



HAL
open science

Modélisation hydrologique distribuée des espaces périurbains basée sur l'analyse des données géographiques vectorielles. Application au bassin versant de la Chézine

Magdalena Palaccio

► **To cite this version:**

Magdalena Palaccio. Modélisation hydrologique distribuée des espaces périurbains basée sur l'analyse des données géographiques vectorielles. Application au bassin versant de la Chézine. Hydrologie. 2008. dumas-00551364

HAL Id: dumas-00551364

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00551364v1>

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

SPECIALITE ATMOSPHERE, EAU ET ENVIRONNEMENTS URBAINS

Année 2008/2009

Thèse de Master STEU

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

Présentée et soutenue par :

MAGDALENA PALACCIO

le 4 septembre 2008

à l'Ecole Centrale de Nantes

**Modélisation hydrologique distribuée des espaces périurbains
basée sur l'analyse des données géographiques vectorielles
Application au bassin versant de la Chézine**

Président : Jean-François SINI Fonction.....

Examineurs : Jean-Michel Rosant Fonction.....
Patrice Mestayer
Isabelle Calmet
Fabrice Rodriguez
Katia Chancibault
Hervé Andrieu Fonction.....

Directeur de mémoire : M. Fabrice RODRIGUEZ

Laboratoire/Institution : Laboratoire des Ponts et Chaussées- Bouguenais

Résumé

Ce travail est une première étape de l'adaptation d'un modèle hydrologique distribué urbain aux espaces périurbains. Il consiste à estimer la fonction de transfert du bassin versant de la Chézine (Loire-Atlantique, France) en utilisant des données géographiques vectorielles facilement accessibles.

Une grande partie de ce rapport traite la collecte et le traitement des données. Les données géographiques, souvent incomplètes, ont été corrigées par des traitements automatiques développés pour ce travail, pour disposer d'un réseau hydrographique complet et bien renseigné. Une partie des données utilisées a été digitalisée à partir d'observations réalisées sur le terrain dans le cadre du projet AVuPUR dans lequel s'inscrit ce stage de Master. Il s'agit des fossés dans une zone purement rurale en amont du bassin versant qui sera appelée « zone amont de Sautron ».

A partir de ces données, le réseau hydrographique a été reconstitué selon trois approches différentes. L'approche de validation est basée sur les fossés complétés par un cours d'eau issu des banques de données urbaines, l'approche objet « pur » est constituée du cours d'eau issu des banques de données urbaines et des routes, et l'approche mixte combine un cours d'eau très dense obtenu par un traitement MNT (modèle numérique du terrain) et les routes.

Les signatures morphologiques et la fonction de transfert des trois approches sont comparées à l'échelle de la zone amont de Sautron où on dispose de toutes les données nécessaires pour l'élaboration de ces trois approches. L'approche mixte et objet « pur » sont comparées selon les mêmes critères à l'échelle du bassin versant de la Chézine.

Ces résultats sont ensuite comparés avec un événement pluvieux d'état hydrique sec. Enfin, les approches mixte et objet « pur » sont comparées selon les mêmes critères à l'échelle du bassin versant de la Chézine.

Mots-clés : bassin versant périurbain, modèle distribué, discrétisation spatiale, approche objet, Banques de Données Urbaines, hydrologie

AVANT PROPOS

Ce stage a été effectué au sein du site nantais du LCPC, plus précisément, dans la Division Eau et Environnement.

Tout d'abord, j'accorde ma reconnaissance à M. Hervé Andrieu, responsable de la Division, je te remercie de m'avoir accueillie dans cette division et pour les réflexions qui ont pu réorienter et sûrement améliorer ce travail et aussi pour les indications qui m'ont finalement permis de trouver un doctorat.

Je tiens à remercier M. Fabrice Rodriguez qui a encadré ce stage. Merci pour avoir eu la patience de répondre à toutes mes questions. J'ai beaucoup apprécié ton approche de pédagogie à tous les niveaux. Je te remercie pour le temps que tu m'as sacrifié, notamment pour résoudre ces derniers problèmes dans les programmes qui m'ont fait perdre les nerfs, mais également pour l'espace que tu m'as laissé pour développer mes propres idées et raisonnements.

J'accorde un très grand remerciement à l'ensemble de l'équipe de la Division Eau et Environnement.

Je remercie particulièrement Bernard Flahaut pour avoir résolu mes problèmes informatiques mais aussi mon problème de voiture. Je ne sais pas comment je serais repartie à la maison ce jour-là, si tu n'avais pas été là !

Merci également à Carina Furusho qui m'a fourni des éléments enrichissants pour ce travail et surtout du soutien psychologique quand j'en avais vraiment besoin. Je souhaite dire merci à Marie-Laure Mosini de m'avoir souvent motivée à faire du sport. Je voudrais remercier aussi David Mabilais de m'avoir accueillie dans son bureau. Merci également à Laetitia, Laurent et Denis qui ont toujours eu des histoires à raconter qui m'ont fait éclater de rire, et à Daisy, Amelène et Chloé qui m'ont rappelé qu'il fallait s'arrêter de travailler pour aller manger, mais aussi à Edvina, Katerine,... et tous les autres personnels de cet équipe. J'ai sincèrement apprécié d'avoir pu partager 6 mois avec vous! Je considère d'avoir eu une énorme chance d'être tombée dans une équipe pareille !

Merci à mes parents sans lesquels je n'aurai jamais pu reprendre mes études, merci à Héloïse d'avoir été un bébé qui fait de longues siestes et des longues nuits, et d'avoir accepté de t'endormir toute seule. Merci à Nayéli pour tes dessins magnifiques que j'ai montrés avec fierté à la totalité de la division et qui ont décoré mon bureau pendant ces 6 mois et ta patience avec des parents si occupés. Merci à Yoann pour avoir été présent pour les enfants quand je n'ai pas pu l'être. Merci également à Caroline qui s'est proposée en dernière minute de garder mes enfants pour me permettre de présenter ce travail dans le cadre du projet AVuPUR à Lyon.

TABLE DES MATIERES

1) Introduction	p 5
2) Contexte scientifique et milieu étudié	p 7
2.1) Contexte scientifique	p 7
2.2) Les caractéristiques du milieu périurbain	p 10
2.3) Le bassin versant de la Chézine	p 11
3) Données géographiques disponibles	p 14
4) Traitement de données	p 20
5) Construction du réseau hydrographique	p 26
5.1) Introduction et méthodologie	p 26
5.2) Echelle de la zone amont de Sautron	p 27
5.3) Echelle du bassin versant	p 29
5.4) Transposition du modèle urbain au milieu périurbain	p 31
5.5) Contribution des fossés	p 35
6) Résultats des analyses morphologiques	p 36
6.1) Classification du réseau hydrographique selon le schéma de Horton-Strahler	p 36
6.2) Les signatures morphologiques du bassin versant	p 41
6.3) Fonctions de transfert du bassin versant	p 46
7) Conclusion et Perspectives	p 54
Références Bibliographiques	p 56
Annexes	p 57

1) Introduction

Ce sujet de stage s'inscrit dans le projet AVuPUR (= Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers) qui a pour objectif d'étudier l'impact de l'urbanisation sur l'hydrologie des espaces périurbains. Ce projet a un caractère multi-disciplinaire. Il regroupe des chercheurs de différents laboratoires et universités : des hydrologues (CEMAGREF,IRSTV, INSA), des hydro-informaticiens (société HYDROWIDE), des numériciens (Laboratoire J.Kuntzmann, Grenoble), des spécialistes de la télédétection et des SIG (UMR5600, ISARA) et Météo France. Il associe également les collectivités locales (Grand Lyon, SAGYRC, Nantes-Métropole), qui constituent le terrain d'expérimentation de ces travaux de recherche.

Le projet de recherche AVuPUR vise à modéliser les conséquences hydrologique, chimique, biologique et géomorphologique sur ces espaces, liées à la croissance des villes. Dans un premier temps, l'objectif du projet portera sur la modélisation hydrologique et ce stage s'intègre à ce sujet.

Les zones périurbaines sont des espaces situés en périphérie des villes qui ont la particularité d'être constitués de parties urbaines et de parties rurales, qui ont des fonctionnements hydrologiques différents. Directement reliés à la ville, les bassins versants périurbains sont soumis à des fortes contraintes environnementales. A cause de la croissance rapide des villes, la surface imperméabilisée de ces zones augmente rapidement ce qui provoque l'augmentation du débit à l'exutoire. Une modélisation de ces zones permettrait par exemple de prédire les conséquences hydrologiques de divers projets d'aménagement.

L'objectif de ce stage est de travailler sur une modélisation hydrologique distribuée, qui peut tirer parti de la disponibilité de banques de données géographiques. L'hétérogénéité du milieu périurbain constitue une difficulté particulière pour ce type de modélisation hydrologique. Les différences majeures qui influencent le comportement hydrologique ou la modélisation sont les suivantes :

- Le taux de surface imperméabilisée est plus important en milieu urbain.
- Les différences de l'organisation et de la densité du réseau hydrographique posent des contraintes pour la modélisation.
- Les critères de définition de l'objet élémentaire de modélisation sont différents dans les deux milieux.

Les différences de morphologie des bassins versants urbains et ruraux ont été étudiées par Gironas et Roesner (2007) à partir du bassin versant du « Pigeon » in North Carolina qui montrent que certains paramètres morphologiques du bassin versant sont fortement influencés par l'urbanisation.

Dans la littérature portant sur la modélisation hydrologique distribuée, on trouve à l'heure actuelle soit des approches rurales, soit des approches urbaines. Des modèles qui sont capables de traiter ces deux milieux à la fois sont très rares. Classiquement, on utilise en milieu rural une approche maillée comme ceci est le cas dans Topmodel (Wendling, 1992). Néanmoins Moussa (1992) a développé un modèle rural distribué (MHYDAS) qui se base sur une approche objet où l'élément unitaire ne correspond pas à la maille mais au champ agricole (parcelle agricole). Karvonen et al. (1999) a également utilisé une approche objet dans le milieu rural. Il s'agit d'un modèle qui est basé sur la théorie du GIUH (Rodriguez-Iturbe 1979 et Gupta 1980).

Le modèle hydrologique distribué qui fait objet de ce rapport est basé sur le modèle urbain URBS (Rodriguez 1999, Morena 2004). Il s'agit d'une approche objet, ce qui signifie d'une part que, le réseau hydrographique est constitué de données géographiques vectorielles, d'autre part que l'élément unitaire correspond à la parcelle cadastrale. Les données sont issues des banques de données urbaines pour pouvoir être adaptables à n'importe quel bassin versant urbain. Dans la transposition du modèle URBS au milieu périurbain, les particularités du milieu rural doivent également être représentées de façon réaliste tout en conservant l'approche proposée par le modèle.

Dans le chapitre 2 de ce rapport on présente le modèle URBS qui doit être adapté au milieu périurbain, les principales différences hydrologiques entre le milieu urbain et rural et également le site d'étude avec ses caractéristiques. Une description détaillée des différentes données disponibles et utilisées sera donnée par la suite dans le chapitre 3. Le chapitre 4 présente le traitement des données erronées. L'utilisation des données est ensuite montrée dans le chapitre 5 où le réseau hydrographique est reconstruit à partir de trois approches élaborées dans le cadre de ce stage. Les résultats des analyses morphologiques (chapitre 6) sont enfin présentés à travers la fonction largeur (width function), le profil en long et la fonction de transfert pour toutes les approches préalablement présentées.

2) Contexte scientifique et milieu étudié

2.1) Contexte scientifique

2.1.1) *Principes des modèles hydrologiques*

Un modèle hydrologique est classiquement composé de deux concepts : la fonction de production et la fonction de transfert. La fonction de production permet de caractériser la transformation de la pluie brute (lame d'eau précipitée) en pluie efficace (lame d'eau qui participe réellement au débit de crue). Selon le modèle, on prend en compte différents facteurs comme l'interception par les arbres, l'infiltration dans le sol, la surface imperméabilisée et le niveau de saturation de sol, etc. Le modèle calcule la quantité d'eau disponible pour le transfert jusqu'à l'exutoire. Dans un modèle distribué, la fonction de production estime cette pluie efficace pour chaque objet élémentaire de modélisation. La fonction de transfert a pour objet de transférer cette pluie efficace jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

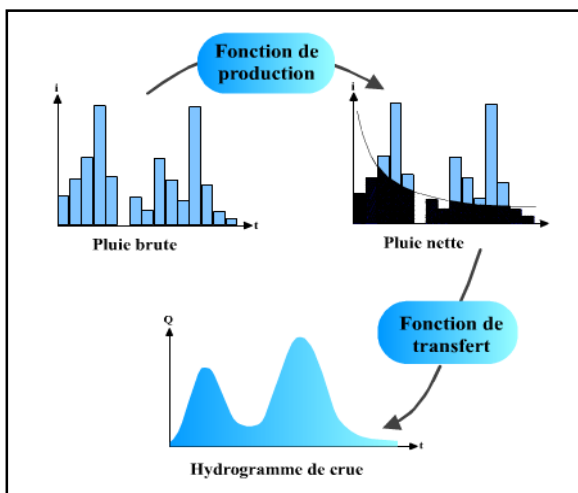


Fig.1 : Schématisation d'un modèle hydrologique

2.1.2) *L'hydrogramme unitaire*

Une représentation de la fonction de transfert est l'hydrogramme unitaire qui est la réaction du bassin versant à une pluie unitaire efficace. Cette pluie unitaire est définie par une intensité unitaire et une durée fixée.

Pour mettre en œuvre le concept de l'hydrogramme unitaire, on établit les hypothèses suivantes :

- La pluie unitaire est uniforme dans l'espace et dans le temps
- La réponse du bassin versant à cette pluie est l'hydrogramme unitaire
- La réponse est linéaire, donc a des propriétés d'affinité et d'additivité

Le débit à l'exutoire $Q(t)$ peut être calculé par :

$$Q(t) = S \int_0^t h(t-\tau)P_e(\tau)d\tau \quad (1)$$

où $h(t)$ correspond à la réponse du bassin versant qui est cherchée, P_e est la pluie efficace et S la surface du bassin.

L'hydrogramme unitaire peut-être obtenu par différentes méthodes :

- la méthode empirique consiste à déduire l'hydrogramme unitaire des mesures de pluie et du débit.
Une méthode empirique est la DPFT qui établit l'hydrogramme unitaire à partir de la connaissance des données de pluie et de débit d'un échantillon d'événements pluvieux, et d'une méthode de déconvolution basée sur les variations de débit.
- l'approche théorique est basée sur des concepts de mécanique de fluides comme les équations de Barré de Saint Venant.
- l'approche géomorphologique détermine le temps de parcours de l'eau de pluie jusqu'à l'exutoire soit de façon statistique comme dans le modèle du GIUH, en considérant la probabilité qu'une goutte tombe prenne un certain cheminement et atteigne l'exutoire au moment t (Rodriguez-Iturbe 1979 et Gupta 1980) et l'hydrogramme unitaire peut-être obtenu par une distribution statistique, soit en calculant les courbes isochrones, donc les courbes d'iso-temps de transfert jusqu'à l'exutoire comme dans l'HUM, URBS (Rodriguez 1999).

2.1.2.1) L'hydrogramme unitaire en milieu urbain (URBS)

Le milieu rural est bien connu par les hydrologues. Le milieu urbain a également été modélisé, mais le milieu périurbain reste peu étudié au niveau hydrologique. La difficulté se trouve dans l'hétérogénéité de ce milieu. La connaissance du réseau hydrographique est un préalable à la mise en œuvre d'un modèle hydrologique distribué. La construction de ce réseau hydrographique en milieu périurbain utilise des objets de différentes natures (routes, rivières, fossés, réseau d'assainissement).

L'objectif de ce stage consiste à adapter les principes de la fonction de transfert du modèle URBS (Rodriguez 1999, Morena 2004), qui a été développé spécialement pour le milieu urbain, aux bassins versants périurbains. Ce modèle utilise une discrétisation spatiale du milieu urbain à partir des données géographiques vectorielles. Un avantage de ce modèle est l'accessibilité des données pour n'importe quel bassin versant urbain, car ces données géographiques sont disponibles dans la plupart des villes.

Le réseau hydrographique est constitué de la voirie et du réseau d'assainissement. L'élément unitaire est représenté par les parcelles cadastrales (fig.2) qui sont le lieu de production du ruissellement.

F. Rodriguez et al. / Journal of Hydrology 283 (2003) 146–168

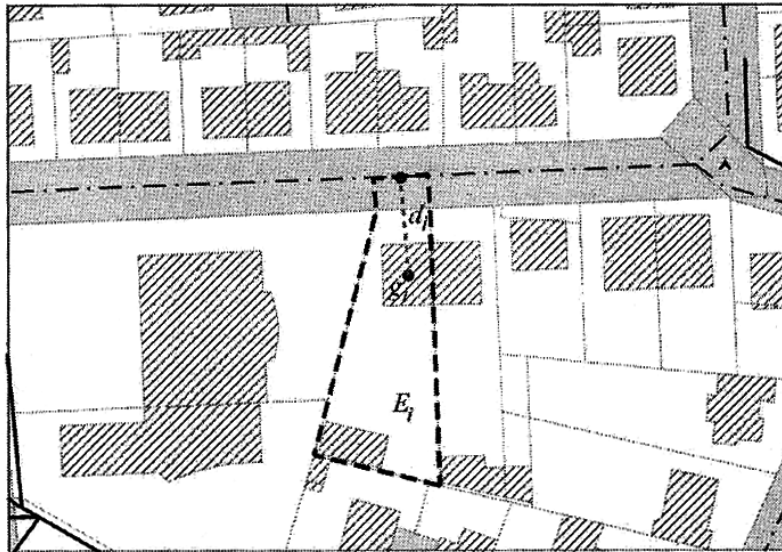


Figure 2 : Utilisation des parcelles cadastrales dans le modèle URBS

Ces données permettent de représenter la morphologie du bassin versant de façon réaliste et de représenter ainsi le chemin d'écoulement de l'eau pluviale depuis chaque élément unitaire jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

Comme visualisé dans la figure 2, la parcelle cadastrale est connectée par son centre de gravité au tronçon de voirie le plus proche. La voirie est connectée au réseau d'assainissement si un tronçon d'assainissement se trouve à moins de 8m d'un tronçon de voirie. Le chemin qu'emprunte l'eau pluviale commence alors à l'élément unitaire, passe par la voirie et le réseau d'assainissement pour terminer à l'exutoire.

La fonction de transfert du modèle URBS détermine l'hydrogramme unitaire de la façon suivante :

On détermine le temps de transfert de l'eau le long de chaque cheminement, de chaque élément unitaire jusqu'à l'exutoire.

$$t = l/v \quad (2)$$

A partir de cette relation, le temps de parcours le long d'un tronçon est calculé en estimant une vitesse de ruissellement distribuée sur le réseau hydrographique, à partir de la formule de Manning Strickler ci-dessous

Formule de Manning-Strickler :

$$v = K (R_h)^{2/3} p^{1/2} \quad (3)$$

K est la rugosité du tronçon, elle dépend de la nature du matériau et sa valeur peut être trouvée dans la littérature. P est la pente et R_h exprime le rayon hydraulique qui est défini

comme le rapport entre la section mouillée et le périmètre mouillée. Dans les cas des sections circulaires, ce qui est valable pour le réseau d'assainissement, il dépend du taux de remplissage de la canalisation. R_h est obtenu par la formule suivante :

$$R_h = \frac{R}{2} \left(1 + \frac{\sin \theta \cos \theta}{\pi - \theta} \right) \quad (4)$$

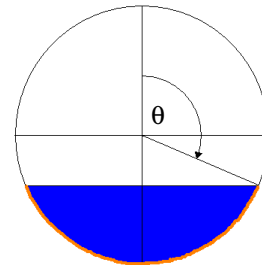


Fig.3 : En bleu : section mouillée, en rouge : périmètre mouillée

Le taux de remplissage est obtenu en prenant compte la période de retour comme utilisé par Rodriguez et Andrieu (2003).

Ce calcul conduit à la détermination des courbes isochrones du bassin versant, c'est à dire les courbes d'iso-temps de transfert jusqu'à l'exutoire. Ces courbes représentent une information spatialisée sur le bassin versant.

Pour mettre en œuvre l'approche géomorphologique en milieu périurbain, on doit connaître le temps de parcours de chaque élément unitaire jusqu'à l'exutoire. On l'obtient, en établissant les hypothèses suivantes :

- Le temps de parcours ne dépend pas de la quantité d'eau parce qu'on étudie uniquement le parcours d'une goutte d'eau.
- La distribution des temps de parcours est calculée en fonction de la surface des éléments unitaires.
- Un pas de temps est défini.
- Une particule d'eau est injectée à chaque élément unitaire au début du calcul ($t=0$).

Pour représenter une pluie d'une certaine durée t , on trace $Q(t)$ obtenu par la formule 1.

2.2) Les caractéristiques du milieu périurbain

Pour déterminer l'approche adaptée au milieu périurbain il faut d'abord faire connaissance avec les particularités du terrain. Quelles sont les similarités et les différences de ce milieu par rapport au milieu rural d'une part, et au milieu urbain d'autre part ?

Un bassin versant rural se distingue d'un bassin versant urbain par plusieurs points :

- Le taux de surface imperméabilisée varie .
En ville, la surface imperméabilisée est plus abondante ce qui crée un écoulement en surface qui donne une réponse hydrologique plus rapide

- La taille de l'élément unitaire peut-être différente.
Dans le modèle urbain URBS, l'élément unitaire correspond à une parcelle cadastrale, car le réseau hydrographique constitué des routes et du réseau d'assainissement est suffisamment dense. En milieu rural, le réseau est moins dense et la connexion des parcelles cadastrales à ce réseau est plus difficile à définir ; l'élément unitaire pourrait correspondre à la surface contributive d'un tronçon d'ordre 1.

Néanmoins, dans le cadre de ce travail qui porte sur l'analyse de la morphologie du réseau hydrographique, l'élément unitaire restera la parcelle cadastrale pour la transposition du modèle URBS au milieu périurbain.
- Dans les cas étudiés dans la littérature, la distribution de pente n'est pas forcément la même en ville et en milieu rural.
Moussa (1991) a observé en milieu rural que l'écoulement commence dans les tronçons d'ordre 1 avec une pente forte qui s'affaiblit en aval alors qu'en milieu urbain, dans les bassins nantais étudiés (Rodriguez et Andrieu 2003), les pentes sont faibles au début des cheminements hydrologiques et deviennent plus marquées à la fin. Au passage entre le réseau surfacique et le réseau souterrain on remarque également une forte pente sur une petite distance.
- L'organisation du réseau hydrographique se fait de façon différente.
En milieu urbain, l'eau pluviale qui arrive sur les surfaces imperméabilisées, longe les routes et se jette ensuite dans le réseau d'assainissement. Pour constituer le réseau hydrographique, URBS utilise les objets géographiques qui représentent les tronçons de routes et d'assainissement.
Par définition, l'assainissement collectif n'existe pas en milieu rural. L'eau pluviale longe les fossés et les routes pour être transportée dans les cours d'eau naturels jusqu'à l'exutoire. L'écoulement se forme également sur de petits thalwegs qui sont activés que lors de conditions hydrologiques très humides. Les objets géographiques qui sont utilisés pour l'approche objet en milieu rural sont des tronçons de fossés, de routes et de cours d'eau.

2.3) Le bassin versant de la Chézine

Le bassin versant de la Chézine est situé dans la partie centrale du département de la Loire-Atlantique, au Nord-Ouest de Nantes (Fig.4.). Cet affluent de la Loire prend sa source sur la commune de Saint Etienne de Montluc puis traverse Sautron, Couëron, Saint-Herblain et Nantes. La Chézine s'étend sur près de 15 km auxquels s'ajoute environ 1 km en écoulement souterrain, au niveau du centre ville de Nantes.

La surface de ce bassin s'élève à 34 km². La Chézine ne comporte sur l'ensemble de son parcours qu'un unique bras auquel se rattachent 10 affluents majeurs drainant des bassins versants de taille très variable.

Deux grands types d'occupation du sol dominant le bassin versant de la Chézine : l'agriculture et l'urbanisation. Les parcelles agricoles occupent la première moitié amont du bassin, jusqu'à l'Est de la commune de Sautron. A l'aval de Sautron, l'urbanisation prend de plus en plus de place et les parcelles montrent des signes d'enfrichement, même si la plupart d'entre elles sont encore entretenues. Le côté agricole a presque disparu au-delà du périphérique. L'urbanisation est prédominante à Nantes. Le développement urbain a tendance à se faire aussi le long des axes de communication (N165 et D201) avec différentes zones d'activités. Dans ce secteur périurbain, les boisements et les zones vertes prennent de l'importance (deux parcs urbains) (Priou 2005).

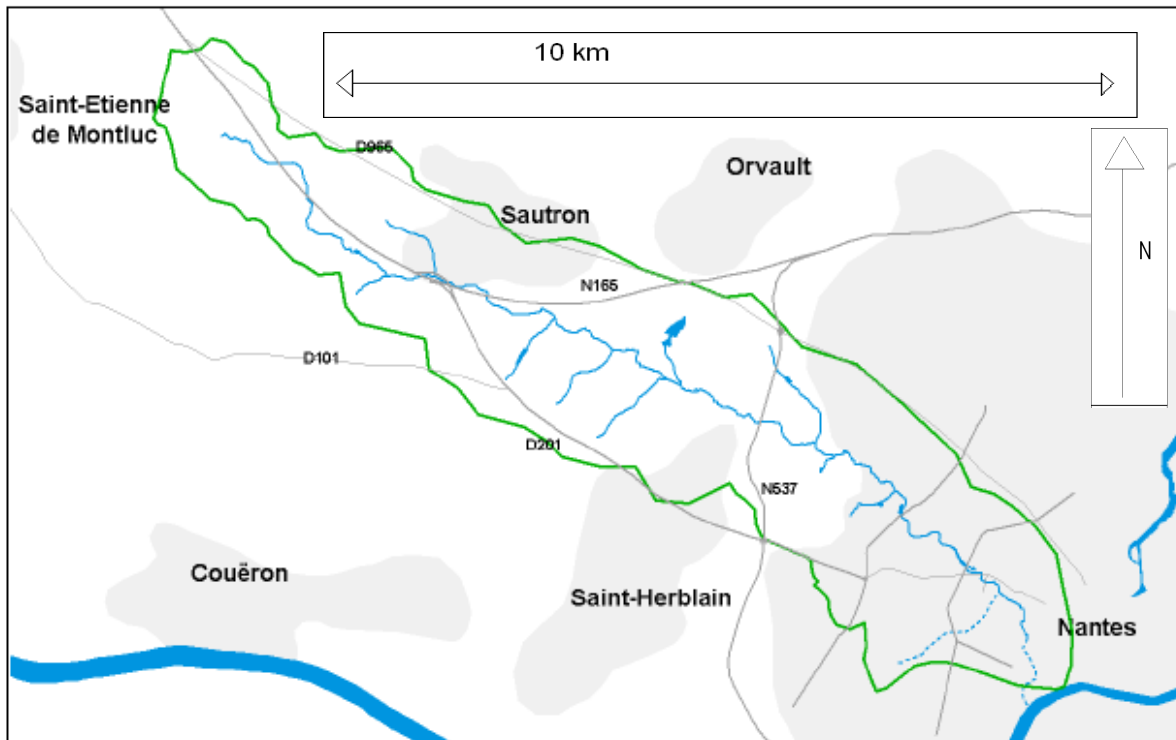


Figure 4 : Le parcours et les affluents de la Chézine

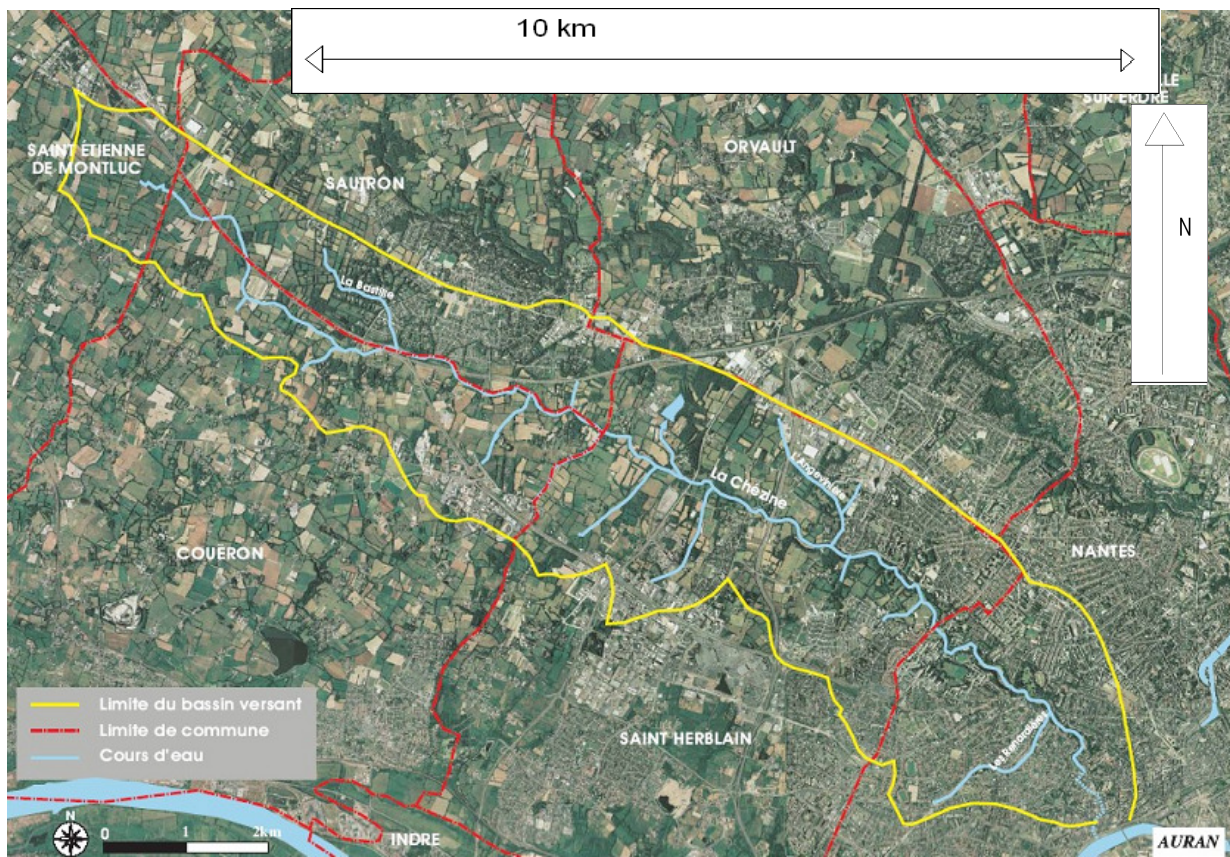


Figure 5 : localisation de la Chézine

3) Données géographiques disponibles

3.1) Types des données

Pour la modélisation du bassin versant de la Chézine, nous disposons des données suivantes :

	type	origine	localisation
Cours d'eau	vectorel - polyligne	BD Topo - IGN	zone d'étude entière
Cours d'eau	raster	MNT ¹ - Nantes Métropole	zone d'étude entière
Cours d'eau surfacique	vectorel - polygone	Nantes Métropole	zone d'étude entière
Assainissement	vectorel - polyligne	Nantes Métropole	milieu urbain
Voirie	vectorel - polyligne	Nantes Métropole et BD Topo - IGN	zone d'étude entière
Voirie surfacique	vectorel - polygone	Nantes Métropole	zone d'étude entière
Bâtiments	vectorel - polygone	Nantes Métropole	zone d'étude entière
Parcelles	vectorel - polygone	Nantes Métropole	zone d'étude entière
Fossés	vectorel - polyligne	Digitalisation LCPC	zone amont de Sautron

(1) Modèle Numérique de Terrain

Tableau 1 : Types des données

Pour la construction du réseau hydrographique, il est indispensable de connaître les coordonnées x,y et z des extrémités de chaque tronçon de voirie, d'assainissement, de cours d'eau et de fossé. Les tronçons doivent être connectés par leurs extrémités. Au point de la connexion, les coordonnées de l'extrémité connectée des deux tronçons doivent être égales.

Par la suite de ce rapport, l'altitude z d'une extrémité sera appelée « cote ».

Les données pour ce projet venaient de sources différentes. Pour pouvoir les homogénéiser, certains traitements ont du être réalisés.

3.2) Inventaire des problèmes des données

3.2.1) Fossés

Dans le cadre du projet AVuPUR, une campagne de digitalisation des données de chemins d'eau a été réalisée par la division « Eau » du LCPC.

Les données visées par cette enquête de terrain, concernent les parties rurales où il n'existe pas de réseau d'assainissement collectif. Ces données ont été récoltées sur le terrain par une équipe du LCPC, ce printemps. Avec les outils disponibles, les fossés ont été localisés sur la zone du bassin versant, leurs dimensions ont été mesurées et le sens de l'écoulement a été noté s'il était visible. Après les journées sur le terrain, les informations obtenues ont été digitalisées sous forme de fichier MapInfo.

Disponible :

- Les objets géographiques des tronçons des fossés sont disponibles sous forme de fichier MapInfo.
- Les dimensions des fossés sont disponibles.
- Des informations sur la localisation et sur le sens de l'écoulement sont indiquées dans la table des attributs.

Problèmes :

- Les cotes du fond du fossé ne sont pas connues pour ces tronçons.
- Pour certains fossés le sens de l'écoulement n'est pas connu parce qu'il n'était pas visible sur le terrain.
- Un grand nombre de fossés se déverse dans des champs et ne contribue qu'indirectement au ruissellement (Fig.7 « fossés stockants »)
- Une autre partie des fossés n'était pas clairement liée au réseau hydrographique (Fig.7 « fossés éventuellement contributifs »)
- Le relevé des fossés s'est fait au fur et à mesure. Les conditions météorologiques n'étaient pas les mêmes lors des différentes journées de campagne et l'écoulement n'était pas toujours visible.
- Le travail de digitalisation est long et ne pourrait probablement pas être fait pour la totalité du bassin versant. Actuellement, 5 km² ont été parcourus en deux journées de terrain par 6 équipes. Il est prévu de digitaliser les chemins sur 2 km² supplémentaire, mais la surface totale du bassin versant mesure 34 km² (Fig.6).

La figure suivante montre les fossés actuellement digitalisés situés dans la zone qui est prévu de parcourir entièrement (zone verte) en comparaison avec la taille du bassin versant. Les limites du bassin versant utilisé dans cette figure sont obtenues par le traitement par MNT.

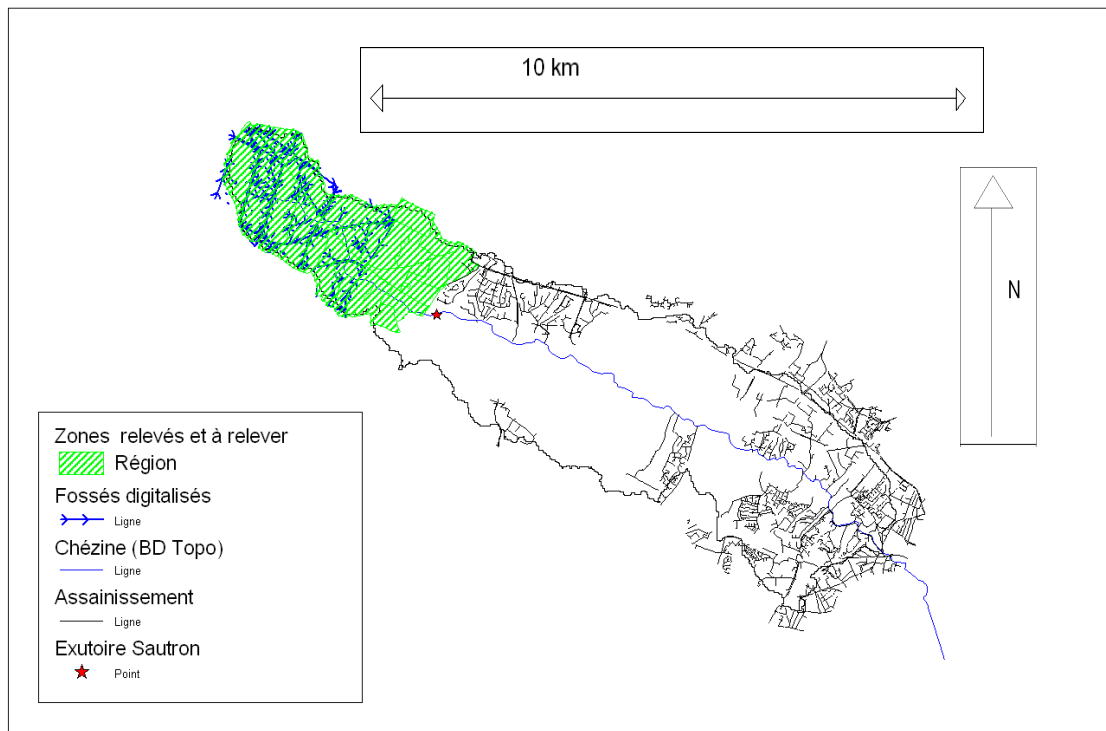


Fig.6 : Zone de digitalisation des chemins d'eau en comparaison avec la taille du bassin versant

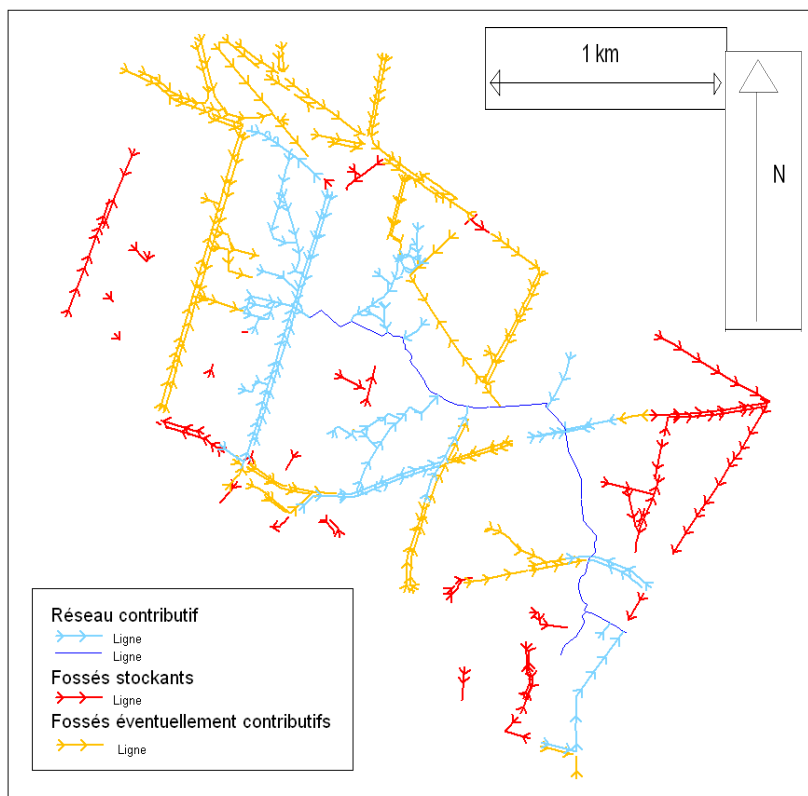


Fig.7 : Classification des fossés en contributif, stockant ou éventuellement contributif

3.2.2) Voirie

Source de données : BD Topo - IGN

Disponible :

- Les tronçons géographiques sont disponibles sous forme de fichier MapInfo et les tronçons de routes et de chemins sont connectés correctement.
- La cote des extrémités est connue pour chaque tronçon.
- Les tronçons sont également disponibles sous forme de polygone.

Problèmes :

- Les cotes des extrémités sont indiquées dans les attributs des données géographiques, mais l'association entre les coordonnées (x,y) et les cotes n'est pas réalisée.

Source de données : Nantes Métropole

Disponible :

- Parmi les données voirie pour la partie de Nantes Métropole, uniquement la couche du filaire de voie est utilisée. Les cotes des extrémités des tronçons qui ne sont pas indiquées dans les données, ont été interpolés par le MNT.

3.2.3) Assainissement

Les données de l'assainissement viennent uniquement de Nantes Métropole parce qu'il n'existe pas d'assainissement collectif sur la partie du bassin versant qui fait partie de la commune de St. Etienne de Montluc (figure 5).

Disponible :

- Les tronçons géographiques sont disponibles sous forme de fichier MapInfo.
- Pour certains tronçons, les cotes du radier sont indiquées pour une ou deux extrémités.
- Pour la plupart des tronçons, le diamètre est indiqué dans les attributs.

Problèmes :

- Environ 60% des cotes du radier manquent dans ces données.
- Environ 30% des valeurs de diamètre ne sont pas indiquées
- Les objets géographiques ne sont pas reliés correctement. Parfois, on trouve un espace entre les extrémités de deux tronçons qui doivent être connectés, parfois l'extrémité d'un tronçon aboutit au milieu d'un autre tronçon.
- Plusieurs groupes de tronçons ne sont pas liés au réseau.

3.2.4) Cours d'eau

Deux types de données ont été utilisés pour décrire la Chézine : le cours d'eau « objet » issu de la BD Topo et le cours d'eau issu du MNT.

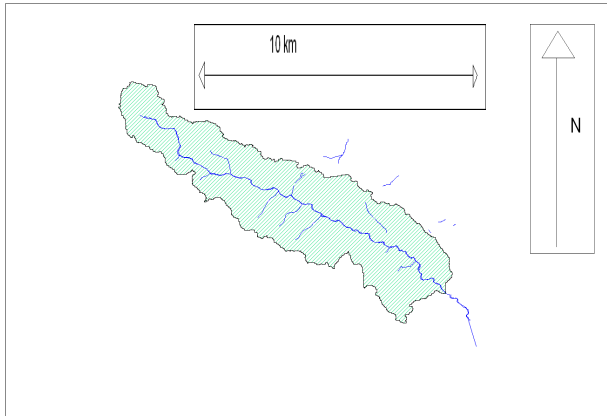


Fig.8 : Cours d'eau (BD Topo)

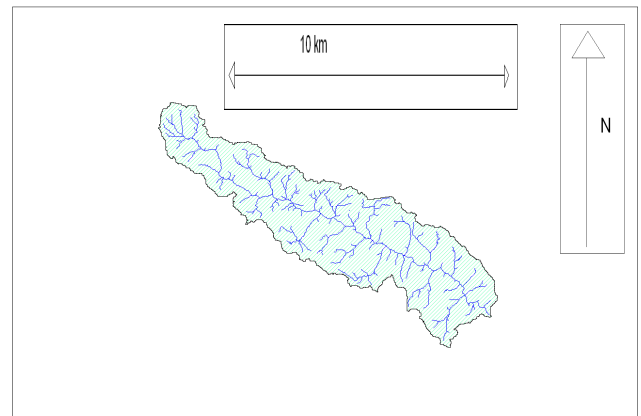


Fig.9 : Cours d'eau (MNT)

Chézine BD Topo

Disponible :

- Parmi les données de la Chézine issues de la BD Topo, uniquement la couche du filaire de voie est utilisée. Les cotes des extrémités des tronçons qui ne sont pas indiquées dans les données, ont été interpolées par le MNT

Problèmes :

- Aux endroits où la Chézine passe sous les routes, le cours d'eau est interrompu.
- Les cotes des extrémités sont indiquées mais inutilisables parce qu'ils ne sont pas cohérents d'un tronçon à l'autre.
- Ni la largeur, ni la profondeur des profils ne sont connues.

Chézine MNT

A partir du MNT, le réseau hydrographique peut être extrait à l'aide d'une méthode d'analyse topographique. Cette méthode est basée sur l'analyse des écoulements depuis chaque pixel en examinant ses huit voisins circonscrits. Une direction privilégiée est définie selon le principe de la « pente maximale ». Physiquement, cela signifie que le drainage s'effectue dans la direction de la pente la plus forte (écoulement monodirectionnel). Pour chaque pixel, on calcule la surface d'aire drainée. On définit un seuil d'aire drainée au-delà duquel le pixel appartient au réseau hydrographique (maille « rivière »). En dessous de ce seuil, le pixel est considéré comme une maille « versant ».

L'avantage du MNT est qu'on peut modifier la densité du cours d'eau en variant ce seuil de surface drainée en amont. Pour obtenir un cours d'eau plus dense que celui issu de la BD Topo, un seuil de 5 ha a été choisi. La résolution du MNT est de 20m.

Ces données raster ont été converties en polygones pour pouvoir être utilisées dans l'approche objet, ce qui permet de disposer de segments de 20m ou de 28m.

Disponible :

- La couche géographique des tronçons dont une cote moyenne est connue pour chaque tronçon est utilisée.

Problèmes :

- Les cotes des extrémités ne sont pas connues pour les extrémités de ces tronçons.
- Ni la largeur, ni la profondeur des profils sont connues.

Autres données relatives au cours d'eau de la Chézine

A certains endroits, les profils de la Chézine ont été mesurés par l'entreprise FIT CONSEIL dans le cadre de l'étude préalable à la restauration de la Chézine, dirigé par les bureaux d'études DHI et Biotope.

A partir de ces profils, une largeur approximative a pu être attribuée à chaque tronçon du cours d'eau issu de la BD Topo et du cours d'eau issu du MNT.

3.2.5) Parcelles

Disponible :

- Les données des parcelles de Nantes Métropole et celles situées dans la commune de St. Etienne, collectées auprès de la Direction Générale des Impôts, ont été utilisables sans traitement particulier.

3.2.6) Bâtiments

Disponible :

- Les bâtiments sont disponibles sous forme de polygones et pouvaient être également utilisés sans traitement préalable.

3.2.7) Relations entre voirie et cours d'eau

En dehors de la partie urbanisée, nous considérons que l'eau qui s'écoule le long des routes et chemins se déverse dans les cours d'eau (cf. chapitre 2). Pour ceci, il est nécessaire que les tronçons de voirie et cours d'eau soient connectés par leurs extrémités.

Problèmes :

- Les tronçons des cours d'eau et des routes ne s'arrêtent pas aux intersections.

3.2.7) Relations entre cours d'eau et assainissement

Dans le bassin versant de la Chézine, le réseau d'assainissement se déverse dans le cours d'eau à plusieurs endroits et l'eau est transportée par le cours d'eau jusqu'à l'exutoire.

Pour la modélisation, les tronçons d'assainissement doivent être connectés aux tronçons de cours d'eau à ces endroits.

Problèmes :

- Les cotes des cours d'eau obtenues par interpolation avec le MNT sont supérieures à celles de l'assainissement aux points de connexion, parce que la résolution du MNT (20m) n'est pas suffisamment haute pour décrire le lit des cours d'eau.

4) Traitement des données

L'identification et la correction des erreurs ont pris un temps très important étant donné le volume des données (par ex. : à peu près 10 000 tronçons d'assainissement pour tout le bassin de la Chézine).

Pour cette raison, les problèmes rencontrés ont été classés et une procédure de traitement des données erronées a été définie, le plus souvent automatique :

- Association des cotes aux coordonnées des extrémités

- Données manquantes
 - Objet géographique
 - Valeur (cotes, diamètres)

- Problèmes de connexion
 - Problème de précision
 - Problème des intersections
 - Problème de différence entre les valeurs des cotes de l'assainissement et le cours d'eau

4.1) Association des cotes aux coordonnées des extrémités

Ce problème concerne les cotes de la voirie de St. Etienne de Montluc et les cotes du radier de l'assainissement. Ce sont les données dont les cotes sont connues, mais pour lesquelles le lien entre les coordonnées (x,y) et (z) n'est pas connu.

Un traitement automatique a été réalisé à l'aide d'un programme Mapbasic. Ce traitement vérifie cette localisation x, y des cotes en prenant en compte le sens de l'écoulement et en comparant les coordonnées avec celles des tronçons voisins. Aux endroits des intersections complexes, les valeurs des cotes ont du être vérifiées manuellement (Annexe1).

4.2) Données manquantes

4.2.1) L'objet géographique manquant

Avec l'aide de la carte IGN, du MNT et en s'appuyant sur le sens d'écoulement des données existantes, un certain nombre (2% des tronçons donnés) de tronçons d'assainissement a du être ajouté manuellement à la table de données. D'autres tronçons ont été légèrement modifiés (déplacement de nœuds pour établir les connexions). Ces modifications ont été faites en s'appuyant sur

- le sens d'écoulement (les valeurs des cotes du radier)
- le diamètre (qui augmente au fur et à mesure qu'on s'approche à l'exutoire)
- le MNT
- les observations sur le terrain

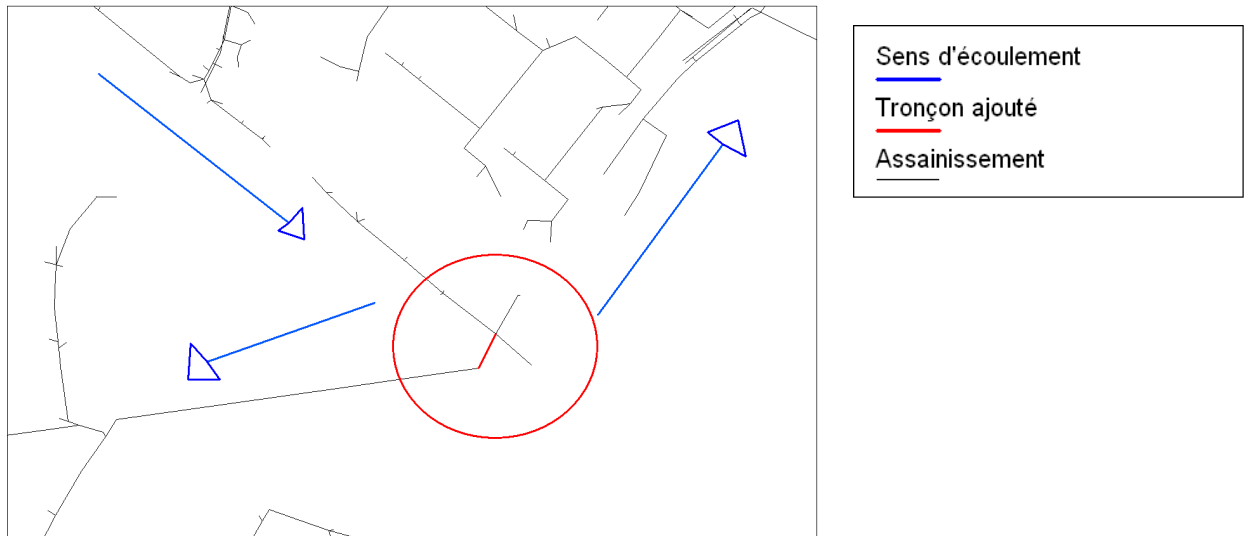


Fig.10 : Objet géographique manquant

4.2.2) Valeur manquante

Les cotes du réseau d'assainissement

Les cotes existaient dans les données, mais uniquement pour un tiers des tronçons. Les cotes manquantes ne pouvant pas être interpolées par le MNT parce que les extrémités des tronçons, une autre méthode a été développée :

Une couche qui représente une « topographie du réseau d'assainissement » a du être créée (fig.11). A partir de celle-ci, les extrémités des tronçons pour lesquels les cotes sont incomplètes ou inexistantes ont pu être interpolées.

Cette couche a été définie à partir :

- des cotes du radier du réseau d'assainissement qui sont connues
- des cotes du MNT aux endroits où le réseau hydrographique est constitué par les tronçons de la Chézine
- des cotes du radier des regards du réseau d'assainissement
- quelques valeurs z ajoutées manuellement en fonction de la topographie (à environ 2m en dessous du niveau du terrain) pour des extrémités des tronçons qui se situent à des endroits où l'interpolation ne peut pas trouver une valeur convenable.

A partir de cette couche des cotes ont été estimées pour les extrémités de tous les tronçons, et une vérification a été effectuée pour que le sens de l'écoulement soit représenté de façon cohérente.

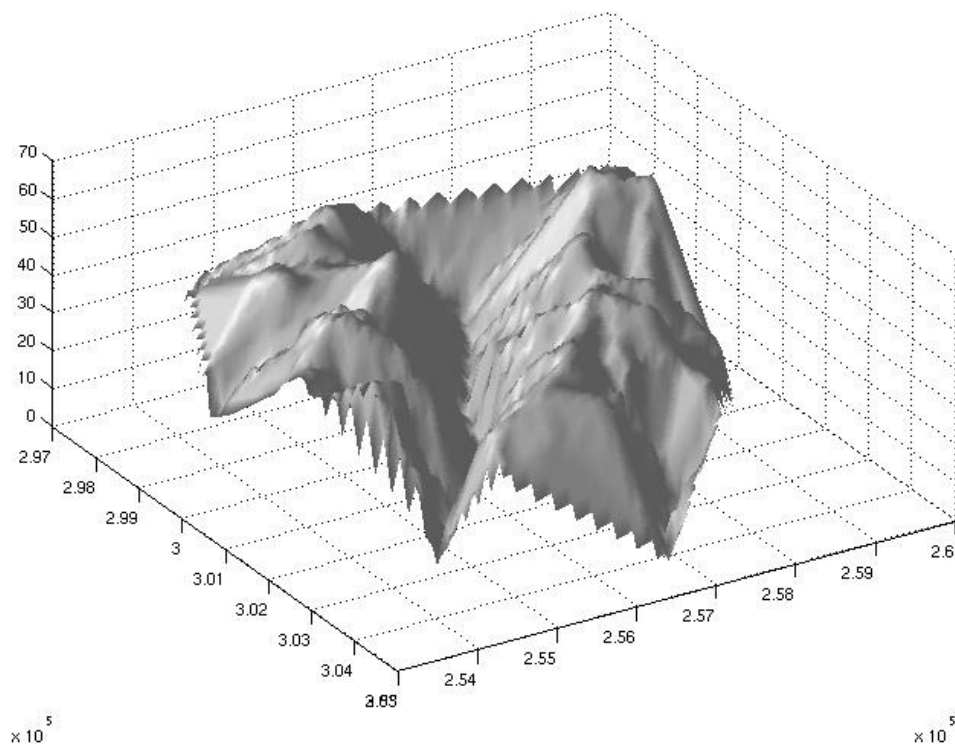


Fig.11 : Couche d'interpolation : « Topographie de l'assainissement »

Les diamètres

Les données de diamètre manquantes pour un tiers des données ont été estimées manuellement à partir des deux tiers de données existantes.

4.3) Problème de connexion

4.3.1 Précision de connexion

Un certain nombre de tronçons n'étaient pas connectés de façon précise. Les coordonnées x,y des points qui auraient du être connectés n'étaient pas les mêmes, des différences de parfois quelques millimètres ne se voyaient pas facilement sur la carte, mais posaient des problèmes pour des applications qui considèrent que ces coordonnées sont égales. Un traitement automatique a été réalisé pour détecter ces tronçons et ensuite les corriger.

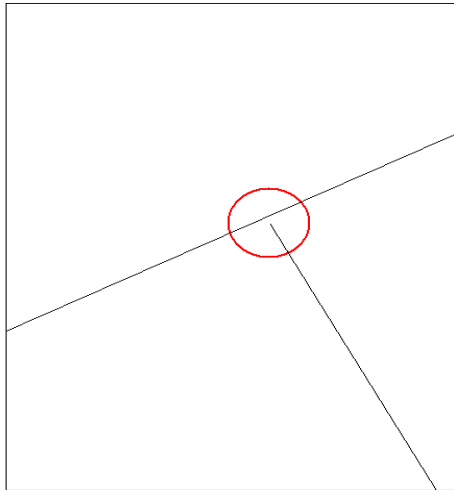


Fig.12 : Dépassement : échelle : 1cm = 1mm

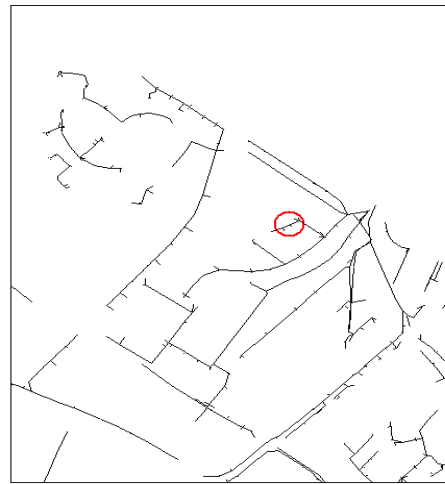


Fig.13 : 1cm = 78 cm



Fig.14 : 1cm = 624 m

Par ce traitement, un très grand pourcentage de tronçon était identifié comme mal connecté. La plupart d'entre eux étaient des tronçons de moins de 7m et qui n'ont pas de connexion en amont. Il a été supposé qu'il s'agit des connexions des bâtiments au réseau d'assainissement; tous les tronçons de moins de 7m sans connexion en amont ont été supprimés, parce que la méthode utilisée par la suite (URBS) connecte automatiquement les parcelles au réseau d'assainissement.

Ce choix a supprimé presque la totalité des tronçon qui n'étaient pas précisément connectés et il a aidé à réduire considérablement le volume des données.

4.3.2) Problème des intersections

Pour la modélisation du réseau hydrographique, les tronçons des chemins d'eau doivent être connectés à leurs extrémités. Pour les tronçons qui se croisent, la connexion entre les extrémités n'est pas correcte.

Un traitement automatique (Annexe2) a été réalisé pour identifier les intersections erronées, et pour découper correctement les tronçons concernés. L'identification se fait par une sélection des objets géographiques qui sont intersectés mais dont les coordonnées des extrémités sont différentes. Ensuite, un nœud est ajouté à l'endroit de l'intersection, aux deux tronçons. Les deux tronçons sont découpés par ce nœud et les objets découpés sont renommés.

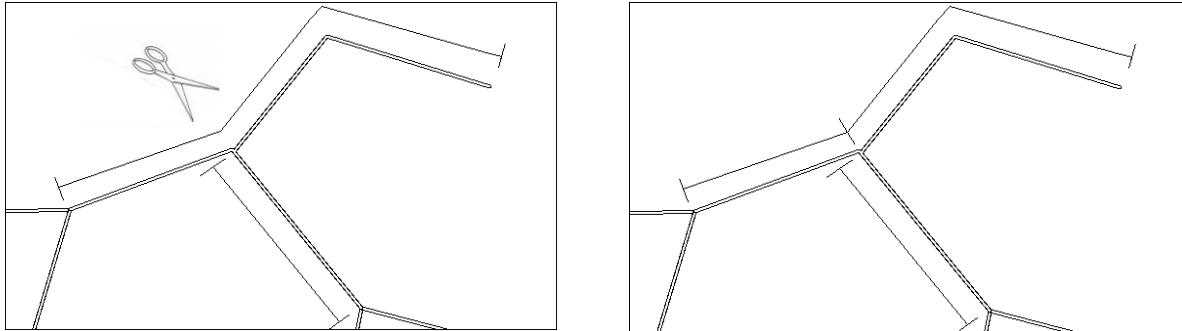


Figure 15 : Découpage d'un tronçon pour assurer la connexion des tronçons par leurs extrémités.

4.3.3) Problème de différence entre les valeurs des cotes de l'assainissement et le cours d'eau

Pour résoudre le problème de différence de hauteur entre ces deux couches, on suppose que l'erreur principale vient de l'interpolation par MNT. Le MNT n'est probablement pas suffisamment précis (un point tous les 20m) pour décrire correctement la profondeur du lit de la Chézine, et par la suite, toutes les valeurs Z de la couche des cours d'eau ont été diminuées de 2 m.

5) Construction du réseau hydrographique

5.1) Introduction et méthodologie

Pour rappel, l'objectif de ce stage consiste à transposer l'approche objet utilisée en milieu urbain au milieu périurbain. En ce qui concerne le milieu urbain, le réseau hydrographique est défini par les routes et l'assainissement. En ce qui concerne le milieu rural du bassin versant de la Chézine, les données disponibles qui décrivent réellement les chemins de l'eau sont les cours d'eau et les fossés.

Comme l'information relative aux fossés n'est en général pas disponible, des réflexions ont été menées vis à vis de la prise en compte des routes pour construire le réseau hydrographique, en milieu rural.

Fréquemment, la pente des champs est homogénéisée par l'activité agricole. Sachant que les routes sont souvent à un différent niveau (soit inférieur – fig.16, soit supérieur – fig.17) que les champs cultivés, l'eau s'écoule souvent le long des bords des routes. L'écoulement est encore plus marqué quand, à ces endroits, des fossés sont aménagés et entretenus. Par conséquent, le ruissellement produit par les surfaces naturelles, mais aussi celui de la voirie, sont interceptés à l'intersection des routes avec les champs. En considérant que l'écoulement de l'eau se fait principalement le long des routes, celles-ci peuvent également être interprétées comme chemins d'eau.

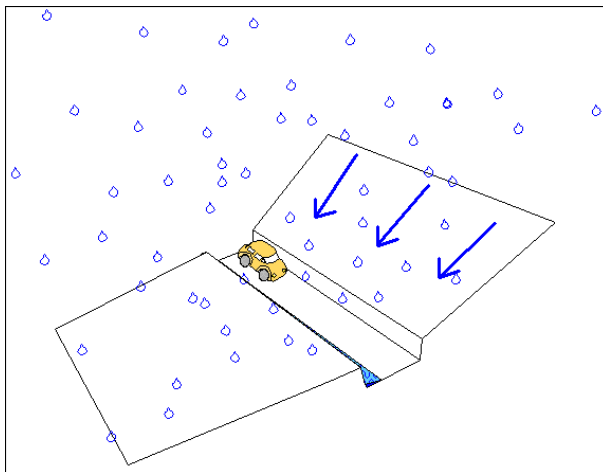


Fig. 16 : Niveau des routes inférieur à celui des champs

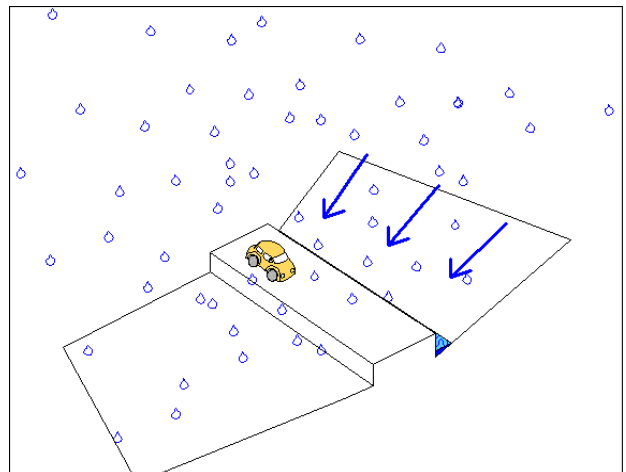


Fig. 17 : Niveau des routes supérieur à celui des champs

L'approche de modélisation hydrologique développée dans ce travail doit pouvoir être à terme, appliquée à n'importe quel bassin versant périurbain. Cette approche est donc basée sur l'exploitation de données géographiques accessibles et disponibles facilement sur le territoire. La digitalisation des chemins d'eau en milieu rural ne pourra probablement pas être faite pour d'autres bassins versants, mais ce sont les données qui décrivent à priori les chemins de l'écoulement rapide de l'eau probablement de la façon la plus réelle.

Pour construire le réseau hydrographique en milieu périurbain, trois approches seront mises en œuvre dans ce travail. Ces approches sont basées sur des objets géographiques différents.

- **l'approche « objet pur »** propose de reconstituer le réseau hydrographique à partir de données géographiques vectorielles qui sont classiquement disponibles pour ce type de milieu (cours d'eau et routes dans les bases de données comme la BD Topo de l'IGN, routes et réseau d'assainissement dans les banques de données urbaines)
- **l'approche « de validation »** propose de reconstituer le réseau hydrographique avec des données géographiques collectées sur le terrain, donc très proches de la réalité, avec en particulier les cours d'eau et les fossés qui ne peuvent pas être connus dans les bases de données géographiques classiques.
- **l'approche « mixte »** combine des informations issues de l'approche objet (routes), et des informations issues d'une analyse géomorphologique de données raster qui sont classiquement utilisées en hydrologie (traitement de la topographie, comme dans le modèle hydrologique Topmodel).

Ces approches seront testées à différentes échelles spatiales en raison de la disponibilité des données :

- les trois approches seront mises en œuvre et comparées à l'échelle d'une zone rurale sur laquelle toutes les données sont disponibles (zone amont de Sautron)
- les approches « objet pur » et « mixte » seront comparées sur le bassin versant complet de la Chézine.

5.2) Echelle de la zone amont de Sautron

Ce sous-bassin rural du bassin versant de la Chézine est le seul endroit où toutes les données nécessaires pour les trois approches élaborées sont disponibles. Ce sous-bassin de possède une surface totale de 4 km² et une surface imperméabilisée de 0,8 km². La longueur du cours d'eau le plus long est d'environ 4km.

5.2.1) Approche objet « pur »

En considérant que les routes représentent des chemins de l'eau, l'approche objet du milieu urbain peut être transposée au milieu périurbain de la façon suivante :

Le réseau hydrographique est constitué des routes et des cours d'eau. Quand un tronçon de voirie se trouve à proximité (moins de 8m) d'un tronçon de cours d'eau, une connexion est créée entre les deux. Par conséquent, l'eau qui est transportée par un tronçon de route peut se déverser dans un cours d'eau (mais pas l'inverse). Ce principe est celui qui est déjà appliqué dans le modèle URBS, où la voirie est connectée de la même façon à l'assainissement.

Tous les tronçons de routes qui sont directement connectés à un tronçon de cours d'eau comme décrit plus haut, et tous les tronçons qui mènent indirectement vers un tronçon de cours d'eau sans former une dépression locale, font également partie du réseau hydrographique de la zone amont de Sautron.

Figure 18 montre le réseau hydrographique obtenu ainsi.

	Approche objet du périurbain
Milieu rural	Routes
	Cours d'eau (Chézine BD Topo)
Milieu urbain	Routes
	Assainissement

Tableau 2 : Composition du réseau hydrographique de l'approche objet « pur »

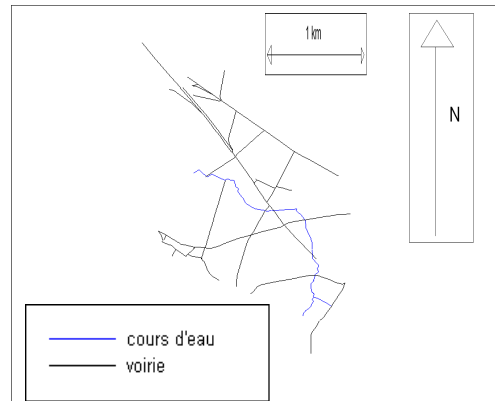


Fig.18 : Approche objet « pur »

5.2.2) Approche de validation

Dans cette approche, le réseau hydrographique est constitué des fossés qui ont été digitalisés à partir des observations du terrain et des cours d'eau en milieu rural.

	Approche de validation
Milieu rural	Fossés
	Cours d'eau (Chézine BD Topo)
Milieu urbain	Routes
	Assainissement

Tableau 3 : Composition du réseau hydrographique de l'approche de validation

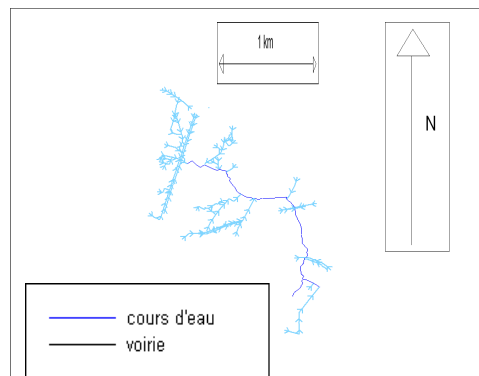


Fig.19 : Approche de validation

En comparant la morphologie de ces deux approches, on voit que certains petits affluents de la Chézine ne sont pas bien représentés dans l'approche objet pur. Une approche mixte a alors été élaborée, dans laquelle la Chézine de la BD Topo sera remplacée par la Chézine issu du MNT, dont la densité est choisie en fonction des besoins du modèle hydrologique utilisé.

Malgré l'absence de ces affluents, la densité totale du réseau est plus faible dans l'approche de validation que dans l'approche objet « pur ». Cela pose la question de la qualité des observations qui ont été faites sur le terrain : elles dépendent des conditions

météorologiques et sont parfois insuffisantes pour connaître précisément les chemins de l'eau pluviale et la direction du ruissellement rapide.

5.2.3) Approche mixte

Dans cette approche, le cours d'eau est déterminé par l'analyse de la topographie du bassin versant, en utilisant une densité de traitement suffisamment fine pour représenter les petits cours d'eau. La comparaison entre les figures 19 et 20 montre que quasiment tous les chemins de l'eau de l'approche de validation sont représentés dans l'approche mixte. Cela n'est pas valable pour l'approche objet « pur », mais la densité du réseau hydrographique de l'approche mixte est nettement supérieure à celle de l'approche de validation, mais aussi à celle de l'approche objet « pur ».

Si on superpose le réseau hydrographique obtenu par cette approche avec la totalité des fossés digitalisés sans prendre en compte s'ils sont connectés au réseau hydrographique, on observe que les deux sources de données sont concordantes. Probablement, la direction de l'écoulement d'eau est très bien représentée dans l'approche mixte. Seulement, cette approche est incapable de sélectionner uniquement les chemins de l'eau qui ne sont ni obstrués, ni interrompus par des obstacles et qui ont par conséquent seulement un caractère stockant.

	Approche mixte
Milieu rural	Routes
	Cours d'eau (Chézine MNT, dense)
Milieu urbain	Routes
	Assainissement

Tableau 4 : Composition du réseau hydrographique de l'approche mixte

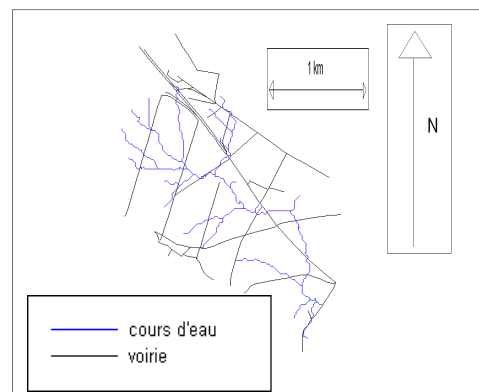


Fig.20 : Approche mixte

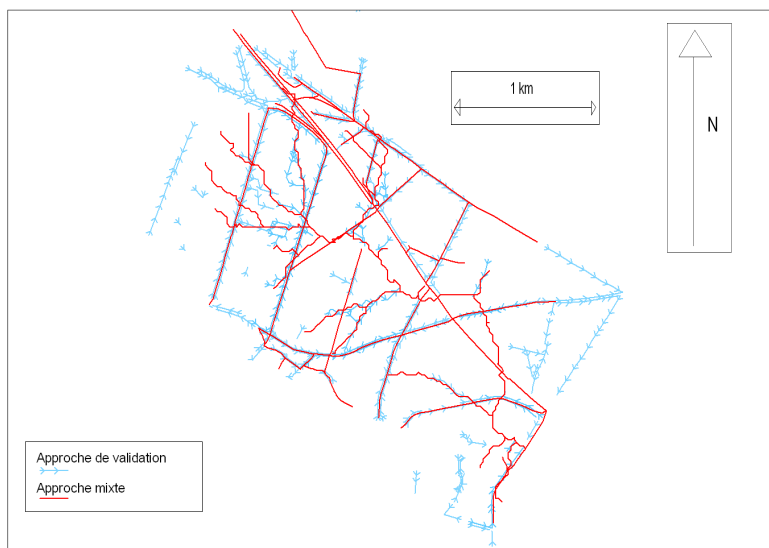


Fig.21 : Superposition de la totalité des fossés avec l'approche mixte

La comparaison de ces trois approches à l'échelle du sous-bassin versant rural montre d'une part que l'approche mixte représente un plus grand nombre des cours d'eau figurant dans l'approche de validation que l'approche objet « pur », et que d'autre part l'approche objet « pur » possède une densité du réseau hydrographique plus proche de l'approche de validation que celle de l'approche mixte. Si l'approche de validation représente une référence en tant que « vérité terrain », il semble donc difficile de trancher sur la pertinence d'une approche par rapport à l'autre, et cela d'autant plus que l'approche de validation est peut être insuffisamment renseignée, comme cela a été constaté plus haut.

5.3) Echelle du bassin versant de la Chézine

Seules l'approche mixte et l'approche objet ont pu être appliquées sur le bassin entier. La construction du réseau hydrographique du bassin versant de la Chézine selon ces deux approches est illustrée par les figures 22 et 23.

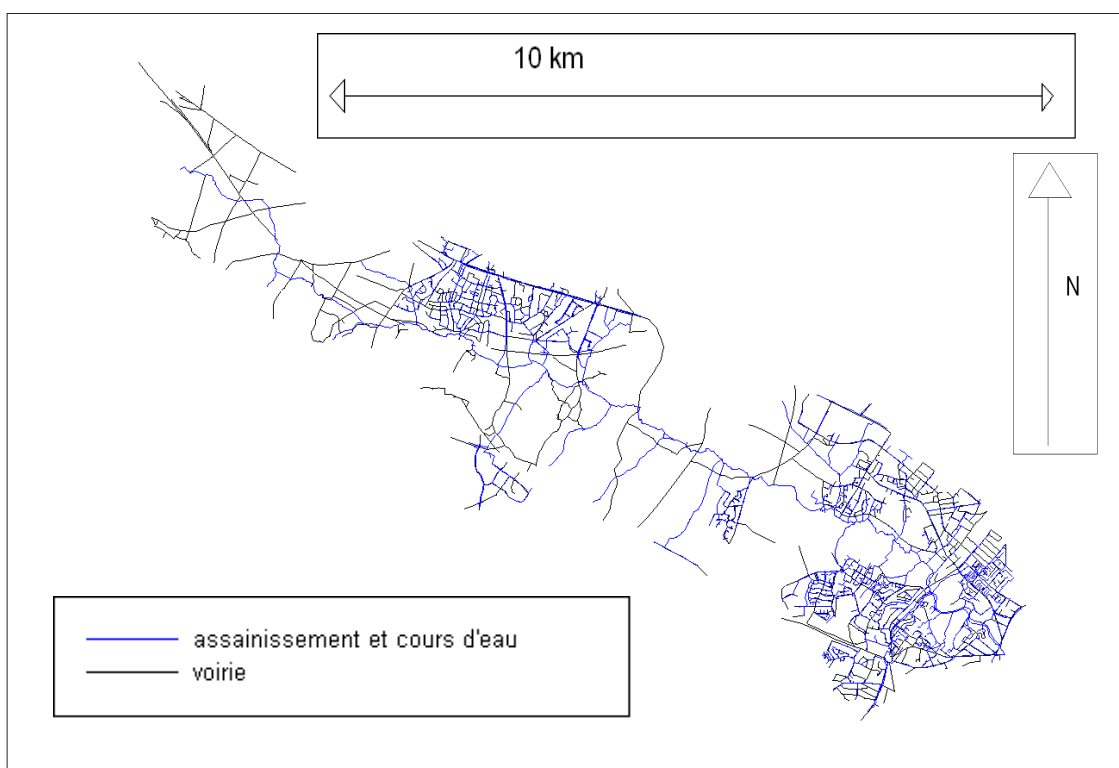


Fig.22 : Approche objet « pur » appliquée au bassin versant de la Chézine

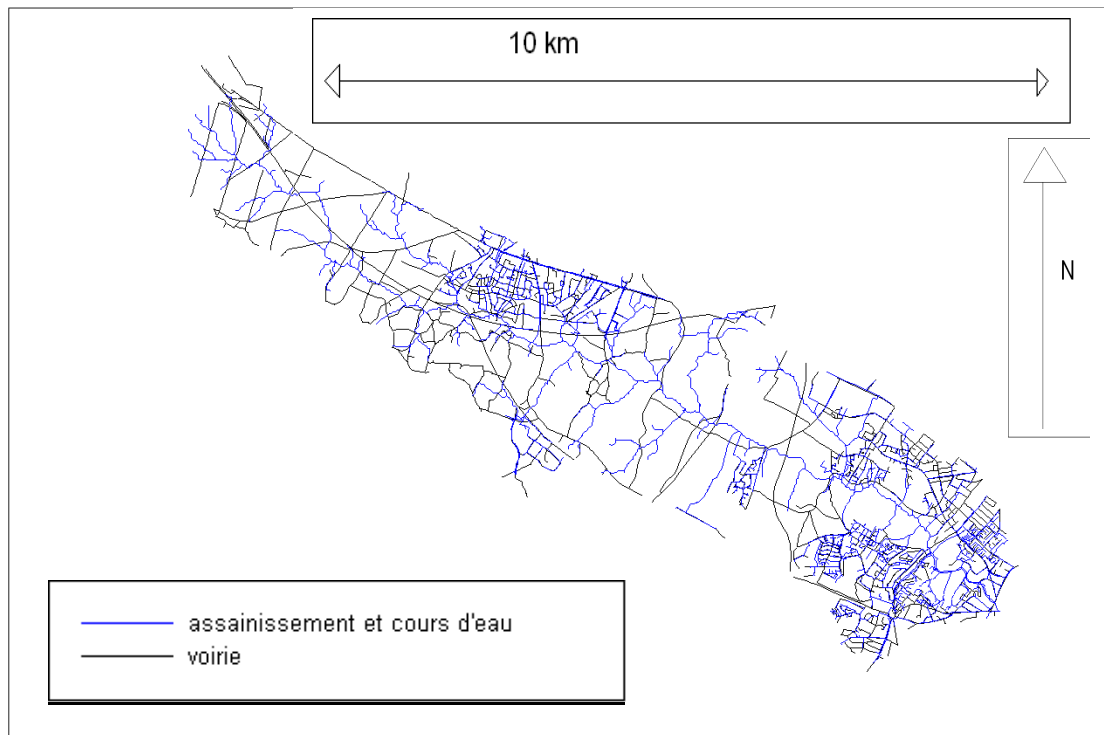


Fig.23 : Approche mixte appliquée au bassin versant de la Chézine

En appliquant l'approche objet « pur » à une zone plus grande, on remarque des régions d'absence de réseau hydrographique. Dans ces régions, le cours d'eau utilisé dans cette approche (Chézine issu de la BD Topo) n'est pas très dense, et en particulier, n'a aucun affluent. Les routes qui se trouvent sur ces régions ne peuvent pas être considérées comme contributives parce qu'elles forment des dépressions locales. Dans l'approche mixte, étant donnée la densité plus importante du réseau hydrographique constitué par les cours d'eau, ces routes ne forment pas de dépression locale parce qu'elles sont connectées à des affluents de la Chézine. Avant d'avoir observé le ruissellement à ces endroits en temps de pluie, on ne peut pas dire de façon sûre quelle est l'approche qui décrit la mieux la réalité à ces endroits-ci. Le ruissellement dépendra également de l'état de saturation du sol en surface.

De plus, les zones urbaines sont très marquées par la forte densité de leur réseau hydrographique, liée à la présence du réseau d'assainissement. La différence entre la densité en milieu rural et celle en milieu urbain est plus grande dans l'approche objet « pur » où le cours d'eau utilisé (Chézine issue de la BD Topo) est également moins dense.

5.4) Transposition du modèle urbain au milieu périurbain

Pour adapter le modèle URBS au milieu périurbain, certaines modifications ont été mises en œuvre.

5.4.1) Sélection des routes contributives au réseau hydrographique

Dans le milieu urbain, presque la totalité des tronçons de routes est reliée au réseau d'assainissement à travers les avaloirs qui collectent l'eau qui ruisselle dans les caniveaux. Des dépressions locales de la voirie ne posent pas de problème pour l'écoulement de l'eau,

car les liens entre la voirie et le réseau d'assainissement sont nombreux (en moyenne, les normes de construction indiquent la présence d'un avaloir tous les 70 m le long des rues).

En milieu rural, la densité des routes et des cours d'eau est moins importante, et certaines voiries peuvent être situées dans des dépressions locales sans être connectées au cours d'eau.

Les routes qui ne sont pas reliées au réseau hydrographique ne sont pas prises en compte dans le réseau hydrographique. On fait l'hypothèse que ces tronçons de route sont stockant (comme les fossés stockant). Ces tronçons ont été donc enlevés de la table de voirie contributive.

5.4.2) Connexion de la parcelle au réseau hydrographique

Le modèle URBS suppose que le ruissellement commence au lieu de la production, la parcelle cadastrale qui est d'abord connectée à la voirie le plus proche pour continuer ensuite le chemin dans le réseau d'assainissement. Cette hypothèse est très près de la réalité en ville, mais elle peut modifier le cheminement du ruissellement rapide de façon considérable en milieu rural. Les parcelles rurales qui sont voisines d'un cours d'eau et qui sont loin de la voirie, devront être préférentiellement connectées au cours d'eau dans le modèle périurbain.

Des modifications ont été mises en place pour que la parcelle cadastrale voisine de n'importe quel élément du réseau hydrographique (voirie, assainissement, cours d'eau), soit connectée à l'élément le plus proche de ce réseau.

5.4.3) Sélection des parcelles qui font partie du bassin versant

La délimitation du bassin versant se fait de façon automatique à partir des connexions entre les parcelles et les tronçons du réseau hydrographique. Pour obtenir les parcelles qui font partie du bassin versant, il faut sélectionner les parcelles qui sont directement ou indirectement connectées aux tronçons de voirie contributifs ou aux tronçons d'assainissement et de cours d'eau contributifs.

Comme déjà mentionné, les tronçons de routes qui forment une dépression locale ont été supprimés en supposant qu'ils ne contribuent pas au réseau hydrographique. Quand cette dépression locale se trouve à la limite du bassin, il n'est pas toujours évident de savoir, si cette dépression locale fait partie du bassin ou non.

Sont concernées par ce problème, surtout les deux approches pour lesquelles le réseau n'est pas suffisamment dense (approche de validation, approche objet pur) La troisième approche (approche mixte) possède un réseau suffisamment dense pour ne pas rencontrer beaucoup de dépressions isolées. En générale, la présence d'un tronçon de cours d'eau ou de voirie permet de les connecter au réseau hydrographique.

5.4.4) Parcelles masquées

Deux types de parcelles sont distinguées : les parcelles viaires et les parcelles masquées

- Les parcelles viaires sont connectées au tronçon de route, d'assainissement ou de cours d'eau le plus proche.
- Les parcelles qui ne sont pas voisines du réseau hydrographique sont appelées dans URBS parcelles masquées .

En milieu urbain, les parcelles masquées ne sont pas très nombreuses. Pour cette raison, elles ont été connectées à la parcelle viaire voisine la plus proche (en fonction du centre de gravité de la parcelle). Par itération, toutes les parcelles masquées sont connectées à une parcelle viaire. La condition de connexion est alors en priorité la proximité à la voirie.

En milieu rural, le réseau hydrographique est beaucoup moins dense et la plupart des parcelles sont des parcelles « masquées ». En ce qui concerne le sous-bassin situé sur la zone amont de Sautron, dans l'approche de validation qui possède le réseau hydrographique le moins dense, 63 % des parcelles sont des parcelles masquées, dans l'approche mixte, la plus dense, ce sont 29,5 %. Ces données concernent la zone amont de Sautron qui est purement rurale. Dans le bassin versant de la Chézine, les parcelles masquées représentent encore 18,6 % si on applique l'approche mixte. Par la méthode qui est utilisée en milieu urbain on risque de ne pas seulement modifier le cheminement de l'eau mais également la taille du bassin versant, car si une parcelle qui fait en réalité partie du bassin versant se trouve plus près d'un tronçon de route qui ne contribue pas au réseau, elle ne peut pas contribuer au ruissellement du bassin versant.

Une application a été développée pour connecter plus correctement les parcelles, en se basant sur la cote du centre de gravité de chaque parcelle. Une parcelle est connectée alors d'abord à une autre en fonction de la topographie, en recherchant une parcelle viaire la plus proche.

Dans un premier temps, toutes les parcelles qui touchent la zone tampon de 15m autour du réseau hydrographique sont connectées à celle-ci. Ensuite, on sélectionne pour chaque parcelle son voisin le plus bas des tous ces voisins qui se trouvent à un niveau inférieur de cette parcelle. Si toutes les parcelles voisines de cette parcelles se trouvent à un niveau supérieur, mais qu'il existe une parcelle viaire parmi eux, elle est connecté à celle-ci.

Certaines parcelles ne trouvent pas de connexion à ce moment. On les ignore momentanément et, par itération, on trouve pour chaque parcelle connectée le chemin à travers les parcelles connectées jusqu'à une parcelles viaire. Le tableau est mis à jour pour attribuer à chaque parcelle connectée le nom du tronçon de connexion.

Les parcelles qui n'ont pas été connectées sont entourées d'une zone tampon de 100m qui est intersecté avec le réseau hydrographique pour trouver une connexion directe avec un tronçon de voirie ou de cours d'eau. On recalcule le cheminement pour toutes les parcelles qui ne sont pas encore arrivées jusqu'à un tronçon.

Après ce pas, certaines parcelles sont toujours pas connectées parce qu'elles se trouvent dans une dépression locale loin du réseau hydrographique. Pour celle-ci, on choisit la parcelle voisine la plus basse sans prendre en compte la différence de niveau avec elle-même. Si cette parcelle voisine est une parcelle déjà connectée, la recherche de chemin est finie, si ce n'est pas le cas, on cherche pour la parcelle voisine un voisin de la même façon forcée (sans

prendre la parcelle de laquelle on part) etc. jusqu'à ce qu'on tombe sur une parcelle qui a déjà trouvé son cheminement jusqu'à un tronçon.

La figure 24 montre que ce nouveau traitement des parcelles masquées arrive à connecter des parcelles rurales au réseau hydrographique qui ne l'ont pas été par l'ancienne méthode (la méthode du modèle urbain URBS). Certaines des parcelles qui se trouvent dans le bassin versant défini par le traitement du MNT mais qui n'ont pas été connectées au réseau hydrographique, notamment celles qui se trouvent au Sud-ouest de Sautron, sont connectées aux dépressions locales des routes. La méthode de la reconstruction du réseau hydrographique développé pour le milieu urbain, ne permet pas de savoir si ces dépressions locales du réseau viaire font partie du bassin versant. Ceci est un exemple qui illustre les conséquences du problème de la sélection des parcelles (chapitre 5.4.3).

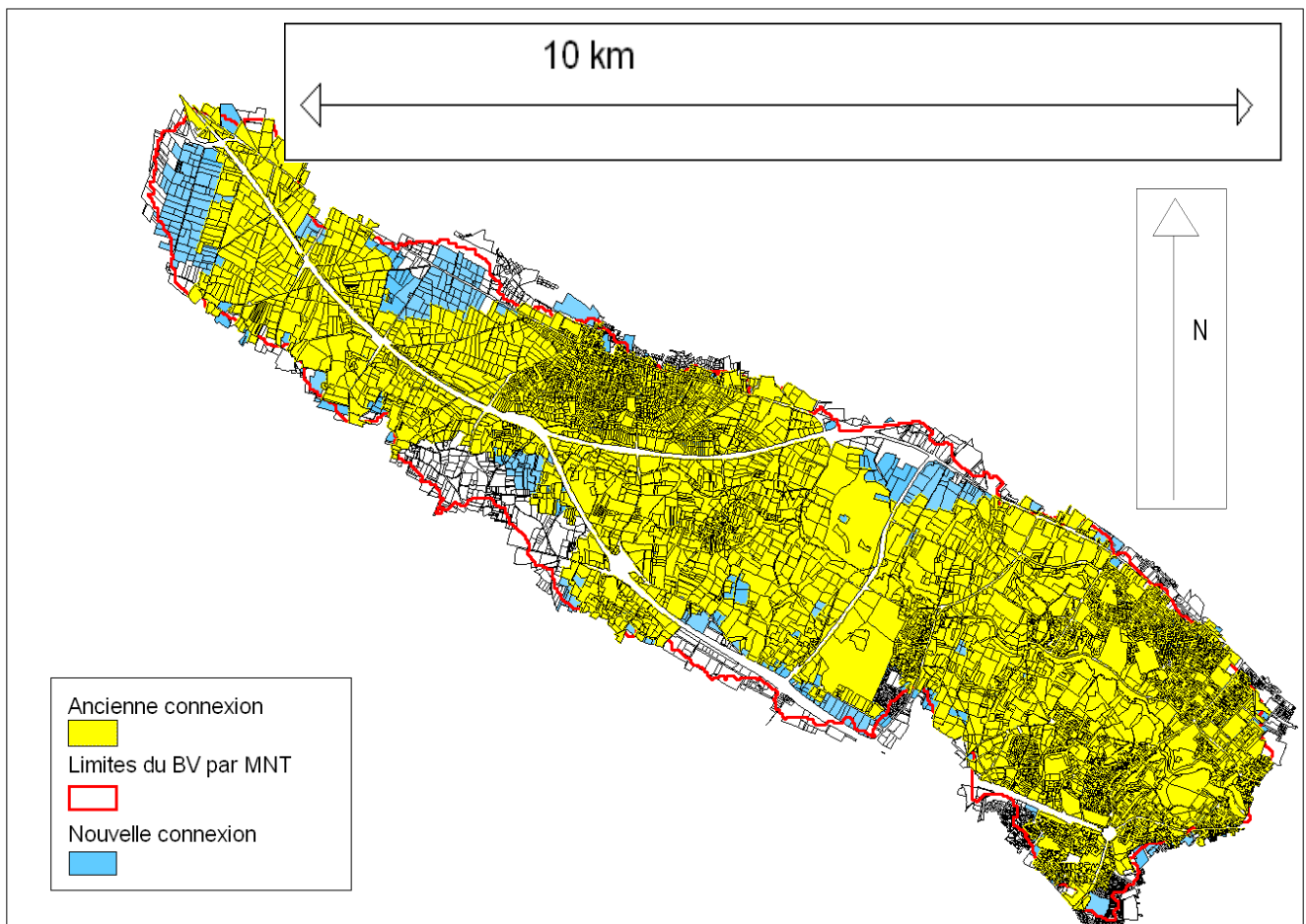


Fig.24 : Différence de la taille et forme du bassin versant issu par l'ancienne méthode de connexion de parcelles et de la nouvelle méthode avec les limites du bassin versant obtenu par traitement du MNT.

5.5) Contribution des fossés

Selon les observations collectées sur le terrain, un grand nombre des fossés qui ont été classés dans ce rapport comme sûrement contributifs, étaient partiellement obstrués. En général, les fossés sont régulièrement entretenus par les agriculteurs dans leur propre intérêt, mais on ne connaît pas leur fréquence d'entretien. Il arrive aussi que les fossés qui sont habituellement très bien entretenus, soient bouchés (par du matériel végétal) lors d'un événement pluvieux.

Comme ce phénomène d'obstruction est mal connu et qu'il varie dans l'année et selon les pratiques agricoles, il a été choisi de tester l'influence de ce phénomène de façon forfaitaire. Pour l'approche de validation, le réseau hydrographique a été étudié en modifiant le taux de fossés bouchés. Trois cas ont été choisis : 25%, 50% ou 75% des fossés sont considérés comme bouchés, en fonction de la distance entre un fossé et la Chézine (Fig.25).

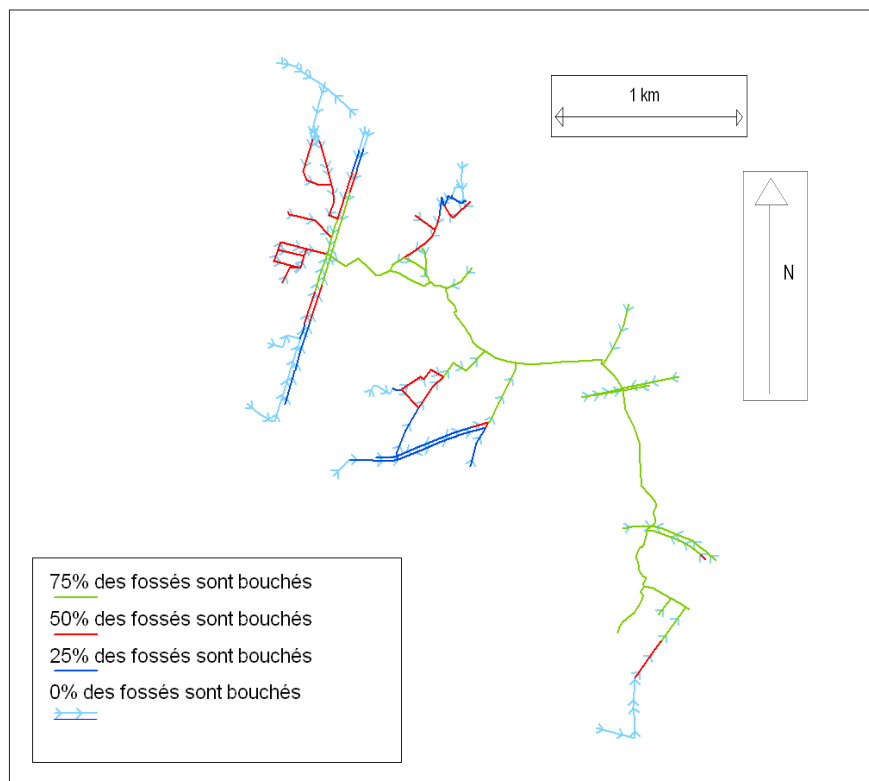


Fig .25 : Hypothèse qu'un certain pourcentage des fossés est bouché. Les couches des fossés sont superposées.

6) Résultats des analyses morphologiques

6.1) Classification du réseau hydrographique selon le schéma de Horton-Strahler

Connaissant le réseau hydrographique, les branches peuvent être classées selon leur importance vis-à-vis de l'écoulement. La méthode la plus utilisée dans la littérature mentionnée et celle de Horton-Strahler (1952) qui est définie comme suit :

-tout cours d'eau sans affluent est d'ordre 1

-le tronçon de rivière formé par la confluence de deux tronçons d'ordre différent prend l'ordre le plus élevé des deux tronçons

-tous les tronçons de rivière formés par la réunion de deux cours d'eau d'ordre ω sont d'ordre $\omega + 1$.

6.1.1) Analyse graphique à l'échelle de la zone en amont de Sautron

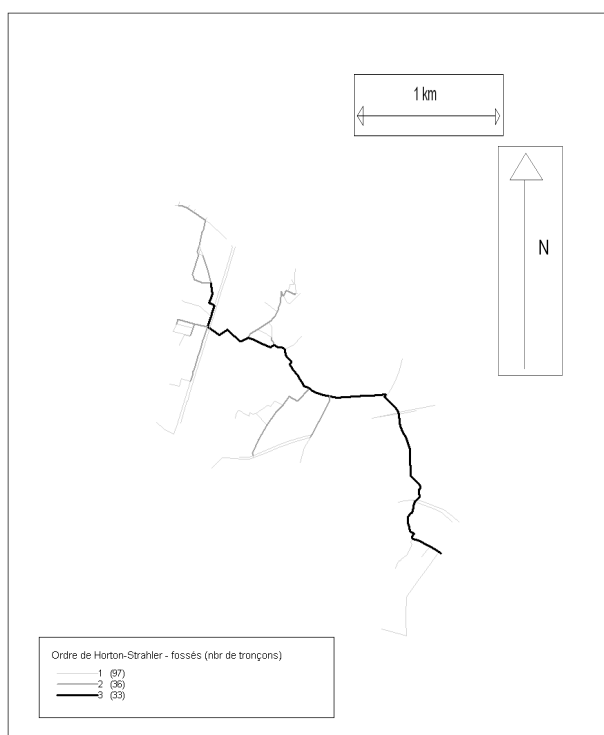


Fig.26 : Ordre de Horton – approche de validation – zone en amont de Sautron

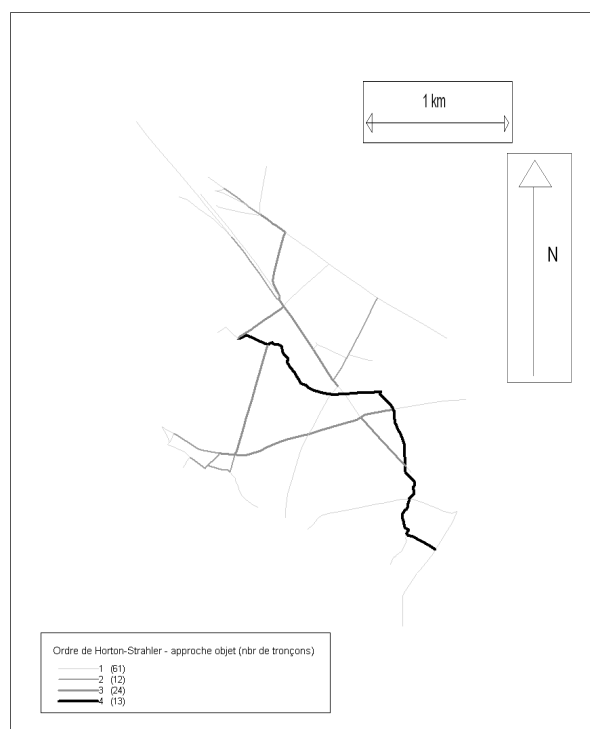


Fig.27 : Ordre de Horton – approche objet « pur » - zone en amont de Sautron

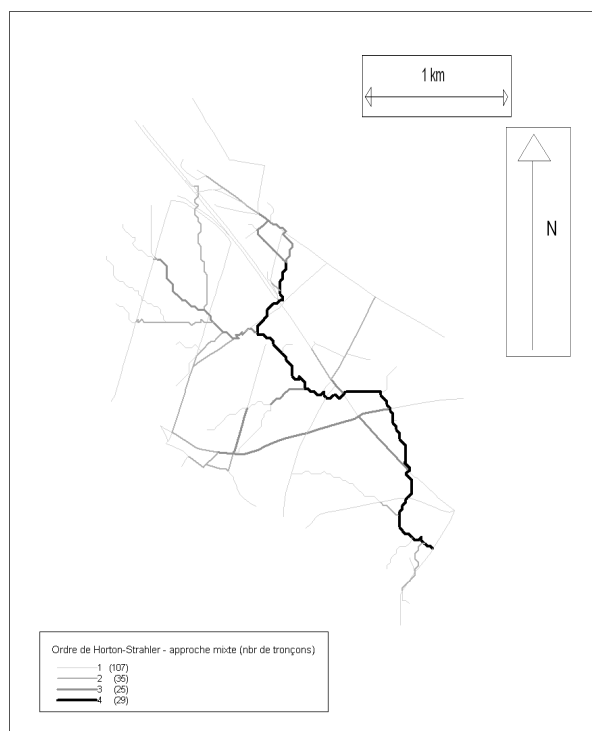


Fig.28 : Ordre de Horton – approche mixte – zone en amont de Sautron

Sur les graphiques, on aperçoit déjà une différence dans le nombre de l'ordre.

Les fossés qui contribuent au ruissellement selon les observations faites sur le terrain, sont très proches de la Chézine. On obtient dans l'analyse de Horton uniquement un ordre de 3. Comme déjà discuté plus haut, en reconstituant le réseau hydrographique on ne peut pas tenir compte de l'obstruction et des ruptures (par des obstacles) des cours d'eau et fossés. Pour cette raison, les affluents sélectionnés dans les approches objet « pur » et mixte prennent leur source plus loin du cours d'eau principal ce qui augmente aussi la densité du réseau. Par conséquent, l'ordre de Horton augmente.

La plupart des tronçons d'ordre 1 des deux approches reconstituées (approche mixte et objet « pur ») sont des routes.

La visualisation des ordres de Horton permet aussi de suivre le cheminement de l'eau. On y observe par exemple une différence entre l'approche de validation et les deux approches reconstitués sur la zone Ouest de la Chézine. Au milieu de ce côté, on retrouve certains tronçons d'affluents dans les trois approches, mais ils ne suivent pas le même chemin pour atteindre la Chézine.

6.1.2) Analyse graphique à l'échelle du bassin versant de la Chézine

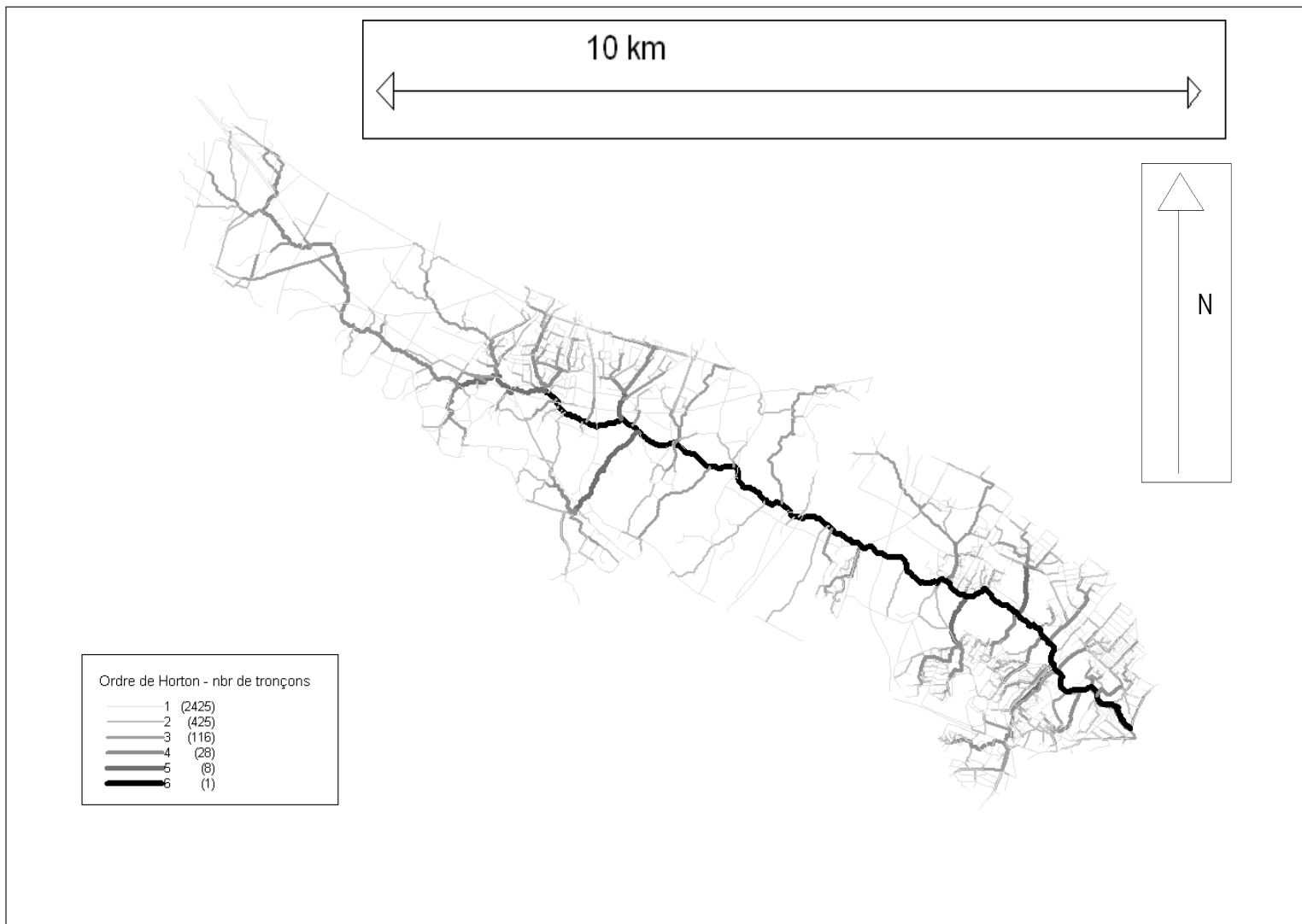


Fig 29 : Ordre de Horton – approche mixte – bassin entier

Dans l'analyse graphique du bassin entier visualisé dans les figures 28 et 29, il est observé que les zones urbaines modifient la structure de la classification de Horton. Comme déjà mentionné dans la reconstitution du réseau, les zones urbaines sont marquées par la forte densité de leur réseau hydrographique due à la présence du réseau d'assainissement. Dans ces zones, l'ordre de Horton peut augmenter suffisamment pour influencer l'ordre total du bassin versant (Un tronçon de la zone urbaine de Sautron est d'ordre 5 et fait passer le cours d'eau principal de l'ordre 5 à l'ordre 6 à l'intersection avec celui-ci). A l'aval de Sautron, les affluents n'atteignent plus un ordre suffisamment élevé pour augmenter l'ordre total.

En milieu rural, l'ordre des affluents du cours d'eau principal ne dépasse pas 3, dans les deux approches. Par conséquent, les tronçons d'ordre 3 et inférieur sont plus nombreux dans l'approche mixte, où la densité en milieu rural est plus élevée. Le cours d'eau principal et le réseau en milieu urbain sont quasiment identiques dans les deux approches. Pour cette raison, les nombres de tronçons des ordres supérieurs à 4 sont similaires.

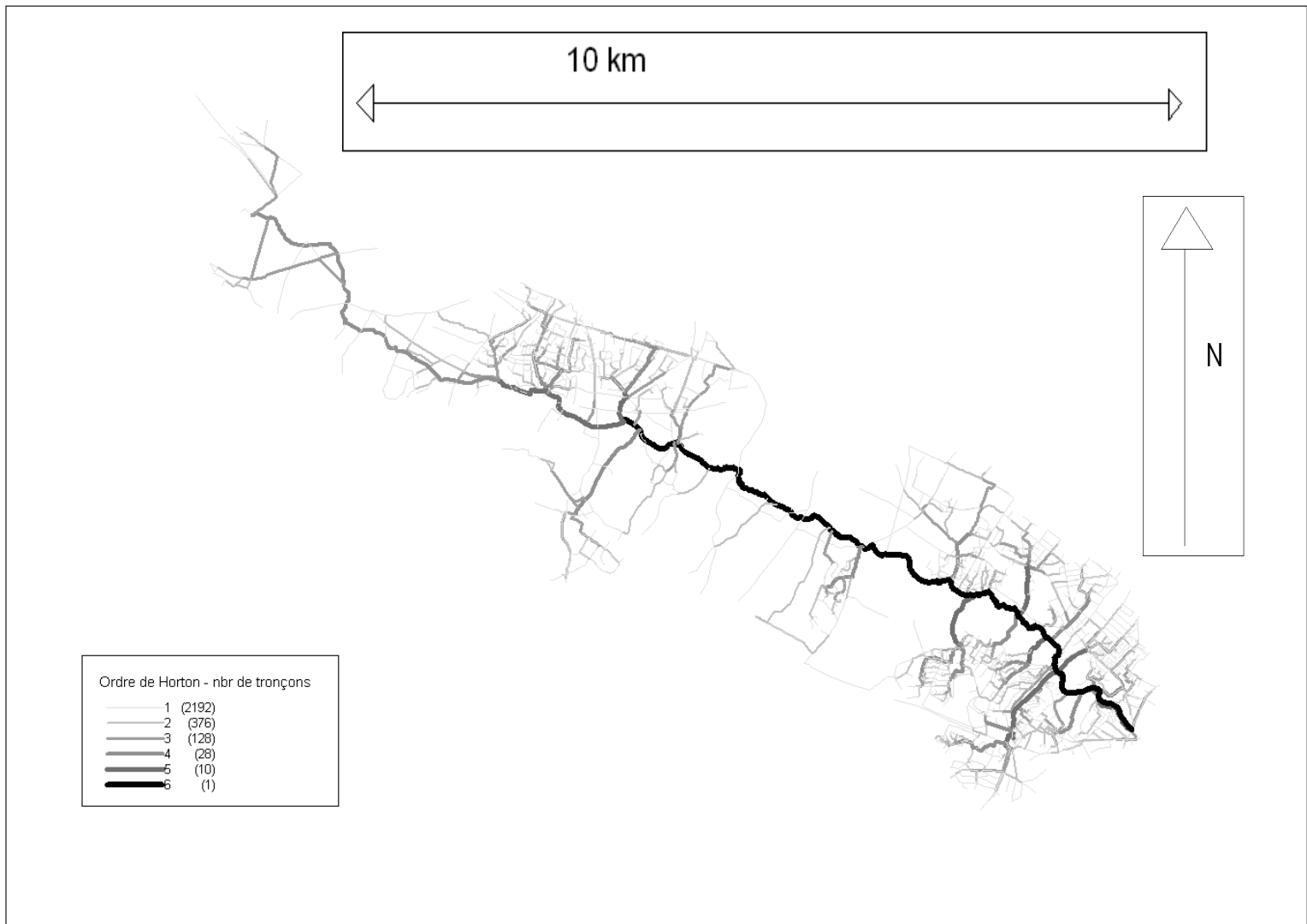


Fig 30 : Ordre de Horton – approche mixte – bassin entier

6.1.3) Détermination des rapports de Horton

Ensuite, on peut calculer les rapports de Horton pour les bassins versants ruraux. Ces rapports convergent vers une constante (différente pour chaque cours d'eau).

$$\text{loi des bifurcations : } R_B = (N_{\omega-1})/N_{\omega} \tag{5}$$

$$\text{loi des longueurs : } R_L = L_{\omega} / (L_{\omega-1}) \tag{6}$$

où :

N_{ω} est le nombre de tronçons d'ordre ω ,
 L_{ω} est la longueur moyenne des tronçons d'ordre ω ,
 R_B est le rapport de bifurcations et
 R_L est le rapport des longueurs

Cette constante peut être estimée en traçant $N(\omega)$, pour obtenir R_B , et $L(\omega)$, pour obtenir R_L , en fonction de l'ordre ω dans un diagramme semi-log. Si les points sont alignés, la pente de la droite donne le rapport R_B ou R_L . Ces rapports varient classiquement entre 3 et 5 pour R_B et entre 1,5 et 3,5 pour R_L . Plus l'ordre du bassin versant est élevé, plus il sera facile de déterminer ces constantes.

Les analyses des rapports de Horton des trois approches appliquées sur la zone en amont de Sautron sont comparées dans le tableau suivant :

Approche de Validation				
ordre	nombre de tronçons	longueur moyenne	R_B	R_L
3	1	2898.52	11.00	
2	11	273.776	4.55	10.59
1	50	170.442		1.61
moyenne			7.07	4.10
Approche « Objet Pur »				
ordre	nombre de tronçons	longueur moyenne	R_B	R_L
4	1	2337.48	21.00	
3	21	186.881	0.52	12.51
2	11	202.171	5.18	0.92
1	57	175.961		1.15
moyenne			3.15	2.16
Approche Mixte				
ordre	nombre de tronçons	longueur moyenne	R_B	R_L
4	1	2989.81	11.00	
3	11	378.983	2.09	7.89
2	23	230.136	4.39	1.65
1	101	208.562		1.10
moyenne			4.30	2.34

Tableau 5 : Analyse Horton de la zone amont de Sautron à partir des trois approches élaborées

Le Tableau 2 montre que les valeurs moyennes de R_B et de R_L sont assez différentes dans les trois cas. La différence principale entre l'approche de validation et les deux approches reconstituées est l'ordre. Comme mentionné dans l'analyse graphique de la zone amont de Sautron (6.1.1), cette différence d'ordre vient du fait que les approches reconstituées ne prennent pas en compte la rupture des chemins de l'eau par des obstacles et leur obstruction. En réalité, peu de fossés reconstitués ainsi contribuent au ruissellement, même si leur existence est prouvée par les observations faites sur le terrain (chapitre 5.2, figure 21–

superposition des fossés avec l'approche mixte). La comparaison des rapports R_B et R_L de l'approche mixte avec ceux de l'approche objet « pur » fait sortir encore une fois que la plus forte densité du réseau hydrographique de l'approche mixte. Ceci se traduit aussi par le nombre élevé de tronçons d'ordre 1. On remarque également une différence dans les nombres de tronçons d'ordre 2 et 3 dans ces deux approches. Cette différence est liée au différent cheminement de l'eau.

Dans l'analyse de la zone amont de Sautron, on peut déjà deviner que l'hypothèse que les routes font partie du réseau hydrographique provoque une augmentation de R_B entre l'ordre 1 et 2. Cette tendance est plus marquée dans l'analyse du bassin entier présentée par le tableau 3. R_L n'est pas beaucoup influencé, parce que les longueurs des tronçons de routes sont similaires aux autres tronçons d'ordre 1.

Approche objet				
ordre	nombre de tronçons	longueur moyenne	R_B	R_L
6.00	1	8454.58	10.00	13.92
5.00	10	607.58	2.80	1.15
4.00	28	529.37	4.57	2.38
3.00	128	222.86	2.94	1.54
2.00	376	144.66	5.83	1.58
1.00	2192	91.76		
		moyenne	4.28	2.21
Approche mixte				
ordre	nombre de tronçons	longueur moyenne	R_B	R_L
6.00	1	9620.04	8.00	13.97
5.00	8	688.56	3.50	1.18
4.00	28	583.98	4.14	1.83
3.00	116	318.31	3.66	2.08
2.00	425	152.99	5.71	1.54
1.00	2425	99.50		
		moyenne	4.46	2.22

Tableau 6 : Analyse des rapports de Horton R_B et R_L dans le bassin versant de la Chézine à partir de l'approche objet « pur » et l'approche mixte

6.2) Les signatures morphologiques du bassin versant

Les signatures morphologiques sont utiles pour étudier la morphologie du réseau hydrologique. Leur forme donne déjà une indication sur la forme de la réponse hydrologique du bassin versant. Elles ont été décrites et utilisées par plusieurs auteurs (ex. Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997, Rodriguez F., Andrieu H (2003)).

6.2.1) La fonction largeur (width fonction)

Une caractéristique d'un réseau hydrographique est que le cheminement unidimensionnel entre chaque point situé dans le bassin versant et l'exutoire est unique. La longueur de ce chemin jusqu'à l'exutoire peut être estimée pour chaque élément unitaire du bassin versant. Dans la méthode maillée, cet élément unitaire correspond à la maille de réseau hydrographique.. Dans la méthode ci-présente, la fonction largeur est calculée à partir des nombres de tronçons situés à une distance (de parcours d'eau) à l'exutoire.

La comparaison des trois méthodes (approche de validation, approche objet et approche mixte) sur la zone amont de Sautron est illustrée par la figure 30.

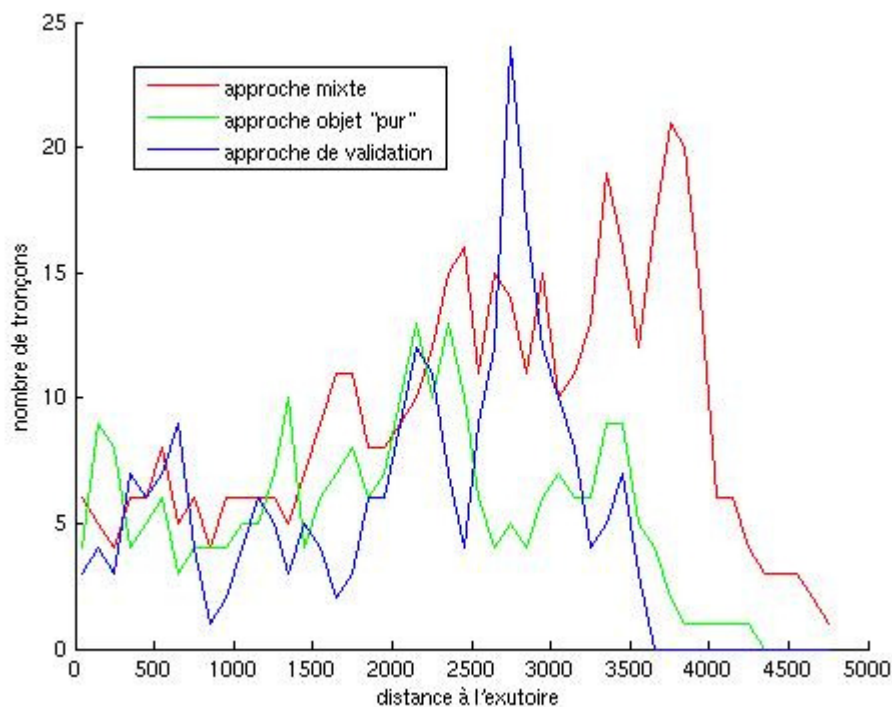


Fig.30 : Fonction largeur des trois approches appliquée à la zone amont de Sautron

De façon générale, ces trois courbes décrivent la même tendance. Elles décrivent une haute densité en amont qui diminue progressivement et augmente légèrement près de l'exutoire. Néanmoins, cette superposition dans la figure 30 montre aussi l'importance des différences entre ces trois approches.

En comparant ces trois approches par la fonction largeur dans la figure 30, on remarque que dans les trois approches, l'amont du sous-bassin est plus dense que l'aval. La densité commence à augmenter très précisément à une distance de 2000m de l'exutoire. De façon générale, les deux approches mixte et objet « pur » surestiment la densité du réseau si on considère que l'approche de validation décrit la réalité. Cette surestimation est causée par le fait que ces deux approches reconstituées ne prennent en compte ni l'obstruction des chemins de l'eau ni leur rupture par des obstacles. A un seul endroit, la fonction largeur de l'approche de validation dépasse remarquablement les autres courbes. Il s'agit du pic qui se situe environ entre 2500 et 3250m de distance à l'exutoire. La différence entre la fonction largeur de l'approche objet « pur » et l'approche de validation peut être expliquée en comparant les cartes des réseaux hydrographiques (fig 18 à 19). Les tronçons de l'amont du réseau de validation sont absents dans le réseau de l'approche objet « pur ». En contre partie,

les affluents principaux sont plus longs dans l'approche objet « pur » ce qui provoque une fonction de largeur plus allongée.

La raison pour laquelle le pic maximal de l'approche de validation dépasse également la courbe mixte pose plus de questions. En superposant les deux réseaux, on voit certaines différences à cet endroit-là. On remarque par exemple une route qui est drainée par deux fossés – un de chaque côté. Ces deux fossés sont représentés par deux chemins de l'eau dans l'approche de validation mais par un seul dans l'approche mixte (1 route est représentée par 1 chemin de l'eau). De plus le cheminement est différent dans cette petite zone dans les deux approches. D'autres raisons peuvent être invoquées : des ensembles de petits fossés ont été observés sur le terrain pour décrire un ruissellement diffus à l'intérieur des parcelles agricoles. Une fois encore, ce chemin de l'eau est représenté dans l'approche mixte comme un seul tronçon de cours d'eau comme la figure 31 l'illustre.

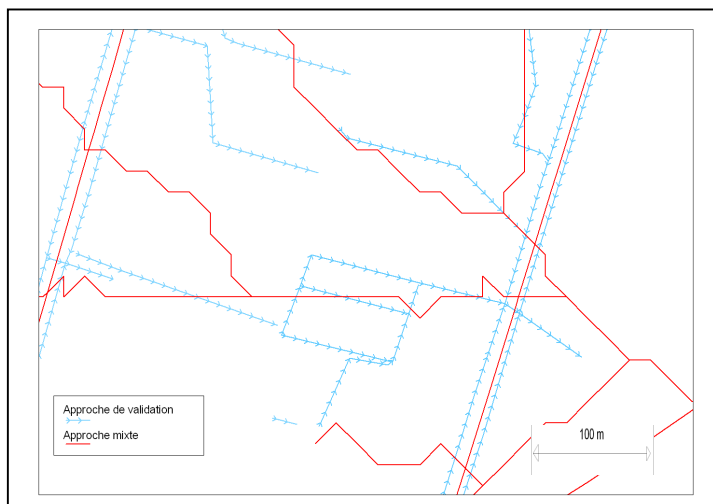


Fig.31 : Illustration des différences dans la densité du réseau hydrographique de l'approche mixte et de l'approche de validation.

La sensibilité de la contribution des fossés au réseau hydrographique a ensuite été testée, en faisant varier le degré d'obstruction des fossés comme décrit dans le paragraphe 5.5. La figure 31 représente les variations de la morphologie de l'approche de validation si on considère qu'un nombre de fossés sont obstrués et seulement un certain taux des fossés est actif. Les courbes des quatre variantes se superposent entre 700 et 1700m de distance à l'exutoire parce qu'elles sont uniquement constituées des tronçons du cours d'eau principal à cet endroit. Le nombre de tronçon change légèrement dans la zone entre 0 et 700m de l'exutoire où le réseau hydrographique est plus développé. La plus grande différence se trouve au pic maximal qui représente 6 tronçons si 25% des fossés sont actifs et 26 si tous les fossés sont actifs.

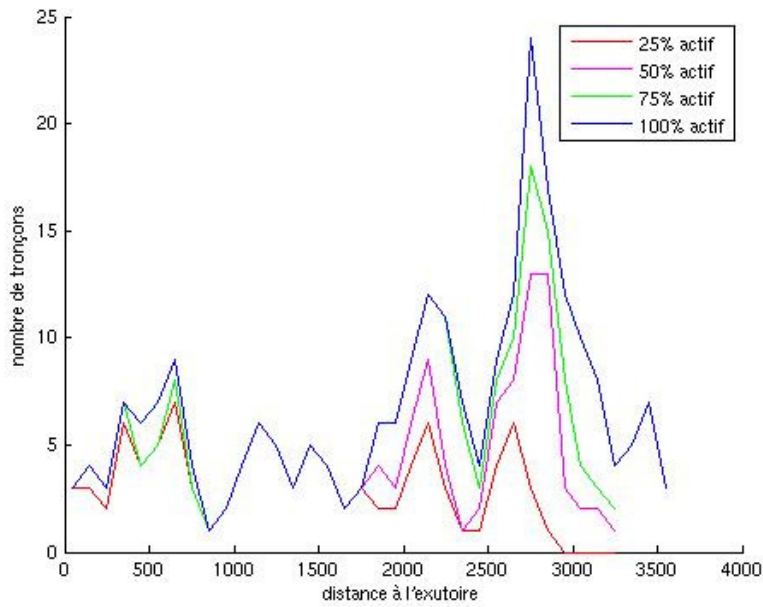


Fig. 32 Fonction largeur de l'approche de validation en variant le taux de fossés actifs

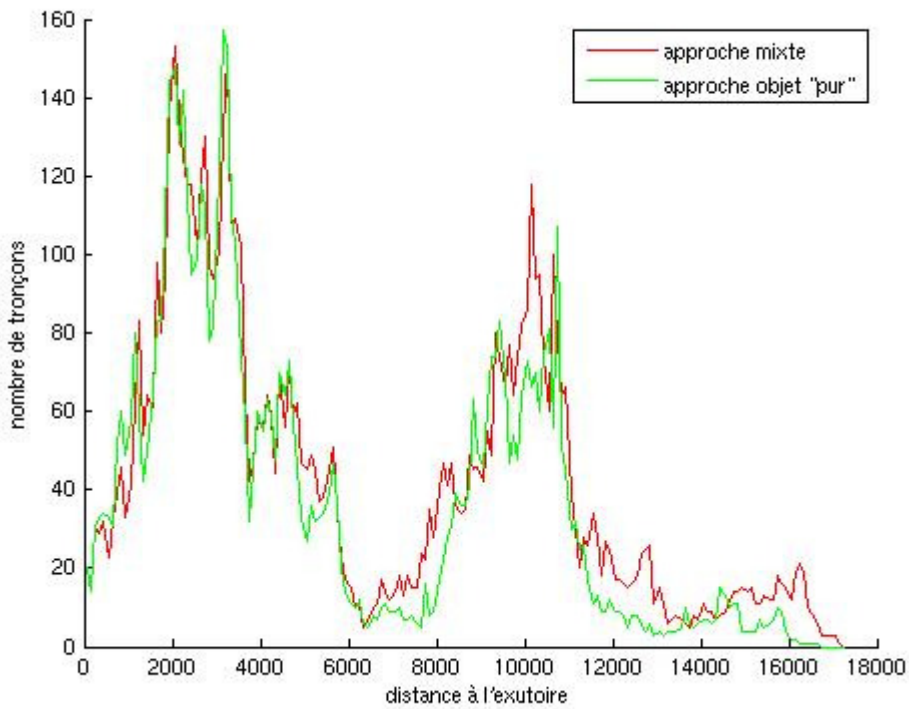


Fig .33 : Fonction largeur des approches mixte et objet « pur » appliquée au bassin versant de la Chézine

La Figure 33 montre la superposition de la fonction largeur de l'approche objet « pur » et mixte appliquées au bassin versant de la Chézine. Les deux courbes indiquent une tendance

générale très similaire. Elle illustre clairement la densité élevée du réseau hydrographique dans les zones urbaines de Sautron et de Nantes qui sont représentées par les deux pics majeurs. Sur ces deux zones urbaines, les deux approches indiquent des fonctions largeur très proches, car la densité du réseau hydrographique est similaire. Comme dans le cas de la zone amont de Sautron, on remarque que l'approche mixte possède un réseau hydrographique plus étendu et plus dense que l'approche objet pur, et cela se traduit par une fonction largeur presque toujours importante pour l'approche mixte. Ce phénomène est plus particulièrement remarquable sur les zones rurales (pour les distances à l'exutoire comprises entre 6000 et 8000 m, et pour les distances supérieures à 11000 m).

6.2.2) Le profil en long généralisé

Le profil en long généralisé, discuté par Moussa (1991), permet d'étudier la distribution des pentes et d'avoir une représentation synthétique de la topographie du bassin versant. Chaque élément unitaire est représenté par son altitude en fonction de la distance à l'exutoire. Comme pour la fonction largeur, cette distance est la longueur de cheminement à travers du réseau hydrographique qui est unique pour chaque élément unitaire. Les points qui forment des segments bien marqués correspondent généralement aux thalwegs du bassin versant. Une variante de cette signature morphologique est de tracer uniquement les éléments du thalweg le plus long.

La figure 34 montre le profil en long du bassin versant de la Chézine selon l'approche mixte. Dans les deux cas, le thalweg le plus long (cours d'eau principal) est facilement visible. Sa pente est légèrement plus faible entre l'exutoire et une distance de 8000m de l'exutoire. A 16000m, elle augmente encore. Mais ces variations de pente restent faibles. Les pentes des thalwegs qui mènent vers le cours d'eau principal sont plus marquées mais elles varient très peu entre elles.

Les différences entre le profil en long de l'approche mixte et de l'approche objet « pur » sont minimales (Annexe 4).

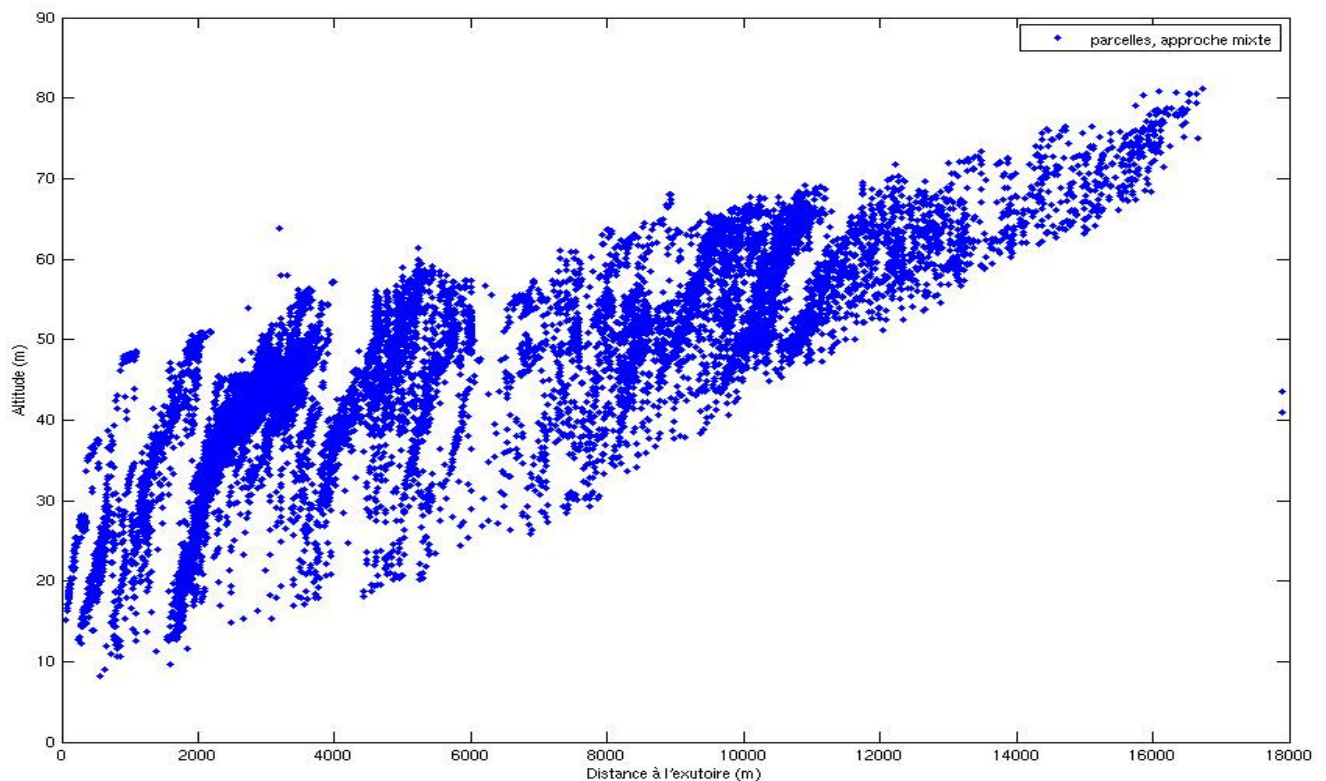


Fig.34 : Profil en long de l'approche mixte à l'échelle du bassin versant de la Chézine

6.3) Fonctions de transfert du bassin versant

La fonction de transfert a pour objet de transférer la pluie efficace qui est disponible pour le ruissellement de chaque élément unitaire en débit à l'exutoire du bassin versant. Dans l'approche géomorphologique, on prend en compte la forme du bassin versant pour calculer ce transfert. Le temps de parcours de l'eau pluviale de chaque élément unitaire est estimé, et dépend de la longueur totale du parcours de l'eau, des dimensions et de la forme de la section et de la pente de chaque tronçon parcouru. L'ensemble des temps de parcours de tous les éléments unitaires permet de déterminer la fonction de transfert qui représente le temps de parcours en fonction de la surface pondérée.

Le réseau hydrographique des trois approches élaborées est maintenant construit et étudié. Les caractéristiques des tronçons géométriques (longueur, pente et les dimensions de la section) nécessaires pour la fonction de transfert sont disponibles. Sous ces conditions, la fonction de transfert peut être calculée pour toutes les approches.

La fonction largeur donne déjà une bonne indication de la forme de la fonction de transfert, mais celle-ci dépend aussi de la vitesse d'écoulement (qui dépend de la dimension, de la nature du tronçon et de la pente) et également des surfaces contributives et de la fonction de production qui ne sera pas abordée dans le cadre de ce stage.

6.3.1) Calcul de la vitesse

Le modèle URBS calcule la vitesse à partir d'une section circulaire (cf chapitre 2.1.2.1) parce que ceci est la forme des tronçons d'assainissement en milieu urbain. Dans le milieu périurbain, les chemins de l'eau n'ont pas tous une section d'écoulement circulaire. Les cours d'eau naturels ainsi que les fossés le long des routes ont des sections irrégulières qui sont décrits par une forme trapézoïdale.

Dans le calcul de la vitesse d'écoulement, la forme intervient dans le paramètre R_h , le rayon hydraulique qui est défini par :

$$R_h = \frac{\text{Section mouillée}}{\text{Périmètre mouillée}} \quad (4.1)$$

Pour une section circulaire (comme utilisée dans le modèle URBS), il est obtenu par :

$$R_h = \frac{R}{2} \left(1 + \frac{\sin \theta \cos \theta}{\pi - \theta} \right) \quad (4.2)$$

où R est le rayon de la section montrée par la figure 35, θ est l'angle du taux de remplissage indiqué également dans figure 35.

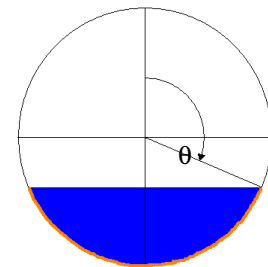


Fig.35 : En bleu : section mouillée, en rouge : périmètre mouillée

Pour le profil trapézoïdal (pour décrire la forme de la section des cours d'eau naturels et des fossés) avec une pente des berges de 45° , le rayon hydraulique est défini comme suit :

$$R_h = \frac{L \times h}{L + 2h\sqrt{2}} \quad (7)$$

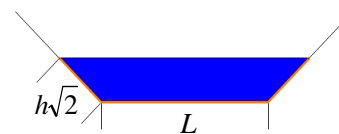


Fig.36 : En bleu : section mouillée, en rouge : périmètre mouillée

Après une étude de sensibilité de la vitesse en fonction de la hauteur pour comparer ces deux formules pour un rayon hydraulique équivalent, on a décidé de continuer à travailler avec un profil circulaire (Annexe 3).

6.3.2) Résultats de la fonction de transfert

Les fonctions de transfert présentées par la suite sont calculées en prenant en compte la surface totale des parcelles comme surface contributive. En abscisse Y figure la surface normalisée par la surface totale de la zone étudiée.

La figure 37 montre une superposition des fonctions de transfert des trois approches appliquées sur la zone amont de Sautron. En comparant cette superposition avec celle des fonctions largeurs, certaines différences peuvent être notées. Les fonctions largeur de cette zone (figure 30) croissent régulièrement et forment un pic qui se situe entre 2000 et 4000m de distance à l'exutoire, pendant que les fonctions de transfert (figure 37) croissent rapidement et possèdent une forme plus compacte. Dans la fonction largeur, la faible densité du réseau hydrographique dans la zone proche de l'exutoire fait baisser la courbe alors que dans la fonction de transfert, le nombre plus important des parcelles connectées à ces tronçons fait croître la courbe rapidement.

En comparant les fonctions de transfert des trois approches entre elles, on voit que les pics sont repartis d'une façon assez différente. La hauteur des pics dans l'approche objet « pur » varie entre 0.06 et 0.08 alors qu'elle varie entre 0.06 et 0.12 dans l'approche mixte et entre 0.04 et 0.1 dans l'approche de validation. La raison pour ces différences est le choix de cheminements de l'eau pluviale à travers les parcelles et le réseau hydrographique qui dépend de l'objet utilisé. Cette zone d'étude ne semble pas assez grande pour visualiser de façon claire la morphologie du sous-bassin dans la fonction de transfert.

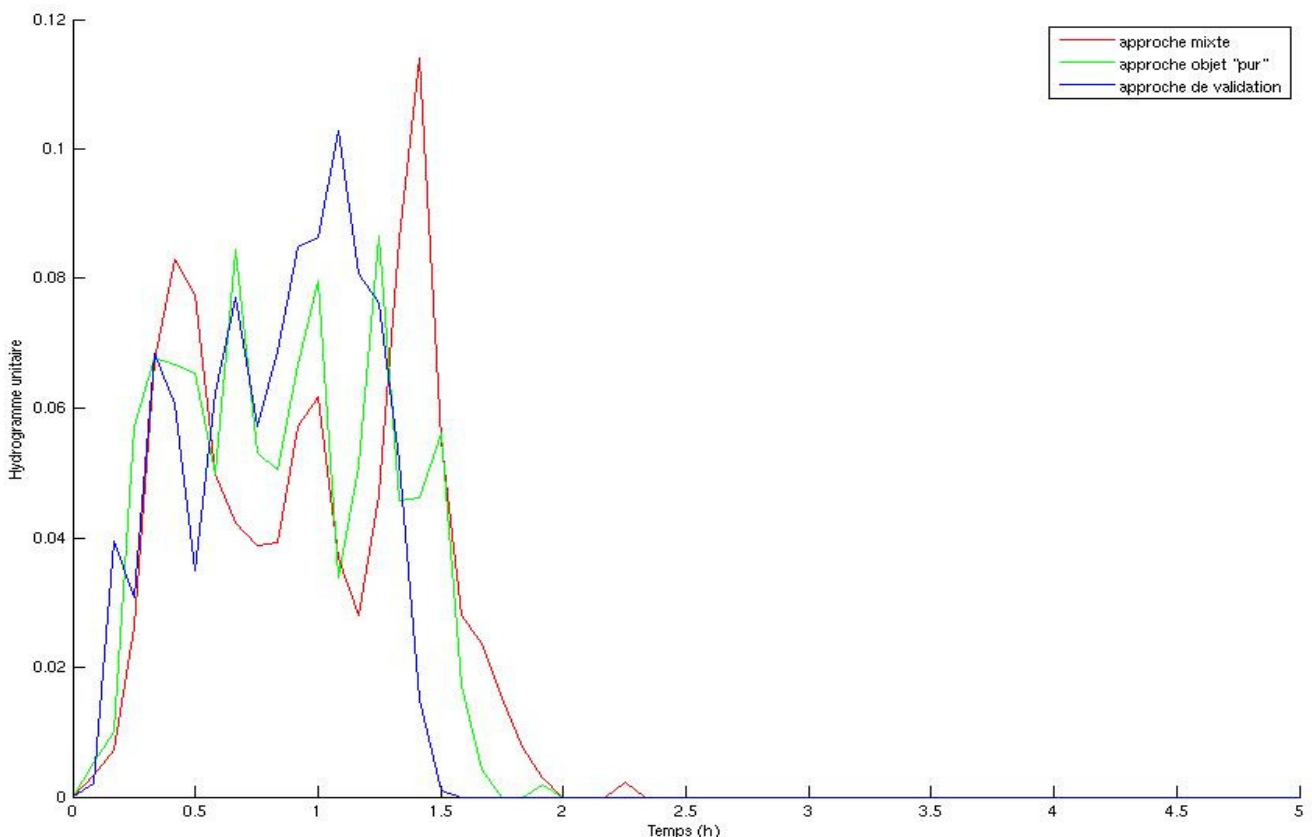


Fig.37 : Fonction de transfert des trois approches appliquées à la zone en amont de Sautron

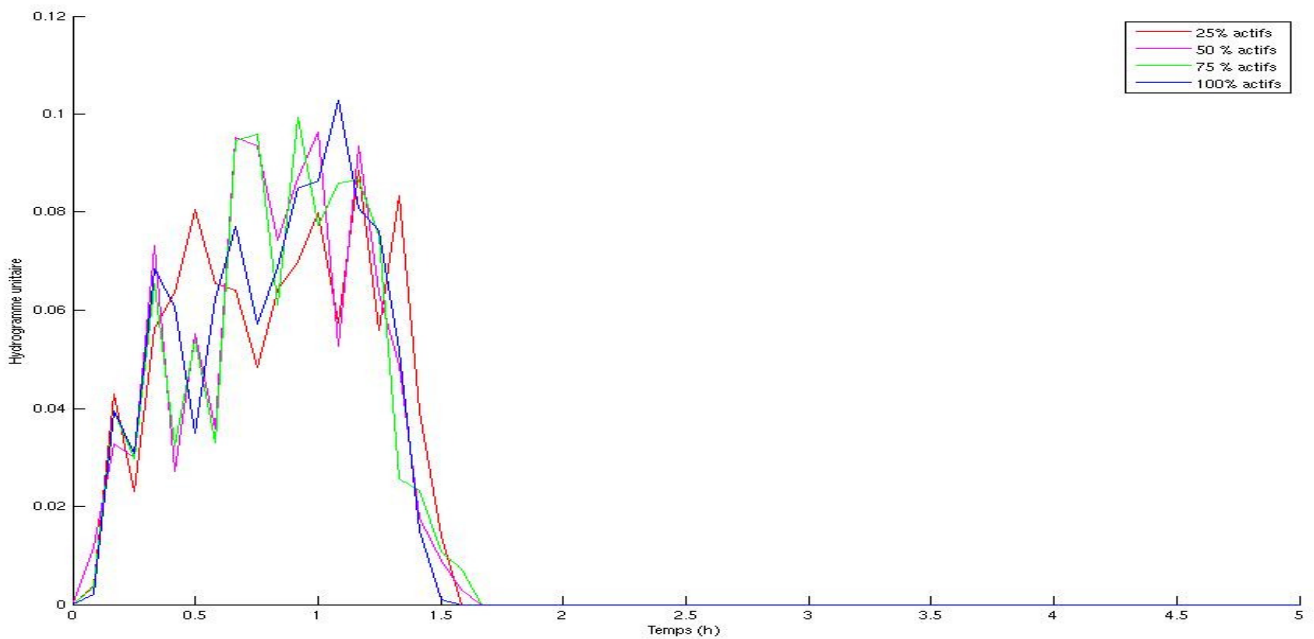


Fig.38 : Fonction de transfert de l’approche de validation en variant le taux de fossés actifs

La figure 38 montre la superposition des différents taux de fossés actifs de l’approche de validation. Comme pour la comparaison des trois approches principales (objet « pur », validation, mixte), les courbes sont plus homogènes que celles des fonctions largeurs. Avec une connexion de parcelles en fonction de la topographie, la différence entre les fonctions de transfert à différent taux d’activités des fossés est dans le cas présent moins important.

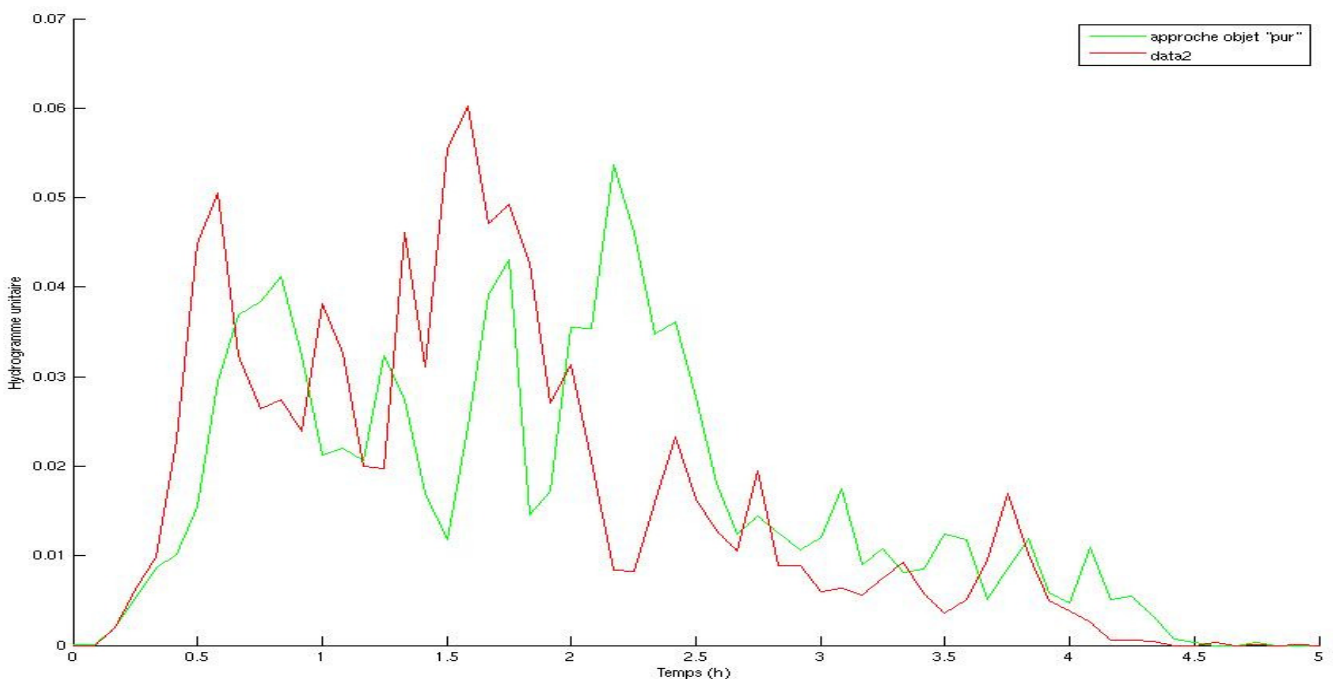


Fig.39 : Fonction de transfert de l’approche mixte et objet « pur » appliquées sur le bassin versant de la Chézine

La figure 39 qui représente une superposition des fonctions de transfert des approches mixte et objet « pur » à l'échelle du bassin versant de la Chézine, montre un décalage entre ces deux courbes. Les deux approches indiquent un temps de parcours maximum, ou temps de concentration du bassin versant, d'environ 4h 30 min. La valeur maximum des pics est similaire, elle est située entre 0.05 et 0.06, mais les pics ne se produisent pas forcément au même instant. L'approche mixte indique deux pics principaux à 30 min et 1h 20 min. L'approche objet pur indique plusieurs pics, situés à 50 min, 1h 20 min et 2h 15 min. On remarque aussi des différences dans la distribution des pics des deux approches. Ces différences sont liées aux choix de cheminement de l'eau qui résulte du choix de l'objet utilisé. Dans l'approche objet « pur », l'eau emprunte un chemin erroné qui passe à travers les tronçons d'assainissement qui longent la Chézine à la place de couler directement dans ce cours d'eau comme elle le fait dans l'approche mixte. La vitesse de ruissellement dans ces tronçons d'assainissement est nettement inférieure parce que son diamètre mesure un tiers du diamètre du cours d'eau parallèle. Une différente répartition des pentes ou une rugosité différente peut également avoir des influences plus ou moins fortes sur le temps de parcours.

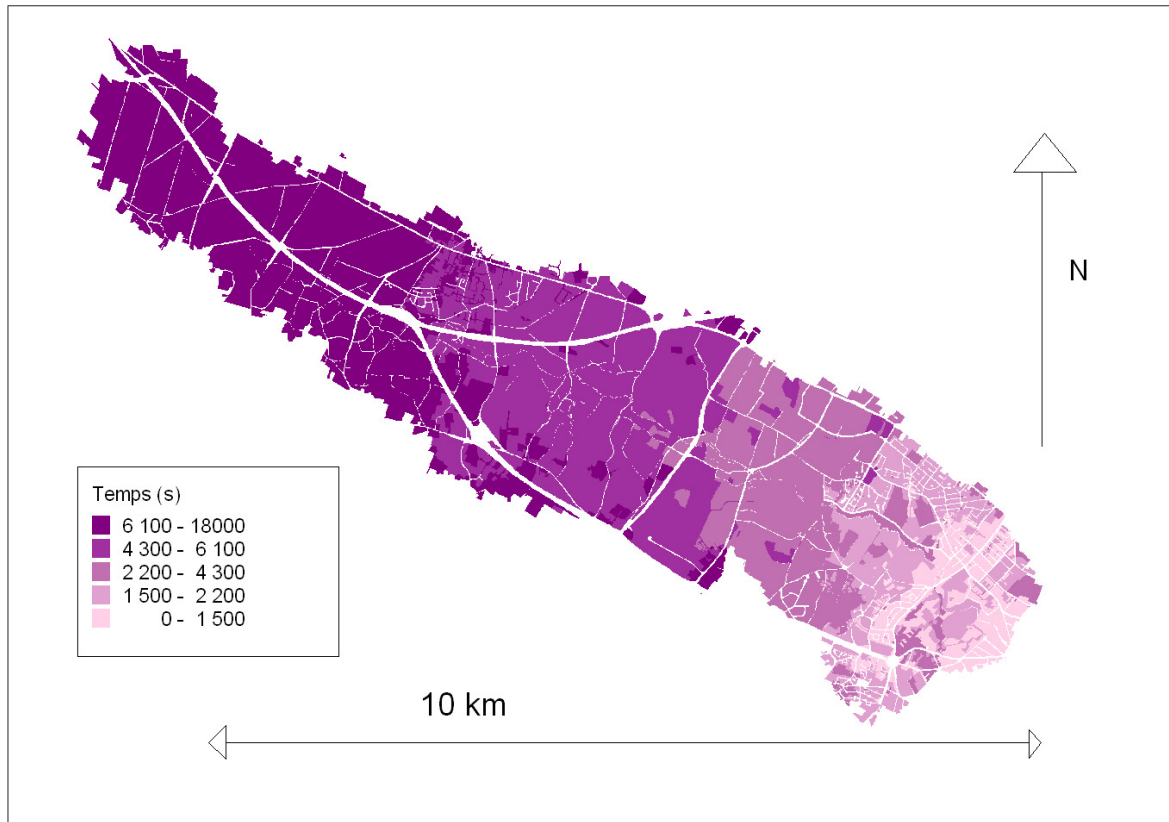


Fig.40 : Courbes isochrones à l'échelle du bassin versant selon l'approche mixte

6.3.3) Résultats de la fonction de transfert calculée pour les surfaces imperméabilisées

En traçant la fonction de transfert uniquement pour les surfaces imperméables, on considère que le ruissellement rapide se produit uniquement à ces surfaces-ci. Cette hypothèse rend les pics dans les zones urbaines encore plus marqués comme on aperçoit dans les figures 41 et 42. La fonction de transfert des surfaces imperméabilisées a été tracée uniquement pour le bassin versant entier parce que la zone amont de Sautron ne possède pas de zone urbanisée.

L'importance des surfaces imperméabilisées se mesure par le coefficient d'imperméabilisation qui est donné par :

$$C_{imp} = \frac{Surface_impermeabilisee}{Surface_totale}$$

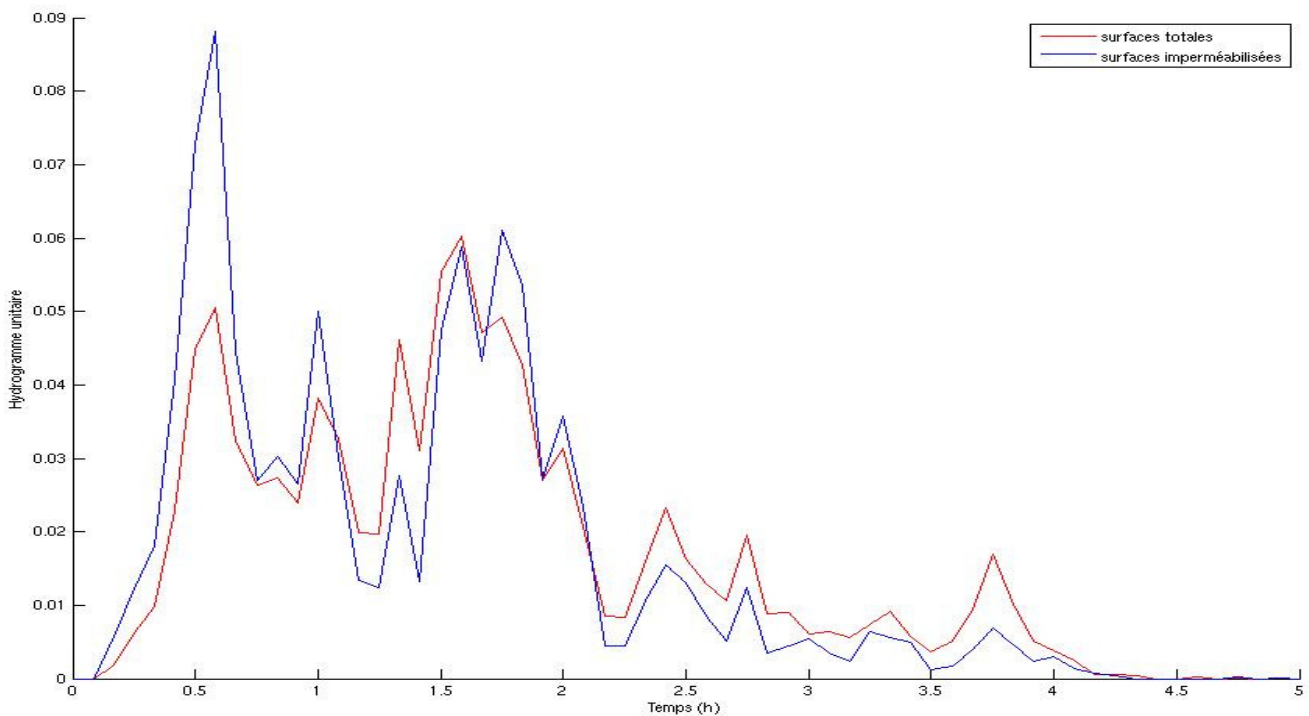


Fig.41 : Superposition de la fonction de transfert des surfaces totales avec celle des surfaces imperméabilisées à l'échelle du bassin versant selon l'approche mixte.

La fonction de transfert des surfaces imperméabilisées (fig. 41) dépasse la fonction de transfert des surfaces totales entre 0 et 1h et entre 1h45 et 2h15. Ces deux pics correspondent aux réponses des zones urbaines qui sont caractérisée par un coefficient d'imperméabilisation important. Ces deux courbes possèdent la même longueur. Ce fait peut paraître surprenant si on sait qu'à partir de 2h15, la courbe correspond à la réponse d'un milieu strictement rural. En revanche, si on observe la répartition du coefficient d'imperméabilisation (fig. 43), on s'aperçoit que la surface imperméabilisée de la voie rapide est non négligeable.

En ce qui concerne la superposition de ces deux courbes de l'approche objet « pur » (fig.42), les dépassements des pics « urbains » se situent entre 30 min et 1h 30, et entre 2h15

et 2h30. La réponse de la zone rurale, qui est également marquée par la présence de la voie rapide, commence à 2h30.

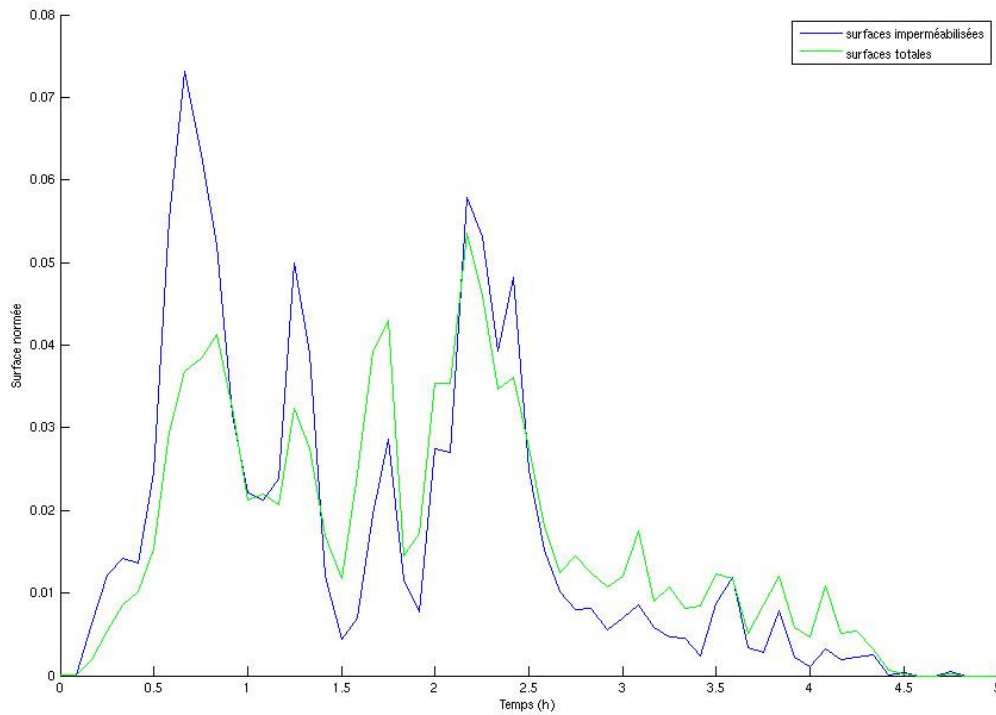


Fig.42 : Superposition de la fonction de transfert des surfaces totales avec celle des surfaces imperméabilisées à l'échelle du bassin versant selon l'approche objet.

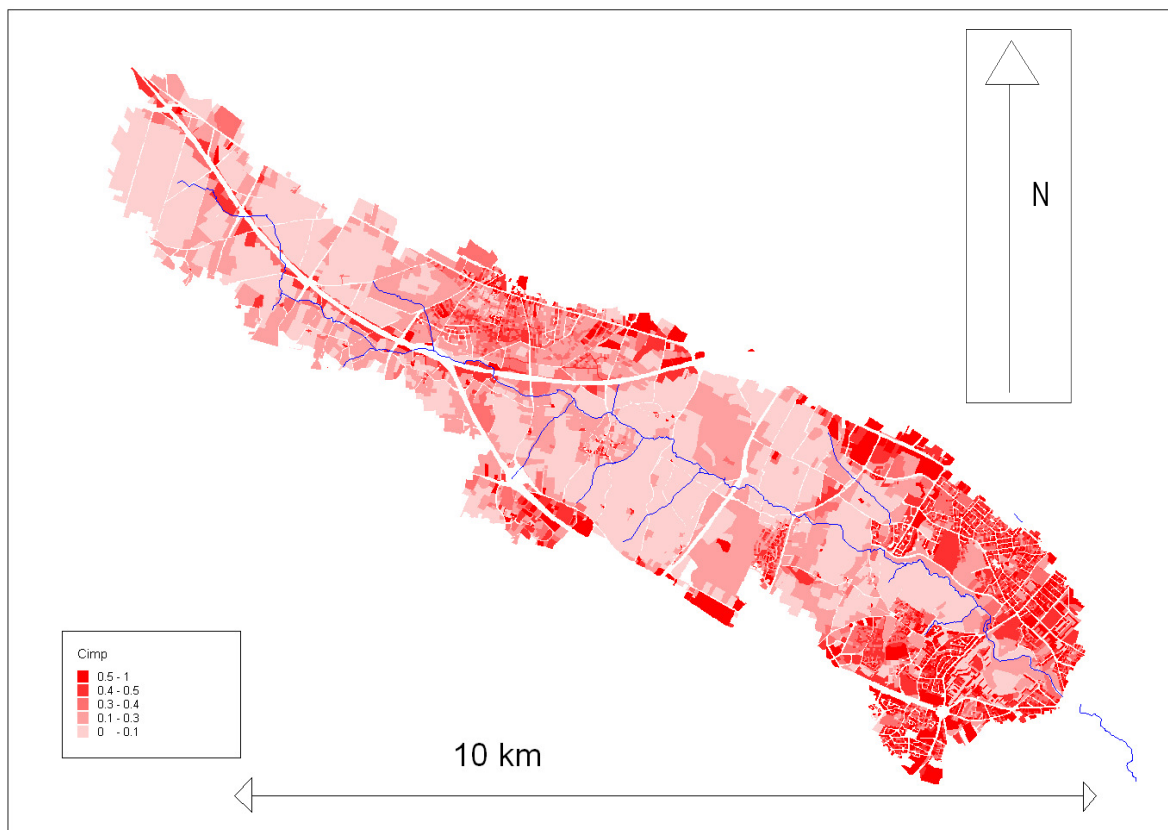


Fig.43 : Coefficient d'imperméabilisation des parcelles du bassin versant de la Chézine

6.3.4) Comparaison de l'hydrogramme unitaire avec des données de pluie

La validation de l'hydrogramme unitaire déduit de l'analyse de la morphologie du réseau hydrographique n'est pas évidente à faire sur des bassins versants ruraux. Une méthode classique consiste à estimer un hydrogramme unitaire à partir de données hydrologiques observées de pluie et de débit. Par exemple, certains travaux de recherche ont montré que l'hydrogramme unitaire pouvait être validé en estimant une fonction de transfert observée par la méthode de la DPFT (Rodriguez et al., 2003). Mais l'estimation d'une fonction de transfert « observée » semble pour l'instant difficile sur ce bassin versant de la Chézine, et il a été choisi de comparer qualitativement les résultats obtenus pour cette fonction de transfert déduite de la morphologie du bassin versant, avec un événement pluvieux représentatif. Cet événement pluvieux a été choisi avec des conditions météorologiques particulières : c'est un événement qui a lieu au sein d'une période sèche, et défini comme un événement d'état hydrique sec (Furusho 2008).

Un événement d'état hydrique sec est indiqué sur la figure 40. La forme de l'hydrogramme unitaire des deux approches qui ont été appliquées à l'échelle du bassin versant correspond bien à la forme de cet événement pluvieux. Le premier pic arrive environ en même temps dans cet événement pluvieux et dans la fonction de transfert simulé dans l'approche objet « pur ». Ce pic correspond à la zone rurale Nantaise. Le reste du bassin versant répond plus tôt dans l'hydrogramme unitaire de l'approche objet « pur » que dans l'événement pluvial choisi. Dans l'approche mixte le bassin versant entier réagit encore plus vite à la pluie efficace que dans l'approche objet « pur ».

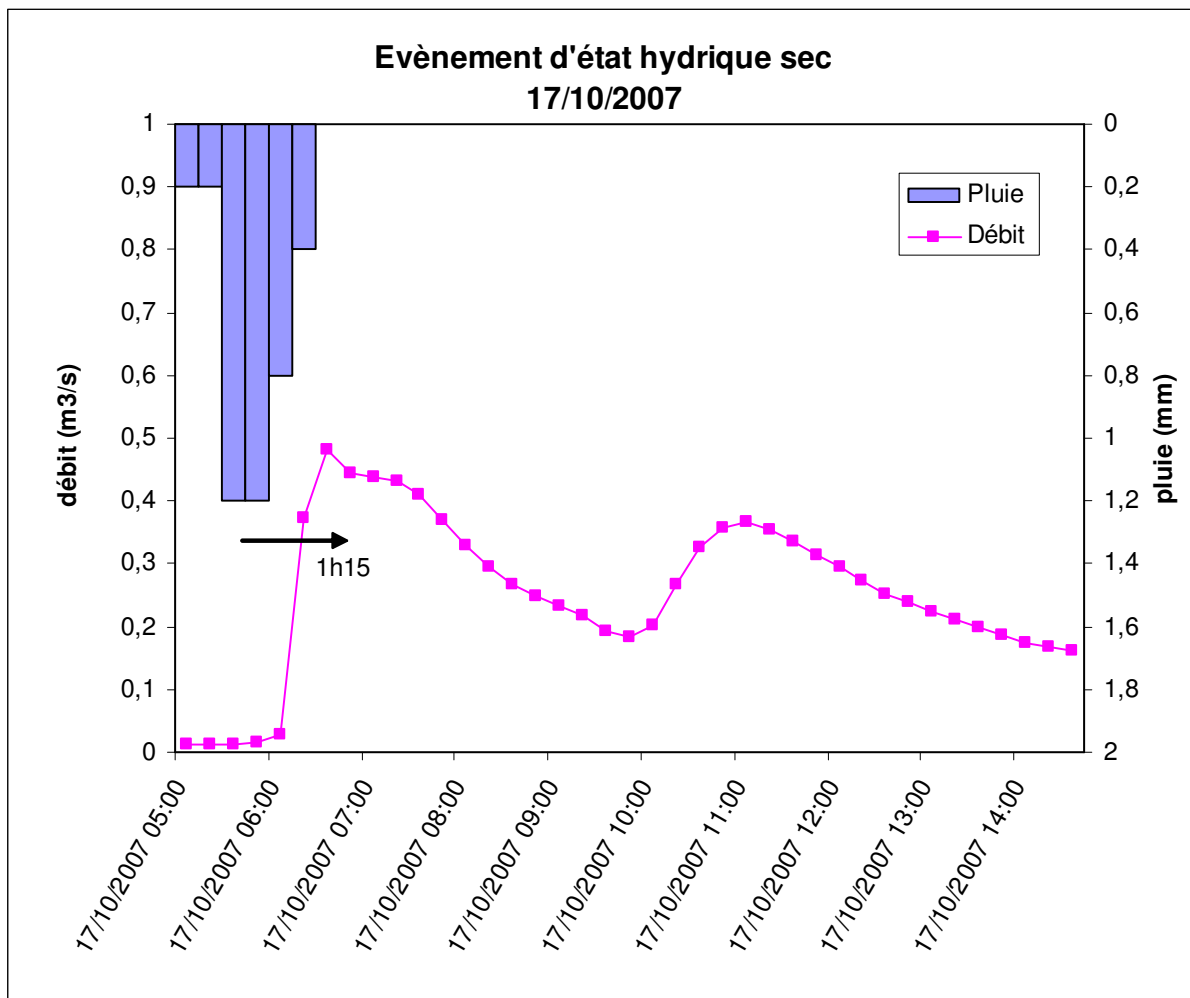


Fig.44 : Evènement pluvieux d'état hydrique sec qui correspond à une pluie efficace

7) Conclusion et Perspectives

Intégré dans le projet AVuPUR, ce travail s'intègre aux recherches menées en hydrologie sur le comportement hydrologique des espaces périurbains et propose de déterminer le réseau hydrographique en milieu périurbain à l'aide de données géographiques classiques. Un travail préalable a été réalisé pour améliorer la qualité des données géographiques nécessaires à la mise en œuvre de la modélisation hydrologique. Les premiers chapitres de ce rapport se concentrent sur la création et le traitement des données. Des données relatives aux chemins de l'eau sur le bassin versant périurbain ont été digitalisées à partir d'observations faites sur le terrain. Les données issues des banques des données urbaines étaient incomplètes et erronées. Plusieurs traitements automatiques ont été développés pendant ce stage pour traiter les problèmes rencontrés.

Trois approches ont été mises en œuvre pour segmenter l'espace étudié à partir de données vectorielles. La première utilise les fossés digitalisés et le cours d'eau issu des banques de données urbaines (BD Topo) (approche de validation). Deux autres approches combinent des données de cours d'eau avec des données de route pour reconstituer le réseau hydrographique ; la route est dans ce cas considérée comme un chemin d'écoulement préférentiel. On appelle approche objet « pur », l'approche qui utilise le cours d'eau issu de la BD Topo et approche mixte, l'approche qui utilise un cours d'eau avec une densité élevée, obtenu par traitement MNT. Le réseau hydrographique périurbain a été déterminé selon ces trois approches par des méthodes automatiques intégrées à un SIG. Des améliorations ont été apportées à ces méthodes afin de prendre en compte les spécificités du milieu périurbain. Ces approches sont comparées à deux échelles : à l'échelle de la zone où on dispose de toutes les données (zone amont de Sautron), on étudie les trois approches, à l'échelle du bassin versant de la Chézine on compare les approches objet « pur » et mixte. La comparaison de ces approches s'appuie sur la détermination de signatures morphologiques – la fonction largeur et le profil en long- ainsi que sur la fonction de transfert déduite des données géographiques.

Les différentes approches montrent des différences plus ou moins marquées qui dépendent en général du choix des objets utilisés pour décrire le réseau hydrographique. En utilisant différentes sources de données, le cheminement de l'eau pluviale à travers les parcelles et les tronçons du réseau hydrographique est différent. L'approche objet « pur » permet de reconstituer le réseau hydrographique en trouvant une densité de réseau similaire à celle de l'approche de validation, mais les objets et leur localisation ne sont pas les mêmes dans le cas présent. L'approche mixte reconstitue presque la totalité des objets utilisés dans l'approche de validation, mais le nombre total des tronçons et la densité du réseau hydrographique sont plus élevés. Cette densité élevée ne permet pourtant pas de représenter de façon réaliste le réseau des fossés et cours d'eau qui contribuent réellement au ruissellement, mais elle permet de décrire le comportement hydrologique du bassin versant de façon détaillée. Les différences observées sur les différentes signatures morphologiques et dans les fonctions de transfert ne sont pas seulement visibles à l'échelle de la zone amont de Sautron, ce qui aurait pu être du à sa petite taille, mais aussi à l'échelle du bassin versant entier : on observe un décalage de 30 min à certains endroits entre la fonction de transfert de l'approche mixte et celle de l'approche objet « pur ». Ce décalage est lié à un cheminement différent dans les deux approches à proximité de l'exutoire.

La fonction de transfert représente une réponse hydrologique impulsionnelle, qui peut être assimilée, sous certaines conditions, à la réponse du bassin lors d'un événement orageux court et intense. Sur le bassin versant de la Chézine, une comparaison avec un événement

pluvieux de courte durée et typique de conditions climatiques sèches pour ce bassin versant a été réalisée. Elle montre une forme assez similaire à celles obtenues par les fonctions de transfert, mais les pics des fonctions de transfert sont plus rapides par rapport à ceux de l'événement pluvieux. L'approche objet «pur» semble la plus proche de l'événement pluvieux en ce qui concerne la synchronisation des pics. Toutefois, cette comparaison est simplement qualitative, car la fonction de transfert ne représente que les processus d'écoulement de surface du ruissellement produit par les surfaces contributives. Une modélisation hydrologique complète utilisant la fonction de production serait nécessaire pour mieux valider cette démarche de modélisation. Ce travail sera réalisé dans la suite du projet AVuPUR. Une autre piste de travail consisterait à faire varier l'activité des chemins de l'eau en fonction de l'état hydrique du sol, pour compléter la fonction de transfert basée sur l'approche mixte. Cela permettrait de prendre en compte les interactions entre les processus de production et de transfert. Cela pourrait être fait en faisant varier le taux de tronçons d'affluents qui contribuent activement au ruissellement, similairement à l'étude de l'activité des fossés faite pour l'approche de validation (cf chapitre 5.5) : par exemple on pourrait considérer que le taux de tronçons « actif » varie en fonction de la surface contributive amont ou en fonction de la distance d'écoulement jusqu'au cours d'eau principal.

La prise en compte des chemins de l'eau observés sur le terrain, et en particulier des fossés semblait a priori utile pour valider l'utilisation de données géographiques classiques (routes, cours d'eau) en ce qui concerne la construction du réseau hydrographique. Cependant, la création de ces informations relatives aux fossés est coûteuse et n'est pas toujours la plus pertinente : ces données ne peuvent pas renseigner avec sûreté sur le cheminement de l'eau lors de n'importe quel événement pluvieux. Les observations faites sur le terrain sont en effet valables pour des conditions météorologiques données et pour un entretien des fossés donné. Un grand nombre de fossés étaient partiellement ou entièrement obstrués lors des relevés faits sur la zone rurale. Certains d'entre eux sont peut-être entretenus régulièrement, certains sont bouchés plus rapidement, mais les pratiques d'entretien peuvent être très variables dans le temps et dans l'espace : cet entretien est parfois réalisé par les agriculteurs, mais aussi par les services techniques chargés de la voirie. Un premier test de sensibilité a été réalisé en ce qui concerne cet entretien, mais il pourrait être complété pour montrer l'influence potentielle de cet entretien sur le comportement hydrologique.

Bibliographie

- Gupta, V., Waymire, E. and Wang, C., (1980). *A representation of an Instantaneous Unit Hydrograph From Geomorphology*. Water resources research, 16(5), 855-862.
- Furusho, C. (2008), *Etude du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant périurbain: La Chézine*, Thèse de Master 2 de Recherche, Laboratoire des Ponts et Chaussées, 69p.
- Rodriguez-Iturbe, I. et Valdes, J., (1979). *The geomorphologic structure of Hydrologic Response*. Water Resources Research, 15(6), 1409-1420.
- Rodriguez-Iturbe, I et Rinaldo A.(1997). *Fractal river basins – chance and self-organization*, Press syndicate of the university of Cambridge, Cambridge UK, 547p.
- Rodriguez F. (1999) *Intérêt des banques de données urbaines pour l'analyse hydrologique. Détermination de la fonction de transfert d'un bassin versant urbain*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 197 pages.
- Rodriguez F., Andrieu H., Creutin J.D. (2003a), *Surface runoff in urban catchments: morphological identification of unit hydrographs from urban databanks*. Journal of Hydrology, 283 (1-4), 146-168.
- Rodriguez, F. et Andrieu, H., (2003b). *Intérêt des banques de données urbaines pour une analyse morphologique de bassins versants urbains*, Journées des Sciences de l'Ingénieur, Dourdan (France).
- Moussa R (1991) *Variabilité spatio-temporelle et modélisation spatialisée. Application au bassin du Gardon d'Anduze* Thèse de doctorat, Université de Montpellier II 37-60
- Morena F. (2003) *Modélisation hydrologique distribuée en milieu urbain. Représentation du processus de production et développement du modèle URBS*, Thèse de doctorat, Laboratoire Centrale de Ponts et des Chaussées de Nantes
- Karvonen T. et al. (1999), *A hydrological model for predicting runoff from different land use areas*, Journal of Hydrology 253-265
- Priou (2005), *Etude hydrologique d'un bassin versant périurbain*, rapport de stage, Laboratoire Centrale de Ponts et des Chaussées de Nantes, 33p
- DHI et Biotope (2005) *Etude préalable à la restauration et à la mise en valeur de la vallée de la Chézine – Tome 1 : Etat des lieux*. 105p
- Gironás J., Andrieu H., Roesner L. (2007), *Approche morphologique: modifications des bassins naturels dues à l'urbanisation*, Novatech 2007, Lyon, France Tome 3, pp.1199-1206

ANNEXE 1 - Association des cotes aux coordonnées x,y

Pour un tiers des tronçons de l'assainissement, les cotes du radier (coordonnées z) étaient connues et les coordonnées x,y ont été calculées. Pour utiliser toutes ces données, l'association entre les cotes du radier et les coordonnées x,y a du être faite et cela a été réalisé grâce à un traitement automatique.

Les traitements préalables ont corrigé les tronçons pour qu'ils soient tous connectés par leurs extrémités. Tous les tronçons ont deux cotes différentes, la plus haute est identifiée comme la cote amont et l'autre comme la cote aval. Dans un premier temps toutes les intersections sont identifiées à partir des coordonnées x,y des tronçons. On choisit ensuite toutes les intersections où uniquement deux tronçons se touchent et étudie les valeurs de leurs cotes (Figure 1.A). Si l'amont du tronçon A est supérieur à l'aval de tronçon B et l'aval de tronçon A et supérieur ou égal à l'amont du tronçon B, le tronçon A est supposé être l'amont et sa cote aval est associée aux coordonnées de l'extrémité qui se situe à l'intersection. Si ce n'est pas le cas, sa cote aval est associée aux coordonnées de l'autre extrémité de ce tronçon. Après avoir fait cette première association, les cotes de ces deux tronçons peuvent être associées aux coordonnées correspondantes.

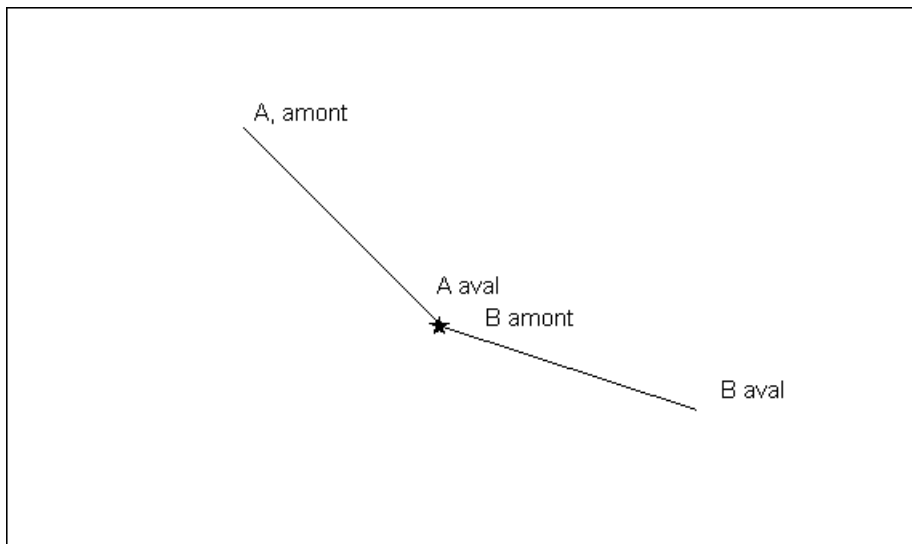


Fig.1A : Exemple de deux tronçons A et B qui forment une intersection de deux tronçons.

Tous les tronçons qui font partie d'une intersection de deux tronçons sont traités ainsi. On cherche ensuite les tronçons qui n'ont pas encore été traités et on sélectionne toutes les intersections de trois tronçons. Ces trois tronçons sont comparés deux par deux comme s'il s'agissait d'une intersection de deux tronçons.

Dans le cas présent, seulement 10% de tronçons ne sont pas traités après cette étape. Le traitement aurait pu être amélioré mais pour la continuation du stage, il était préférable de les traiter manuellement. L'amélioration du traitement automatique aurait pris plus de temps qu'un traitement manuel pour ces tronçons non traités.

ANNEXE 2 - Découpage des tronçons

Pour la modélisation, les tronçons des chemins d'eau doivent être connectés à leurs extrémités. Pour cette raison, les tronçons qui se croisent posaient un problème. Ces tronçons ont du être identifiés, découpés et renommés. Le premier programme de découpage était créé ainsi. Plus tard, nous avons décidé d'élargir ce programme aux traitements de deux tables différentes dont les tronçons qui s'intersectent sont découpés : cela a permis de résoudre le problème de création de connexions correctes entre deux tables (par exemple la table de la voirie et celle des cours d'eau).

Ce programme de découpage a du prendre en compte qu'après chaque découpage, l'identifiant de l'objet dans la table des tronçons pose problème. Un objet qui est long peut être intersecté plusieurs fois. Après le premier découpage, il faut affecter au nouvel objet un identifiant différent de l'objet d'origine afin de pouvoir les distinguer. Par conséquent, l'intersection suivante doit être redéfinie en raison de ce changement d'identifiant.

Concernant les changements de la table, ce traitement génère un problème, avec l'augmentation du nombre n d'éléments, à chaque fois qu'un élément est découpé. Une double boucle a permis de résoudre ce problème.

Dans cette boucle

- le programme identifie l'élément intersecté et l'élément qui intersecte,
- il découpe l'élément
- il renomme les objets obtenus
- il recalcule les coordonnées importantes pour l'identification des intersections à découpées

Un autre point qui a été difficile à traiter était l'imprécision du découpage. Par la fonction utilisée (découpage par polygone), certains éléments ont été découpés de façon très approximative. Une autre fonction de découpage (découpage par point) a été essayée, mais elle n'a pas résolu le problème d'imprécision. Comme cette deuxième fonction était plus facile à mettre en œuvre, elle a été choisie dans ce traitement. Ces objets à corriger ont du être à nouveau identifiés et corrigés pour pouvoir être découpés ensuite.

Après le découpage, il arrive que certains objets soient dupliqués. Les doublons ont donc été supprimés.

Certains découpages créent des objets point qui sont gênants pour des programmes utilisés par la suite. Ces objets ont du être effacés par une méthode similaire.

ANNEXE 3 - Etude de sensibilité pour le calcul de la vitesse dans la fonction de transfert

La méthode d'estimation de la fonction de transfert est basée sur une estimation des vitesses de ruissellement dans des canalisations circulaires. Comme les fossés sont de forme rectangulaire ou trapézoïdale, une comparaison a été faite entre le calcul des vitesses dans des sections de différentes formes. Pour les cours d'eau et les fossés où une largeur moyenne est connue, un diamètre approximatif pour un rayon hydraulique équivalent a été calculé en multipliant la largeur moyenne par un coefficient de 0.94. Ce coefficient est le résultat d'une étude de sensibilité de la vitesse dans la zone $0 < h < 1\text{m}$ avec une largeur donnée de 0.8m (fig.2A et 3A). Il a été estimé en comparant les résultats de vitesse à partir de la largeur moyenne (calculé en prenant en compte une section trapézoïdale), avec un diamètre équivalent, obtenu par une multiplication par un coefficient, (calculé en prenant en compte une section circulaire) à l'aide de l'erreur relative de l'estimation de la vitesse.

L'erreur relative permet d'estimer le biais du graphe :

$$\text{Erreur relative} = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n D_{sim}(i) - \sum_{i=1}^n D_{ref}(i)}{\sum_{i=1}^n D_{ref}(i)} \quad (1A)$$

Dans le cas présent,

$D_{ref}(i)$ est la donnée de vitesse de référence dans la zone de 0 à 1m pour une section trapézoïdale,

$D_{sim}(i)$ est la donnée de vitesse simulée dans la zone de 0 à 1m pour une section circulaire avec un diamètre équivalent),

i et n dépendent de la précision de l'analyse.

La figure 2A montre l'erreur relative des vitesses tracée pour des diamètres équivalents obtenus en multipliant la largeur moyenne par un coefficient de 0,5; 0,75; 0,94; 1; 1,5; 2; 2,5 et 3. La valeur du coefficient qui génère l'erreur relative le plus faible est visiblement 0,94. Si on multiplie ce coefficient avec une largeur moyenne de 0,8m (pour donner un exemple) pour obtenir un diamètre équivalent, on peut calculer la vitesse v pour les deux valeurs. v est calculé par la formule du profil trapézoïdal pour la valeur de référence (largeur de 0,8m) et par la formule du profil circulaire pour la valeur du diamètre équivalent ($0,8 \cdot 0,94$). La vitesse est tracée dans la figure 3A pour les deux méthodes dans l'intervalle de 0 à 1m.

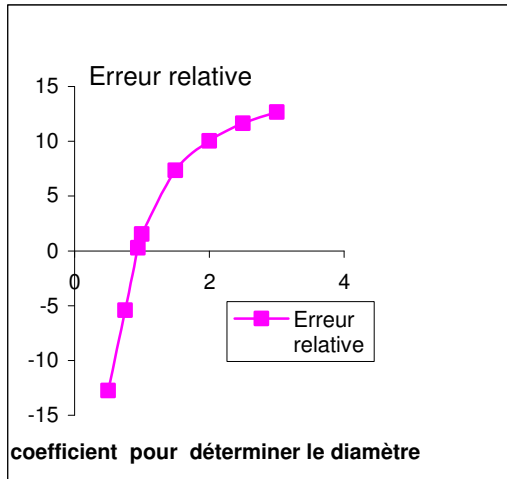


Fig.2A : Erreur relative des vitesses obtenu pour une forme circulaire et trapézoïdale à un rayon hydraulique équivalent

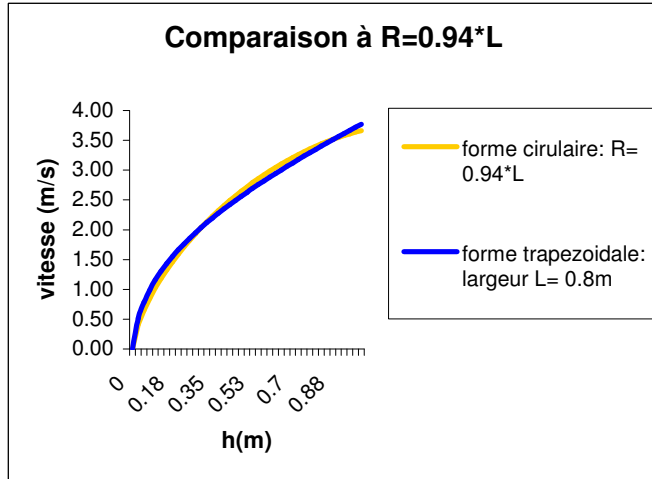


Fig.3A : Comparaison du profil des vitesses obtenu pour une forme circulaire et trapézoïdale à un rayon hydraulique équivalent.

ANNEXE 4 - Profil en long de l'approche objet « pur »

Comme mentionné dans le chapitre 6.2.2, les différences entre le profil en long de l'approche mixte et de l'approche objet « pur » sont minimales.

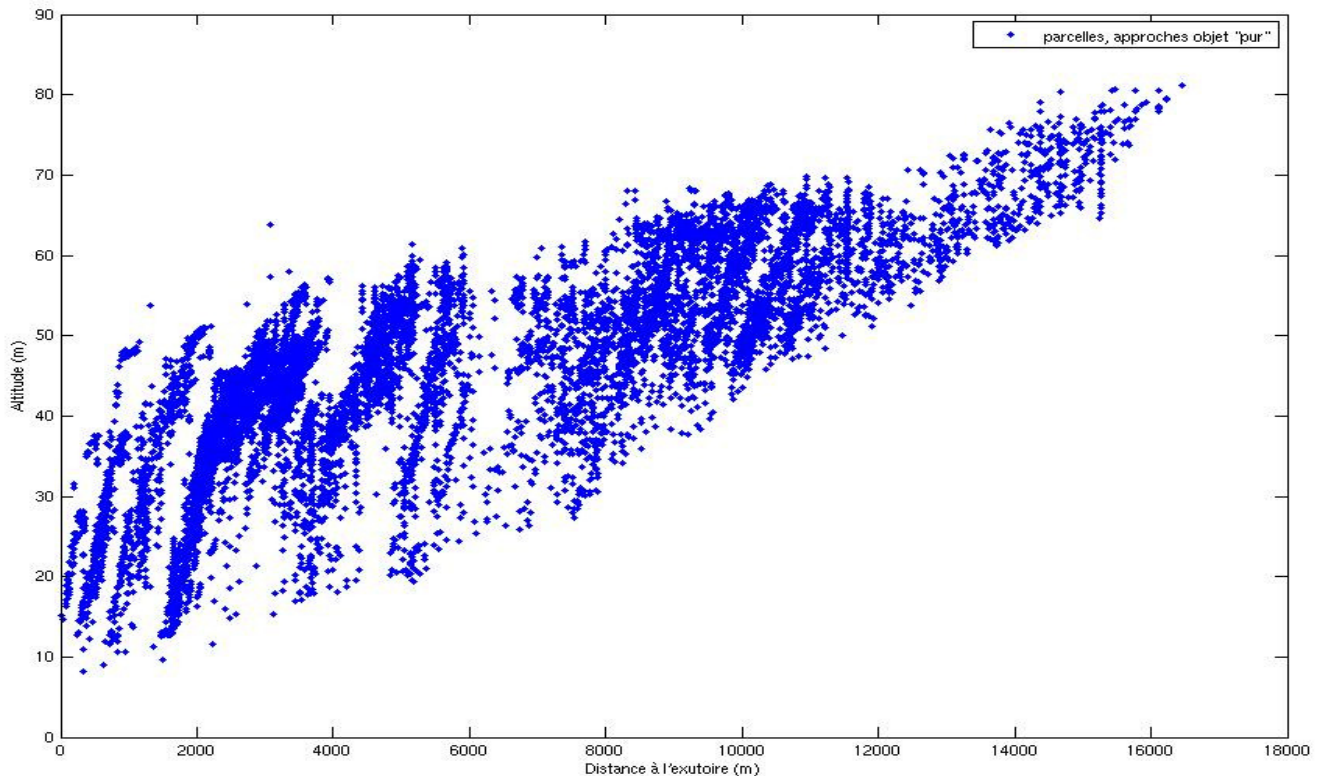


Fig.34 : Profil en long de l'approche objet « pur » à l'échelle du bassin versant de la Chézine