354
FLV2309	FLV370	FLV1465	FLV2371
FLV2373	FLV2436	FLV483	

Tableau 1 : La liste de filaires non connectés au réseau d’assainissement