



HAL
open science

Étude du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant périurbain : la Chézine

Carina Furusho-Percot

► **To cite this version:**

Carina Furusho-Percot. Étude du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant périurbain : la Chézine. Hydrologie. 2008. dumas-00473150

HAL Id: dumas-00473150

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00473150>

Submitted on 14 Apr 2010

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 2007/ 2008.

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'École Supérieure d'Architecture de Nantes,
l'Université de Nantes***

Présentée et soutenue par :

CARINA YUMI FURUSHO

Le 04 septembre 2008

À l'École Centrale de Nantes

TITRE

**ETUDE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'UN BASSIN VERSANT
PERIURBAIN : LA CHEZINE**

JURY

Président :	Jean-François Sini	Professeur à l'ECN
Examineurs :	Hervé Andrieu Katia Chancibault Fabrice Rodriguez Patrice Mestayer Jean-Michel Rosant	Chef de division au LCPC Chargée de recherche au LCPC Chargé de recherche au LCPC Directeur de recherche à l'ECN Chargé de recherche à l'ECN

Directeur de mémoire : Hervé Andrieu
Laboratoire/Institution : Laboratoire Central de Ponts et Chaussées
Co-encadrant : Katia Chancibault

Résumé

Les bassins versants périurbains, présentant des comportements de bassins de type naturel et urbain, ont été jusqu'ici peu étudiés par les hydrologues. Or, ces bassins sont soumis à une forte pression, liée au développement des zones urbaines. Afin de mieux comprendre ces bassins, pour anticiper leur réponse lors d'évènements pluvieux intenses ou prévoir les conséquences de futurs aménagements, de nouveaux modèles doivent être développés.

Un modèle hydrologique est classiquement composé de deux parties : la fonction de production et la fonction de transfert. Cette étude porte plus spécifiquement sur la fonction de transfert en s'appuyant sur l'analyse de la réponse hydrologique du bassin versant de la Chézine. Notre objectif est de mettre en évidence l'influence de l'urbanisation sur la réponse hydrologique du bassin afin de la prendre en compte dans la fonction de transfert. Ainsi, nous montrons que l'imperméabilisation qui accompagne l'urbanisation conduit à un fonctionnement variant avec l'état hydrique du bassin.

Construction de la fonction de transfert.

La modélisation est réalisée par l'intermédiaire d'un cheminement naturel des eaux gouverné par la gravité et guidé par la topographie. L'implémentation est faite à partir du MNT (Modèle Numérique de terrain) du bassin, avec une résolution de 20m. L'algorithme unidirectionnel baptisé D8 (« Deterministic eight neighbour », O'Callaghan et Mark, 1984), implémenté sur le logiciel OrbisGIS (Bocher et col), permet d'obtenir les distances de chaque maille du MNT jusqu'à l'exutoire. Les banques de données urbaines (voiries, bâtiments, etc.) sont utilisées pour estimer les surfaces imperméabilisées.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux évènements ayant eu lieu dans un contexte hydrique sec. On peut en effet admettre que compte-tenu des conditions hydriques du sol de la zone rurale, seules les zones imperméabilisées produisent du ruissellement. Nous avons donc essayé d'approcher la fonction de transfert pour ce sous-groupe d'évènements par la « width function », calculée à partir des seules mailles imperméabilisées du bassin, en appliquant différentes vitesses (versant, rivière, etc.).

Dans un contexte hydrique humide les zones rurales doivent être prises en compte. Si on suppose que le coefficient d'écoulement des zones urbaines est constant durant l'année, on peut alors estimer celui des zones rurales pour chaque évènement afin de connaître la part des surfaces saturées dans les zones rurales. Ces surfaces saturées sont localisées à l'aide de l'indice topographique défini par Kirkby (Beven & Kirkby, 1979) qui prend en compte la pente locale et la surface spécifique (l'aire contributive / la longueur du côté d'un pixel).

Les résultats confirment la pertinence des hypothèses initiales puisque les ruissellements simulés sont assez similaires aux débits observés. Les informations sur les principaux éléments qui influencent la fonction de transfert sont la contribution de ce travail préliminaire à la modélisation hydrologique complète adaptée aux bassins périurbains.

Mots-clés : bassin versant périurbain, fonction de transfert, modélisation pluie-débit, réseau de drainage, modèle de routage géomorphologique.

Discipline : hydrologie

Study of a Peri-Urban Catchment Transfer Function: Chézine Bassin

Due to the expansion of urbanization, peri-urban zones face a quick land-use change. The control over this development has become a major issue for flood and water pollution management. Nevertheless, peri-urban catchments have been ignored by both natural and urban hydrologists. So far we have no knowledge of a well adapted model to these particular basins.

Classically, hydrologic models are divided into a production function and a transfer function. Our work is focused on the transfer function study of the Chézine basin, a peri-urban catchment in the north-west of France.

The main objective of this work is to enhance our comprehension on the hydrologic response of the basin, based on the results of a careful rainfall-runoff database analysis. We have observed from this analysis that the catchment response is closely related to its moisture initial state. Therefore we have decided to study the transfer function separately, with a different approach according to its moisture initial state.

Transfer function study

The model is based on a natural water pathway guided by its topography and respecting the gravity law. Using a digital elevation model (DEM) with 20m resolution and the unidirectional D8 algorithm we have determined the distance of each pixel and to the outlet.

We admit that when the basin is practically dry, only impervious surfaces will contribute to the runoff flow. The width function is calculated for these impervious pixels. Urban database (routes, buildings, etc) were used to estimate impervious surfaces. We have then computed mean flow velocity according to the observed response time, which corresponds to the travel time from the dense part of the imperviousness function distribution.

When the basin is wetter, rural surfaces are saturated enough to take part in the runoff generation. Urban contribution is considered constant, so that we can compute rural contributive area by subtracting urban contribution from the total runoff coefficient observed. In order to localize them spatially we use the notion of topographic index (Beven & Kirkby, 1979), which is proportional to the contributing area to each pixel and decreases with its inclination.

Simulations show that the assumptions made herein are quite accurate since the transfer functions obtained generate good reproductions of the discharge variation in the outlet.

This work is the start point for the complete hydrologic model development adapted for peri-urban rivers. It provides a better understanding on the influence of key elements on the transfer function as the urbanization, morphology, flow velocity and soil saturation.

Key-words: peri-urban catchments, rainfall-runoff modelling, geographical information systems, drainage network, geomorphologic routing model

Avant Propos

Je tiens en premier lieu à remercier Katia Chancibault et Hervé Andrieu pour leurs conseils et leur aide précieuse tout au long de ces six mois.

Un grand merci à Marie-Laure Mosini pour avoir été présente à mes côtés pendant toute la durée du stage. Son aide quotidienne m'a beaucoup apporté.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à Fabrice Rodriguez, Laurent Lassabatère et Hervé Andrieu pour m'avoir introduite aux études d'hydrologie lors des cours à l'Ecole Centrale.

Merci à Erwan Bocher et Thomas Leduc pour la formation OrbisGIS et pour le support à l'utilisation du programme.

Merci également à Laurent Lebouc, Jean Marc Rouaud et Bernard Flahaut pour leur disponibilité et pour prendre le temps de m'amener sur le terrain, m'expliquer les données et les outils informatiques.

Je remercie l'ensemble du personnel de la Division Eau du LCPC pour la bonne ambiance quotidienne et spécialement l'équipe de stagiaires qui a beaucoup contribué à rendre ce séjour agréable.

Enfin un merci très spécial à Elisa, Carolina, Archie et bien sûr Gaston, Mme et M. Augier.

Sommaire

0 Introduction	6
1. Présentation du contexte du travail.....	8
1.1 La division Eau et Environnement du LCPC	8
1.2 Le projet « Assessing Vulnerability of Peri-urban Rivers » (AVuPUR)	10
1.3 Présentation du bassin étudié : La Chézine	13
1.3.1 Localisation	13
1.3.2 Relief et topographie	13
1.3.3 Hydrographie.....	14
1.3.4 Climat	16
1.3.5 Géologie et occupation du sol	17
1.4 Introduction à la modélisation hydrologique	20
1.4.1 Traitement du MNT	21
1.4.2 Fonction de production.....	23
1.4.3 Fonction de transfert.....	24
2 Analyse des données hydrologiques.....	29
2.1 Sources des données	29
2.1.1 Données pluviométriques	29
2.1.2 Données limnimétriques.....	29
2.2 Traitement des données	31
2.3 Caractéristiques des évènements pluvieux	35
2.4 Résultats	39
2.4.1 Coefficient d'écoulement évènementiel	39
2.4.2 Débit de base	43
3 Analyse géomorphologique.....	46
3.1 Traitement des données géo-référencées.....	46
3.2 Définition des mailles imperméabilisées du bassin versant	48
3.3 Analyse morphologique	49
4 Détermination des fonctions de transfert.....	52
4.1 Etude de la réponse du bassin en état hydrique sec.....	53
4.2 Etude de la réponse du bassin en état hydrique humide.....	58
5 Conclusion.....	63
Références bibliographiques	66

Introduction

Les espaces périurbains, ni totalement urbains, ni totalement ruraux, représentent de fait l'essentiel de la surface des grandes agglomérations urbaines. Avec l'urbanisation croissante, ces espaces sont et seront soumis à une pression de plus en plus forte et la maîtrise de leur développement et de leur aménagement est un enjeu important pour la gestion des eaux pluviales et des rejets polluants. Cependant, ces bassins versants périurbains ont été ignorés tant par les hydrologues du milieu naturel que du milieu urbain, probablement parce que ces bassins cumulent des comportements typiques des bassins naturels et des bassins urbains. À notre connaissance, il n'existe pas actuellement de modèles hydrologiques adaptés à de tels bassins versants. Afin de comprendre et de reproduire leur comportement hydrologique, modifié par leur aménagement progressif (imperméabilisation, artificialisation des chemins d'écoulement), de nouveaux modèles hydrologiques doivent être développés.

Cette étude est un travail préliminaire au développement d'un modèle hydrologique adapté à ce type de bassin versant. Elle s'intéresse uniquement à la fonction de transfert, partie du modèle hydrologique qui consiste à transférer jusqu'à l'exutoire l'eau qui ruisselle à la surface des versants ainsi que l'eau en rivière. De nombreuses méthodes, des plus simples aux plus complexes, existent pour déterminer cette fonction de transfert qui dépend à la fois de la distance à parcourir jusqu'à l'exutoire ainsi que de la vitesse. Pour cette étude, nous avons souhaité partir de méthodes simples que nous avons raffinées au fur-et-à mesure de l'étude, en fonction des résultats obtenus.

Le bassin versant périurbain étudié est celui de la Chézine, situé dans l'agglomération nantaise. Dans un premier temps, un travail d'analyse des données hydrométéorologiques a été effectué. Cette analyse avait été entamée lors d'un stage précédent pour les années allant de 2001 à 2004. Nous l'avons complété avec les données de 2005 à 2007. Cette analyse nous a permis de mettre en évidence une dynamique très sensible à l'état hydrique initial du bassin versant. Cet état hydrique initial a une incidence sur les surfaces qui participent ou non au ruissellement. C'est donc la fonction de transfert qui en est directement modifiée. En fonction de l'état hydrique initial et du coefficient d'écoulement qui caractérise la réponse hydrologique du bassin versant, les événements pluvieux ont été séparés en deux groupes distincts, pour lesquels des méthodologies différentes ont été appliquées pour définir des fonctions de transfert pour le bassin versant de la Chézine.

Le travail présenté s'organise en quatre parties.

La première partie traite du contexte de ce travail : le projet de recherche dans lequel il est inscrit (ANR-AVuPUR), les notions théoriques sur lesquelles ce travail est basé et une brève description de la Chézine. Dans une deuxième partie, l'analyse des données hydrométéorologiques est détaillée. Elle commence par la description du traitement des données puis elle explique la méthodologie utilisée pour définir les évènements pluvieux, les principaux objets de notre étude. Enfin, tous les résultats conséquents de cette analyse sont présentés, notamment à travers des graphiques mettant en évidence les paramètres qui potentiellement expliquent le comportement du bassin ou, au moins, nous aident à mieux le comprendre. La troisième partie présente l'analyse géomorphologique qui combinée aux résultats de l'analyse des données nous permet de définir dans la quatrième partie les fonctions de transfert du bassin.

1. Présentation du contexte du travail

Ce chapitre consiste tout d'abord à présenter l'institution d'accueil et le projet dans lequel ce travail s'inscrit. Ensuite, un point sur la Chézine est fait, rassemblant des informations des études précédentes afin de faire une caractérisation préalable aux analyses des données. Quelques notions théoriques sur la modélisation hydrologique, essentielles pour le déroulement de cette étude sont décrites succinctement.

1.1 *La division Eau et Environnement du LCPC*

Ce travail s'est déroulé au sein du Laboratoire Central de Ponts et Chaussées (LCPC), plus précisément dans la Division «Eau et Environnement ». La division participe à l'Institut de Recherche sur les Sciences et Techniques de la Ville, l'IRSTV.

Dans le contexte de gestion durable de l'eau en milieu urbain, la thématique générale de la division est la "maîtrise des eaux pluviales dans les espaces aménagés" (espaces urbains). Les recherches qui y sont menées peuvent être regroupées selon cinq thèmes:

- Hydrologie quantitative et qualitative des espaces aménagés ;
- Risque hydrologique ;
- Eco-compatibilité des matériaux alternatifs en construction routière ;
- Représentativité et fiabilité des mesures en hydrologie et assainissement urbains.

Une part importante de l'activité de recherche dans la division est consacrée aux eaux pluviales en milieu urbain et périurbain: hydrologie, assainissement, techniques alternatives à l'assainissement pluvial et pollution des eaux de ruissellement. La gestion des eaux urbaines de temps de pluie connaît actuellement une mutation rapide favorisant la maîtrise des débits et la réduction des rejets polluants au milieu naturel. Sur le plan scientifique, cette mutation, exigeante, implique de progresser dans notre connaissance des différentes composantes du bilan hydrologique en milieu urbain, mais aussi de s'orienter vers une modélisation couplée des flux d'eau et de pollution associée.

Dans ce contexte, la division s'est intéressée à la Chézine, un bassin versant périurbain qui présente à la fois une partie rurale et une partie urbaine croissante. Les photos du bassin dans la Figure 1 montrent les paysages contrastés que l'on trouve sur le bassin. Les études sur la Chézine sont réalisées en collaboration avec Nantes Métropole (communauté urbaine) dans le cadre du programme Neptune, conçu pour l'amélioration de la qualité des cours d'eau et des

milieux associés. Les bureaux d'études Biotope et DHI, en 2005, ont mené une enquête sur la vallée de la Chézine pour le compte de Nantes Métropole en étudiant différents aspects : hydrologiques, hydrauliques, biologiques et morphologiques sur ce bassin versant.

Au LCPC le travail sur la Chézine a été entamé par le stage d'Amélie Priou en 2005. A partir d'une analyse des données hydrologiques relatives aux années 2001 à 2004, Priou a fait deux hypothèses sur le comportement du bassin : la première de l'existence d'un comportement saisonnier, selon lequel les événements d'été présenteraient un ruissellement nettement plus faible que les événements d'hiver ; et un deuxième sur la contribution des zones rurales et urbaines, qui pouvait expliquer la présence fréquente de deux pics dans les hydrogrammes. Nous allons réaliser une investigation plus approfondie dans le but de vérifier la pertinence de ces hypothèses.

Priou a essayé de reproduire la réponse du bassin avec TOPMODEL et également avec sa version « urbanisée » TOPURBAN. Ce dernier a été développé pour prendre en compte la présence des surfaces urbaines dans la génération du ruissellement. C'était donc potentiellement une bonne solution pour modéliser les bassins périurbains comme celui de la Chézine. Plusieurs calages pour comparer les deux modèles ont été réalisés, notamment en faisant la distinction entre les événements d'été et les événements d'hiver. Par contre, au final de son travail Priou est arrivée à la conclusion de que l'efficacité de ces calages n'était pas globalement satisfaisante pour les deux modèles.

L'absence des outils de modélisation adaptés aux bassins qui ne sont ni totalement urbains ni totalement ruraux à inspiré la création du projet ANP AVuPUR, projet national concernant la vulnérabilité des rivières dans les zones périurbaines. Ce travail s'inscrit dans plusieurs phases de ce projet, qui a démarré en 2008 et se déroulera jusqu'en 2011.



Figure 1. Photos prises sur le bassin versant de la Chézine: à gauche le cours d'eau dans un milieu naturel et à droite dans la commune de Sautron. LCPC, 2007

1.2 Le projet « *Assessing Vulnerability of Peri-urban Rivers* » (AVuPUR)

L'étalement urbain croissant augmente la pression sur les eaux des zones situées en périphérie des grandes villes. Le fonctionnement hydrologique des bassins versants est modifié, notamment par l'imperméabilisation des surfaces, par la concentration des écoulements dans les réseaux d'assainissement et par les autres changements morphologiques et topologiques qui caractérisent les bassins urbains. Ces phénomènes et les pollutions qui y sont associées ont des conséquences importantes comme par exemple l'altération chimique et biologique des cours d'eau. Ils peuvent également aggraver les risques d'inondations et de sécheresse de la région.

Sous la pression réglementaire (Directive Cadre Européenne sur l'Eau) et la demande sociétale, les décideurs sont confrontés à des choix complexes en termes d'aménagement. Il est donc nécessaire de mettre au point des outils (méthodes et des modèles) capables de quantifier l'impact de l'augmentation de l'urbanisation sur la vulnérabilité des hydro-systèmes périurbains.

Le projet ANR AVuPUR (2008-2010) contribue au développement de ces outils. L'objectif général (et de long terme) est d'aboutir à une modélisation intégrée des bassins versants périurbains incluant les aspects hydrologiques, chimiques, biologiques et géomorphologiques.

Pour une première étape, le projet s'est focalisé sur la modélisation du cycle de l'eau des bassins périurbains de taille moyenne (10-100 km²). Il s'appuie pour cela sur deux bassins versants expérimentaux soumis à une urbanisation croissante et situés dans des régions

climatiques et géologiques contrastées: l'Yzeron (147 km²) en périphérie lyonnaise et la Chézine (34 km²), dans la banlieue de Nantes.

Le projet est divisé en 4 phases (ou *work packages*):

WP1 : Documentation des bassins versants en incluant les données hydrologiques, la caractérisation des sols et de l'occupation des sols. Il s'agit notamment de documenter les chemins de l'eau dans les zones rurales et urbaines en s'appuyant sur des mesures de terrain, de l'analyse d'images et de la topographie haute résolution. Les données seront incluses dans des bases de données et des systèmes d'information géographique (SIG) qui serviront de base aux modélisations prévues dans les WP2 et WP3.

· WP2 : Evaluation et amélioration des modèles détaillés du cycle hydrologique, adaptés aux zones périurbaines. Ce WP vise à adapter des modèles existants, pour inclure les discontinuités liées aux éléments naturels (tels que le réseau hydrographique) et anthropiques (comme les routes, les ouvrages et les zones urbanisées).

· WP3 : Amélioration des représentations simplifiées utilisables à plus grande échelle et pouvant être intégrées à des outils opérationnels. Les mécanismes de production seront simulés par des approches de type réservoir ou à base de surfaces saturées, adaptées aux zones urbanisées.

· WP4 : Analyse de sensibilité et simulation de scénarios pour quantifier l'impact des changements d'occupation des sols passés ou futurs, ainsi que du changement climatique sur la vulnérabilité des hydro-systèmes. Pour finir, les résultats de ces simulations seront traduits sous forme d'indicateurs de modification du régime hydrologique et reliés à l'impact sur la géomorphologie des cours d'eau.

La partie de ce rapport consacré à l'analyse des données hydrologiques et géographiques s'insère dans les tâches du WP1. Ce travail contribue aussi au WP3 comme étude préliminaire pour la définition de la fonction de transfert du futur modèle hydrologique développé par le LCPC.

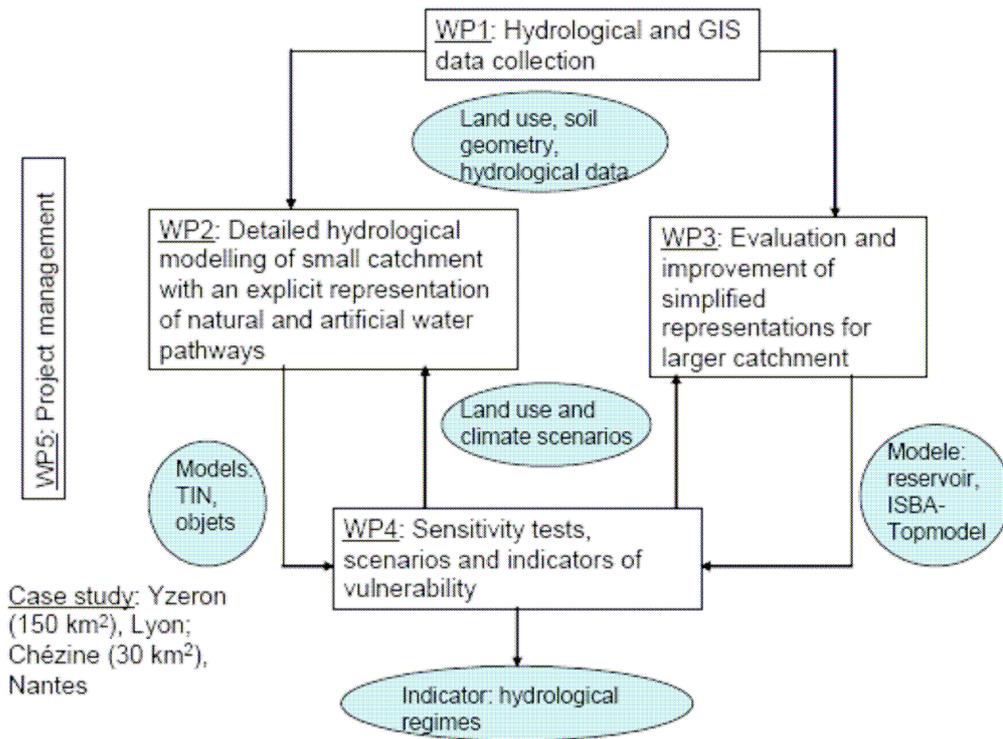


Figure 2. Schéma du projet AVuPUR

1.3 Présentation du bassin étudié : La Chézine

Cette partie est consacrée à faire une étude du bassin, préalable à l'analyse détaillée des données hydrométriques et géomorphologiques du bassin. Nous cherchons des indices de comportement du bassin à partir de des caractéristiques physiques : hydrographie, nature géologique, occupation du sol et caractéristiques climatiques. Ces informations nous permettront également de vérifier la cohérence des résultats obtenus durant nos analyses à partir d'autres sources de données. Nous allons vérifier notamment si les surfaces urbanisées cartographiées correspondent aux surfaces imperméabilisées calculées et si les données de pluie sont cohérentes par rapport aux moyennes annuelles de précipitation enregistrées par Météo France et Infoclimat.

1.3.1 Localisation

La Chézine est localisé au Nord-Ouest de la ville de Nantes. Le cours d'eau prend sa source sur la commune de Saint Etienne de Monluc et traverse Sautron, Couëron, Saint-Herblain et Nantes, où il se jette dans la Loire, comme il peut être observé dans la Figure 3.

Le bassin versant compte une population totale d'environ 64.000 habitants répartis dans 5 communes comme indiqué dans le Tableau 1.

Commune	Superficie concernée par le BV (%)	Population concernée par le BV (hab)
Saint Etienne de Montluc	3	25
Sautron	12	3885
Couëron	32	510
Saint Herblain	43	20775
Nantes	8	38750

Tableau 1 -Présentation générale des communes concernées. Source: *Biotope- Etude Préalable a la restauration et a la mise en valeur de la Valle de la Chézine, 2005. Page 6.*

1.3.2 Relief et topographie

La superficie totale du Bassin Versant de la Chézine jusqu'à l'exutoire en Loire est de 3300 hectares, tandis que le bassin étudié (avec l'exutoire dans le parc de Procé) est de 2900 hectares. La Figure 3 montre les limites du bassin entier, jusqu'à l'exutoire dans la Loire. Le cours d'eau de la Chézine possède une longueur linéaire d'environ 15 km dont 1km en écoulement souterrain, situé juste après le point de mesure. L'écoulement souterrain ne fait donc pas partie du bassin étudié.

La dénivellation totale du bassin versant est d'environ 80 mètres. Cela représente une pente moyenne de 0,5%. La pente est plus importante sur l'amont, avec des valeurs entre 0,45% et 0,53%. Dans la ville de Nantes, elle atteint 0,23% et la valeur minimale est de 0,07% dans la partie souterraine avant l'exutoire dans la Loire.

1.3.3 Hydrographie

La réponse du bassin versant est rapide grâce aux faibles distances de drainage, à la présence des rejets drainant les surfaces imperméabilisées dans la partie aval et à l'importance du ruissellement. En effet, dans une première analyse des données hydrologiques pour les années de 2001 à 2004, le temps entre le pic de pluie et le pic de débit est fréquemment trouvé entre 45 min et 1h (Priou, 2005).

La Figure 4 illustre le réseau hydrographique de la Chézine, dont les affluents sont listés dans le

Tableau 2.

Nom ou lieu-dit de l'affluent	Rive	Longueur (m)
Lieu-dit l'Aumarière	Droite	540
La Bastille	Gauche	1200
Lieu-dit la Botardière	Droite	1130
Lieu-dit Lande Bourne	Droite	1180
Lieu-dit la Bronçais	Droite	1340
Lieu-dit la Gournerie	Gauche	700
L'Angevinière	Gauche	1650
Lieu-dit Plaisance	Droite	310
Lieu-dit le Houssay	Droite	790
Les Renardières	Droite	1800

Tableau 2- Liste des affluents de la Chézine d'amont en aval. Source: Biotope- *Etude Préalable a la restauration et a la mise en valeur de la Valle de la Chézine*, 2005. Page 8.

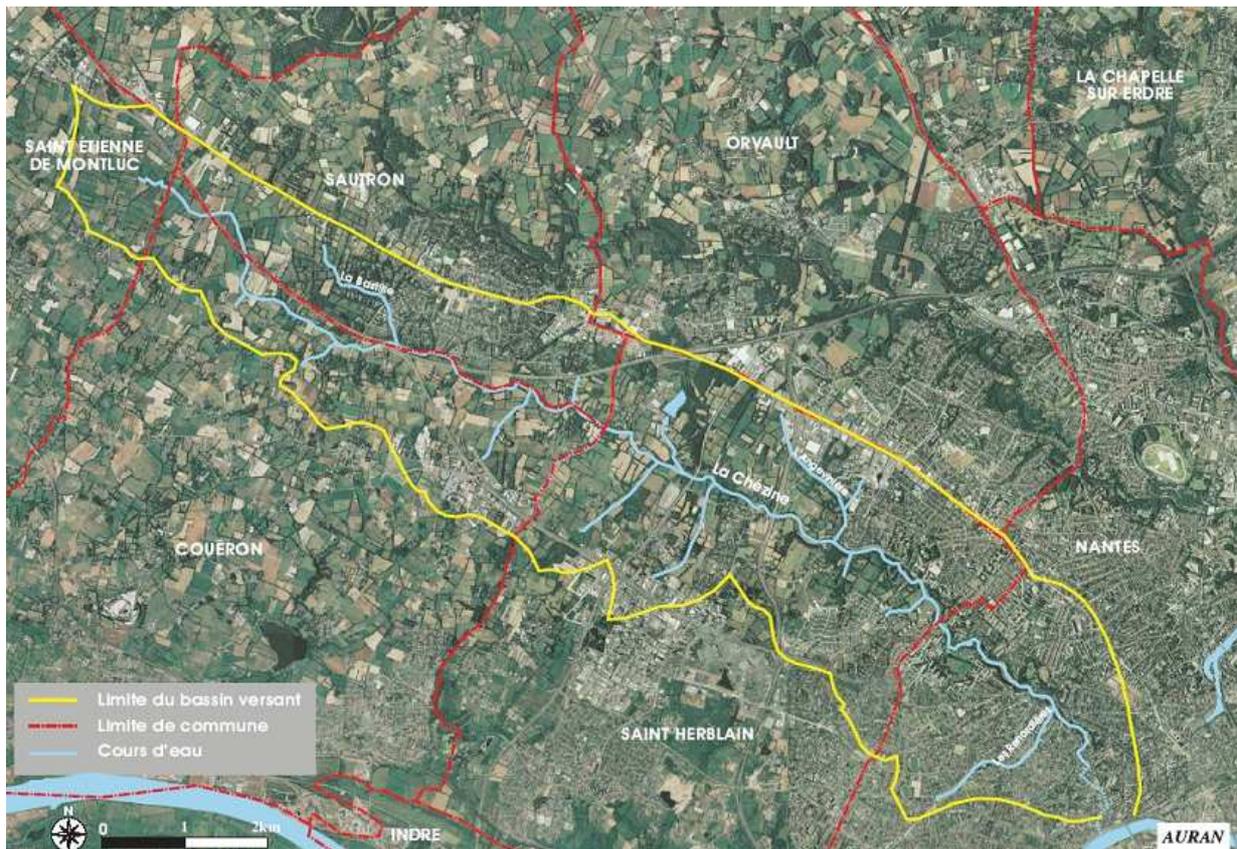


Figure 3-Localisation géographique du bassin versant de la Chézine (AURAN, 2003)

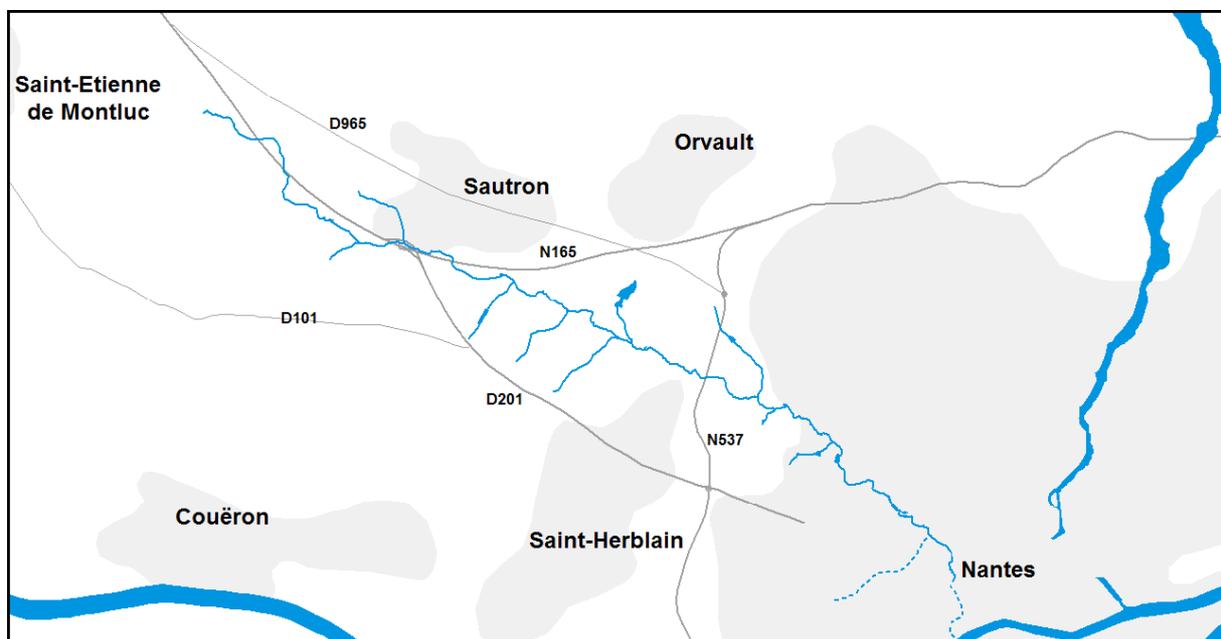


Figure 4- Réseau hydrographique de la Chézine et les principaux axes routiers. Source: Biotope- Etude Préalable à la restauration et à la mise en valeur de la Valle de la Chézine, 2005. Page 8.

1.3.4 Climat

Les pluies sont fréquentes mais peu intenses. La hauteur moyenne annuelle de précipitations est d'environ 800mm. Les hivers sont doux et pluvieux (environ 5° en moyenne) et les étés sont chauds sans excès (18,5° en moyenne). Ces particularités s'expliquent par la présence de l'océan tout proche. Toutefois, la pluviométrie du département présente une forte variabilité annuelle et peut passer du simple au double d'une année sur l'autre (1087mm à Nantes en 1999 par exemple). (Source : météo France, 2008)

La variation de température et de précipitations mensuelles pour la région nantaise est montrée dans la Figure 5. Ce graphique considère les valeurs moyennes en 30 ans (1971-2000). On peut observer dans cette figure que l'été est accompagné d'une faible pluviosité. Par conséquent les sols ont tendance à être plutôt secs durant cette période. En revanche, l'hiver, est plus propice à avoir des sols avec un état hydrique humide du fait de la pluviométrie plus importante et de la faible évapotranspiration.

Le nombre de jours de pluie moyen par mois en 30 ans est également estimé, mais cette fois ci entre 1961-1990 (Figure 6). Encore une fois nous pouvons remarquer que les précipitations sont nettement plus importantes pendant l'hiver qu'en été. La moyenne du nombre de jours de pluie pour le mois de juillet est d'environ 6 jours, tandis qu'en janvier elle dépasse le double de cette valeur.

LE CLIMAT DE LA LOIRE-ATLANTIQUE

Normales de températures et de précipitations
à Bouguenais

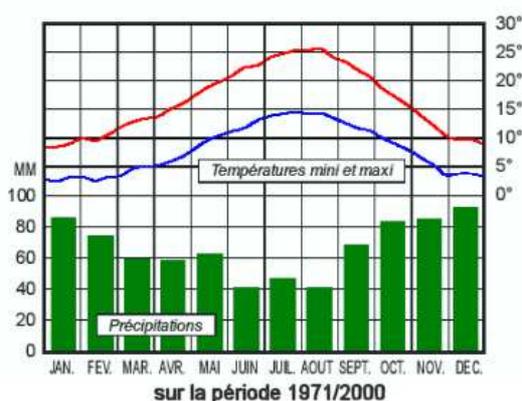


Figure 5. Caractérisation du climat à Nantes (Source Météo France, 27/06/2008)

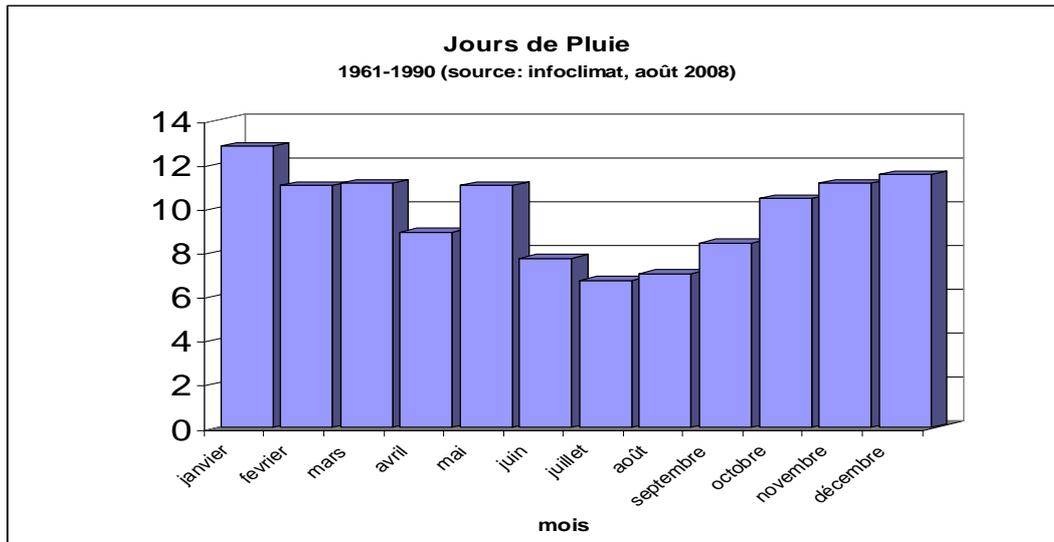


Figure 6. Moyenne mensuelle du nombre de jours de pluie (Infoclimat, août 2008)

1.3.5 Géologie et occupation du sol

Les trois formations géologiques prédominantes dans le bassin versant sont :

- Une partie des micaschistes et gneiss à deux micas, sur laquelle s'écoule la quasi-totalité de la Chézine et en rive gauche,
- Une autre composée de limons et d'argile recouvrant le fond de la vallée
- Une zone granitique à deux micas étendue sur la rive droite.

Imperméable, ce sous-sol ne permet pas la formation de nappes phréatiques, et le réseau hydrographique est donc alimenté par les eaux de ruissellement et par plusieurs sources au débit relativement faible. La Figure 7 montre que, en effet, les remontées de nappes sont plutôt faibles dans le bassin.

Cette information complétée par l'occupation du sol (Figure 8) constitue le départ de l'élaboration de notre hypothèse de fonctionnement de la Chézine : la contribution des nappes sur les débits étant négligeable, la Chézine est un ruisseau pluvial. Par conséquent la réponse du bassin parte plutôt du concept des zones contributives et nappes perchées.

A l'amont du bassin les prairies sont visiblement prédominantes. Elles sont représentées en vert clair dans la Figure 8. La présence de cultures et maraîchages n'y sont pas négligeables. Dans la portion intermédiaire, l'hétérogénéité est très forte : la rive droite est toujours couverte principalement par des prairies alors que la rive gauche possède une grande zone urbaine (commune de Sautron). L'aval du bassin est fortement urbanisé par l'agglomération nantaise. Les bordures des cours d'eau, en revanche, sont encore protégés par des boisements et parcs urbains.

Carte des remontées de nappes

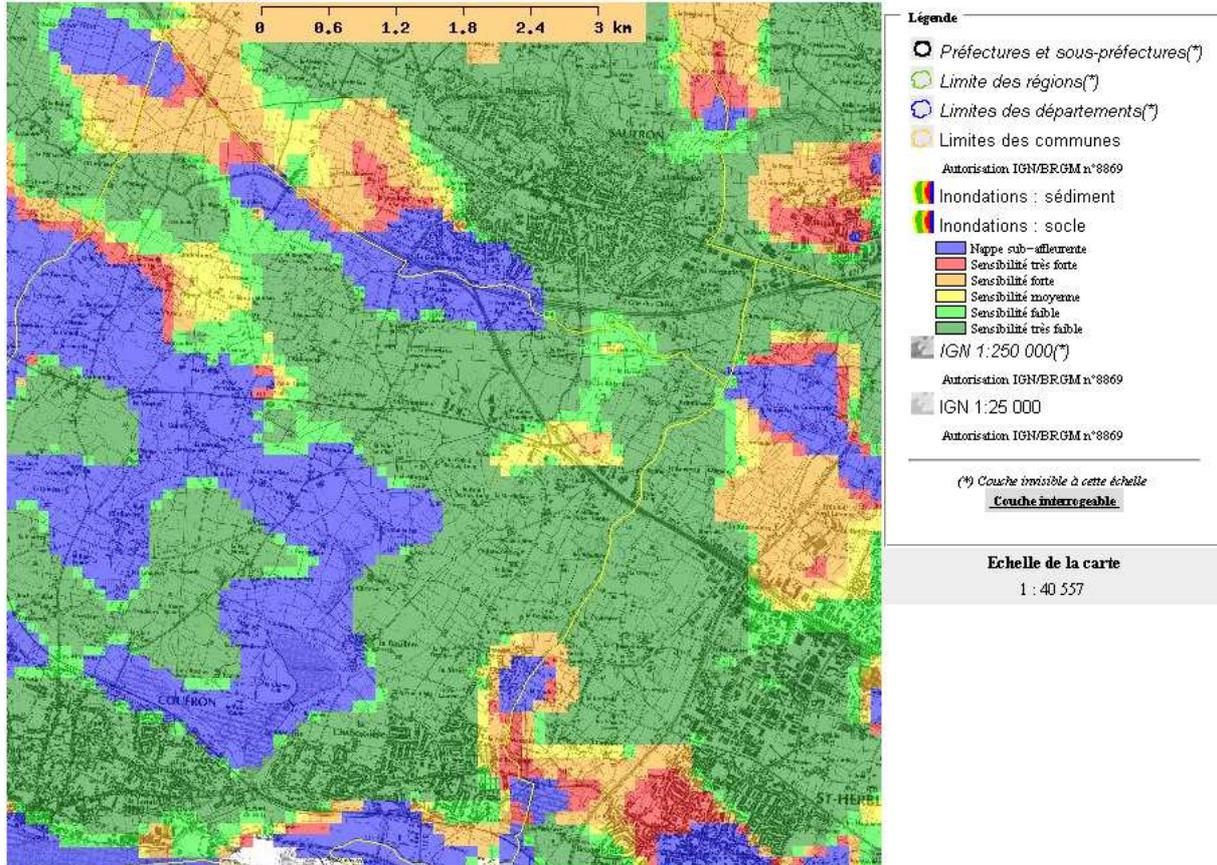


Figure 7. Carte de la remontée de nappes dans les alentours de la Chézine (BRGM, août 2008)

Étude préalable à la restauration et à la mise en valeur de la vallée de la Chézine

Occupation du sol dans le bassin versant de la Chézine

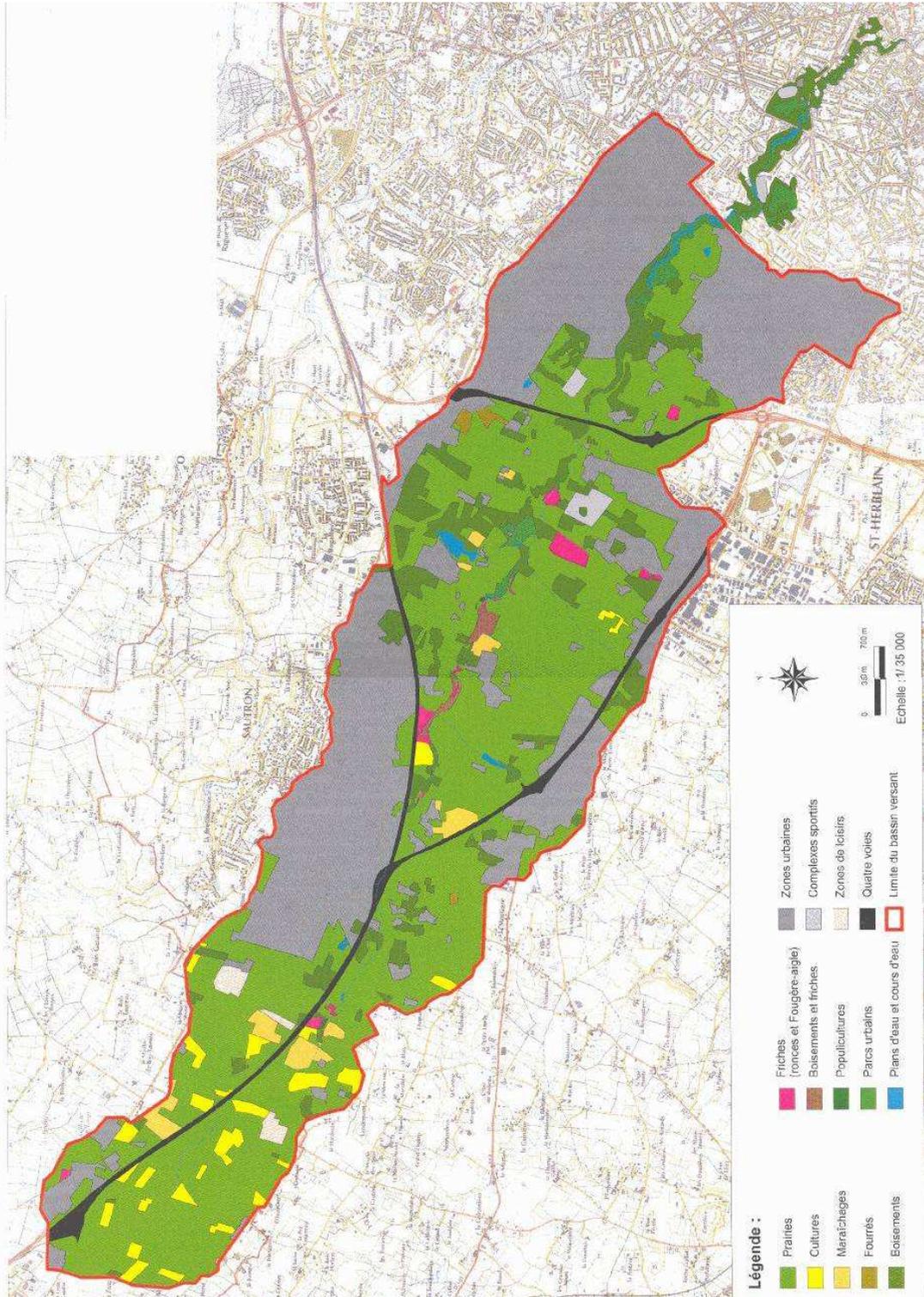


Figure 8 -Carte d'occupation du sol du bassin versant de la Chézine (Biotopie, 2005)

1.4 Introduction à la modélisation hydrologique

Bien que le but de ce travail ne soit pas de développer un modèle hydrologique comme il est classiquement fait, nous pouvons tout de même caractériser la démarche ici adoptée selon les classifications trouvés à travers la littérature :

- **Modèle global ou distribué** : un modèle est dit global lorsqu'il traite le bassin versant comme un objet unidimensionnel. Au contraire, dans le modèle distribué, le bassin est fragmenté en sous unités qui seront prises en compte séparément. On parle aussi parfois de modèles semi-distribués. Malgré quelques confusions sur cette dernière dénomination, on dira qu'elle caractérise le découpage du bassin en sous-bassins versants élémentaires sur lesquels une approche globale est envisagée.

- **Modèle conceptuel ou physique** : tandis que les modèles physiques cherchent à décrire les mécanismes internes du système en se basant sur la résolution d'équations différentielles de mécanique des fluides (Saint-Venant, Darcy, Richards, loi de conservation,...), les modèles conceptuels décomposent le comportement du bassin en sous processus globaux. Une représentation classique des bassins versants est celle du réservoir, ou d'une série de réservoirs qui se remplissent les uns les autres, et dont le fonctionnement et l'agencement sont régis par des paramètres souvent empiriques.

- **Modèle évènementiel ou continu** : le mode évènementiel, comme son nom l'indique, correspond à représenter le débit pour un évènement pluvieux ponctuel. Dans ce cas, on s'intéresse aux phénomènes les plus importants, responsables du pic de crue. La modélisation continue consiste à reproduire la variation du débit dans le temps (une saison, une année). Elle tient compte de l'ensemble des processus hydrologiques.

Ce travail cherche à décrire la dynamique du bassin à l'aide d'une approche globale, conceptuelle et évènementielle.

Suivant la logique des modèles hydrologiques, cette étude devra représenter, en la schématisant, la transformation des pluies en débits. Classiquement, deux sous-ensembles de processus sont distingués dans cette transformation :

- d'une part, ceux qui détermineront la partie de la pluie (communément appelée «efficace») qui participera « rapidement » à la formation de la crue : c'est l'objet de la fonction de production ;

- d'autre part, ceux qui transféreront cette pluie efficace jusqu'à l'exutoire du bassin : c'est l'objet de la fonction de transfert.

Cette division de processus est schématisée dans la Figure 9. Elle montre la pluie qui dépasse la capacité d'infiltration du sol au-dessus de la courbe qui coupe l'histogramme dans le deuxième graphique comme résultat de la fonction de production. La fonction de transfert correspond au ruissellement de cette pluie nette sur les zones contributives, résultant à l'hydrogramme de crue en bas de la figure.

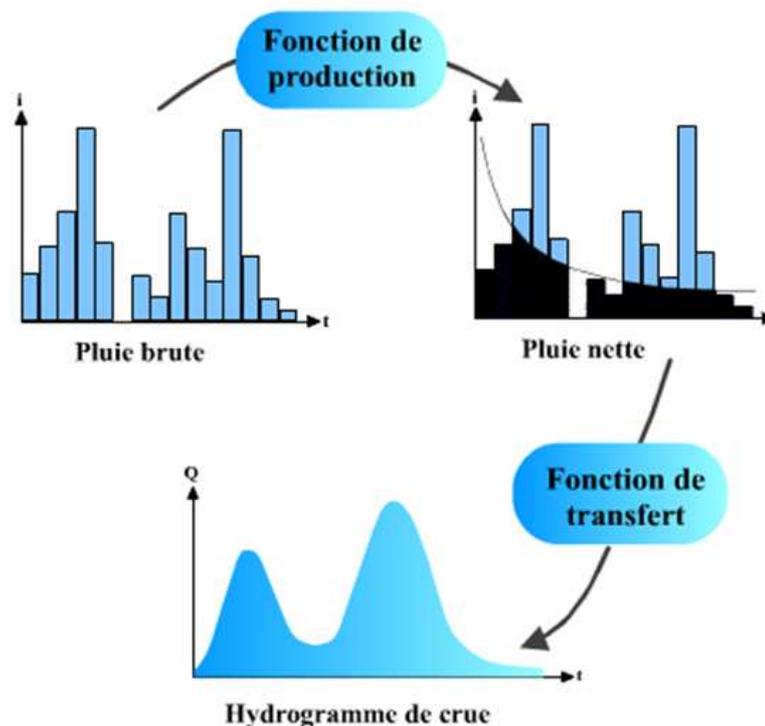


Figure 9. Transformation de la pluie brute en hydrogramme de crue (Hydrologie Générale – Musy, 2002)

1.4.1 Traitement du MNT

Avant de déterminer les types de processus, donc les équations, que l'on souhaite utiliser, il faut découper l'espace à étudier en unités de modélisation. Pour cette étude nous disposons d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) qui est une grille régulière composée de carrés auxquels est attribuée une valeur correspondant à l'altitude. Le relief est constitué pour rendre compte du dénivelé général mais selon la résolution les petits interstices de type fossé ne sont pas représentés.

Le traitement informatique du MNT est fait à l'aide d'un logiciel approprié. Dans ce travail nous avons choisi OrbisGIS, un Système d'Information Géographique orienté pour la

modélisation spatiale scientifique. Développé récemment à l'IRSTV par Bocher Erwan, Leduc Thomas et Gonzales-Cortes Fernando, OrbisGIS est une plateforme unifiée pour traiter, modifier, créer des données géographiques vectorielles et images.

Les théories utilisées par les codes OrbiGIS ont comme principe l'algorithme unidirectionnel baptisé D8: « *Deterministic eight neighbour* », créée par O'Callaghan et Mark (1984). Il est aussi implémenté dans DEMIURGE (Depraetere , 1992), Arcview (ESRI, 1996) et MapWindow (Utah State University, 2005). Il s'agit de définir l'orientation générale suivie par l'écoulement en chaque élément de la grille. Le choix d'un azimut se fait parmi les huit cellules qui l'entourent comme montré dans le schéma de la Figure 10. L'altitude du pixel est considérée comme celle du centre de la cellule. L'eau emprunte le chemin défini par la plus grande pente. Cette méthode retient le principe d'un cheminement naturel des eaux gouverné par la gravité et guidé par la topographie.

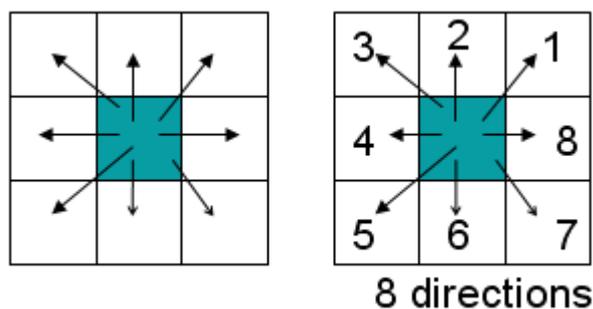


Figure 10. Schéma de l'algorithme Deterministic eight neighbour, D8 (O'Callaghan et Mark, 1984)

Une fois que les cheminements sont tracés, on calcule l'aire drainé pour chaque pixel. Cela représente juste le nombre de pixels amont convergeant vers celui-ci. Il est ensuite possible de déterminer le bassin versant à partir de son seul exutoire. En introduisant sa position, le logiciel extrait l'ensemble de mailles contribuant à l'écoulement dans ce point.

L'étape suivante du traitement consiste à distinguer les pixels « rivière » des pixels « versant » dans le bassin. En définissant une valeur seuil d'aire drainé, le réseau est reconstitué par l'ensemble de mailles dont l'aire drainé est supérieure à ce seuil. Toutes les autres sont les mailles « versant ». Plus la valeur du seuil sera élevée et plus la densité de drainage sera faible, au risque de ne pas représenter des cours d'eau existants. L'estimation de ce seuil est importante car les processus hydrologiques sont différents suivant que l'on se trouve sur un versant ou en rivière.

La définition d'un seuil optimal a été proposée dans plusieurs travaux. En général, ils utilisent la distribution spatiale de l'altitude ou de la pente qui sont liées à la densité du réseau hydrographique (Montgomery et Foufoula-Georgiou, 1993). La méthode plus utilisée est d'adopter valeurs de seuil arbitraires et comparer le résultat visuellement avec le réseau représenté dans les cartes topographiques du bassin (Yildiz, 2002).

1.4.2 Fonction de production

La fonction de production permet de déterminer la portion de la pluie brute (appelée pluie nette ou efficace) qui va participer à l'écoulement et contribuer au débit à l'exutoire. Elle cherche à représenter l'interaction entre le sol et la lame d'eau précipitée pour connaître quelle part de la pluie va être stockée dans le sol, quelle sera celle qui va ruisseler et dans quelles conditions.

Les fonctions de production couramment utilisées lors de la modélisation des débits sont:

- La génie rural 4 paramètres, GR4 (Perrin et al., 2003).
- La *Soil Conservation Service SCS* (l'USDA, 1956), qui dépend d'un paramètre CN appelé Curve Number. Celui-ci décrit la capacité d'infiltration du sol, soit son aptitude à créer du ruissellement.
- La *Variable Infiltration Capacity* (Wood et al., 1992), qui suppose une variation de la capacité d'infiltration en fonction de la topographie du terrain et des changements de sol et de végétation.
- Le *TOPography based hydrological MODEL*, ou TOPMODEL (Beven and Kirkby 1979).

Ce dernier modèle consiste à générer du ruissellement sur surfaces saturées dites contributives. Lors d'un événement pluvieux, une partie du bassin versant se sature en eau par affleurement de la nappe à la surface du sol, limitant ainsi les infiltrations. La nappe modélisée est une nappe temporaire, dite de versant, qui apparaît lors d'une pluie et disparaît après une longue période sèche. La saturation du sol est directement liée à sa topographie par le biais d'un indice topographique.

Dans une approche maillée, on définit un indice topographique λ_i qui caractérise chaque pixel du bassin :

$$\lambda_i = \ln\left(\frac{a_i}{\tan\beta_i}\right) \quad \text{eq. 1}$$

Cet indice est en fait un indice d'engorgement, qui traduit la propension d'un pixel à se saturer plus ou moins facilement :

— a_i est la surface drainée à l'amont du pixel. Elle caractérise la capacité du pixel i à collecter de l'eau en amont,

— tandis que la pente locale $\tan\beta_i$ traduit sa facilité à l'évacuer vers l'aval.

Par exemple, un point, situé en bas d'un versant, avec une grande aire drainée et une faible pente aura du mal à évacuer toute l'eau qu'il reçoit. Il se sature aisément et a donc un Indice élevé. Au contraire, un point situé sur une crête, avec une aire drainée faible et, par exemple, une forte pente sera beaucoup plus difficile à saturer : il aura un indice peu élevé. L'avantage de la définition de cet indice est qu'il permet de dire si deux points ont la même capacité à s'engorger, et donc s'ils sont « hydrologiquement semblables » vis-à-vis du transit sub-superficiel : on parle d'indice de similarité hydrologique.

1.4.3 Fonction de transfert

Une fois la pluie nette calculée, il faut établir une fonction de transfert pour déterminer la distribution dans le temps de ces volumes d'eau à l'exutoire. Plusieurs méthodes existent pour déterminer la fonction de transfert d'un bassin. Les plus complexes utilisent les équations de Barré Saint Venant avec les modèles d'onde diffusante ou d'onde cinématique. Les plus simples utilisent la distance de chaque point de la grille à l'exutoire et affectent une vitesse.

La méthode géomorphologique basique

Une fois la distinction faite entre les mailles versant et rivière, le temps de parcours d'eau de chaque pixel du bassin jusqu'à l'exutoire peut être calculé en affectant une vitesse d'écoulement.

Sur le versant, la vitesse varie généralement entre 0.01m/s et 0.5m/s suivant le contexte (Dunne et col, 1991; Hessel et col, 2003; Liu et col, 2004; Candela et col, 2005). Dans le réseau hydrographique, la vitesse peut atteindre 2 à 3m/s lors d'une crue (Versini, 2007).

Variation de la Vitesse

Il existe différentes méthodes pour prendre en compte la variation de la vitesse liées à différents facteurs. En effet, la vitesse peut varier en fonction de la pente, de l'occupation du sol qui peut modifier la rugosité ou encore en rivière en fonction du débit.

Dans le but de prendre en compte la variation de la vitesse moyenne d'écoulement en fonction du débit, on considère une rivière dont le lit a une section rectangulaire de largeur l , la profondeur étant h . La vitesse moyenne dans la section s'exprime au moyen de la formule de Manning-Strickler :

$$v = k \cdot I^{1/2} R_H^{2/3} \quad \text{eq. 2}$$

Où k est la rugosité du lit, I la pente du cours d'eau et R_H le rayon hydraulique (section mouillée/ périmètre mouillé).

Pour une section rectangulaire

$$R_H = \frac{l \cdot h}{l + 2h} \quad \text{eq. 3}$$

D'où

$$v = k \cdot \sqrt{I} \left(\frac{l \cdot h}{l + 2h} \right)^{2/3} \quad \text{eq. 4}$$

Et le débit s'exprime alors :

$$Q = v \cdot S = k \cdot \sqrt{I} \frac{(l \cdot h)^{5/3}}{(l + 2h)^{2/3}} \quad \text{eq. 5}$$

Si l'on considère deux débits Q_1 et Q_2 , caractérisés par deux vitesses d'écoulements et les deux hauteurs d'eau du lit h_1 et h_2 , nous pouvons estimer le rapport de vitesses v_2/v_1 en fonction du rapport Q_2/Q_1 .

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{2/3} \left(\frac{l + 2h_1}{l + 2h_2} \right)^{2/3} \Rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{3/2} \frac{l + 2h_2}{l + 2h_1} \quad \text{eq. 6}$$

Le rapport de débits peut être également écrit de la forme suivante :

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{v_2 S_2}{v_1 S_1} = \frac{v_2 h_2}{v_1 h_1} \quad \text{eq. 7}$$

En remplaçant h_2/h_1 dans cette dernière équation on obtient :

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{v_2}{v_1} \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^{3/2} \frac{l+2h_1}{l+2h_2} \Rightarrow \frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{2/5} \left(\frac{l+2h_1}{l+2h_2} \right)^{2/5} \quad \text{eq. 8}$$

Supposant que la différence de la hauteur d'eau est négligeable par rapport à la largeur du lit, on arrive à la relation suivante :

$$\frac{v_2}{v_1} \cong \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{2/5} \quad \text{eq. 9}$$

Cette dernière relation nous permet d'attribuer différentes vitesses d'écoulement au modèle en fonction du débit.

Le schéma de la Figure 11 synthétise la démarche que nous avons détaillée. Pour chaque maille du bassin versant, la vitesse de propagation est affectée permettant le calcul de l'hydrogramme unitaire produit pour celle-ci. La somme de tous les hydrogrammes unitaires des mailles contributives constitue l'hydrogramme complet de la crue. Ce dernier peut être comparé avec les courbes de débits des événements observés. Cette comparaison permettra la vérification des hypothèses et le raffinement de la méthode adoptée. Dans le but d'appréhender la dynamique du bassin de la Chézine et comprendre la formation des hydrogrammes des crues observées, nous avons ensuite poursuivi par l'analyse des données hydrométriques.

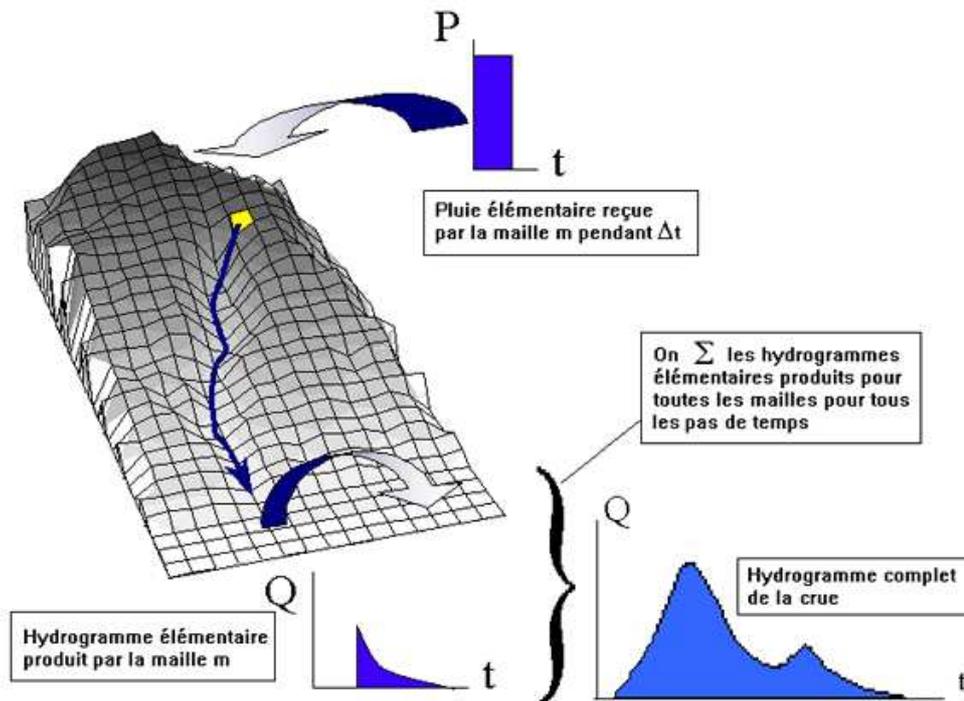


Figure 11. Détermination de la fonction de transfert avec l'approche maillée (www.athys-soft.org)

Le système de Barrée Saint-Venant

Les équations de Barrée Saint-Venant sont généralement utilisées pour simuler les écoulements en rivière et en conduite et peuvent servir comme base pour le calcul de la fonction de transfert.

Pour $Q(x,t)$ le débit exprimé en m^3/s à l'abscisse x et au pas de temps t , $A(x,t)$ la section mouillée en m^2 et q le débit latéral d'alimentation d'un bief par unité de longueur en m^2/s (ou l'intensité de pluie nette en m/s si on simule l'écoulement en versant), l'équation de conservation de masse s'écrit :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{eq. 10}$$

La seconde équation qui régit les écoulements unidimensionnels filaires est celle de la quantité de mouvement. La vitesse moyenne d'écoulement en m/s est $V(x,t) = Q(x,t)/A(x,t)$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} = g(I - J) \quad \text{eq. 11}$$

Où h correspond au tirant d'eau, I la pente du lit du cours d'eau, gJ est le travail des forces de frottement.

A partir du système de Saint –Venant les écoulements peuvent être modélisés à l'aide d'une onde diffusante (Woolhisier et Liggett, 1967 ; Ponce et al., 1978) :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} + D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad \text{eq. 12}$$

Où C est la célérité et D la diffusivité, deux fonctions du débit Q .

Cette formulation est utilisée pour définir une fonction de transfert d'un réseau hydrographique complexe (Moussa, 1996) en deux étapes. D'abord le bassin est découpé en sous-bassins constitués d'une surface d'aire drainée et d'un bief hydraulique chacun. Dans un deuxième temps, l'hydrogramme unitaire de chaque sous-bassin à l'exutoire est déterminé par la méthode de la structure en parallèle. La somme des contributions de tous les sous-bassins directement reliés à l'exutoire est l'hydrogramme unitaire de l'ensemble.

La résolution du système peut être plus simplifiée encore avec le modèle d'onde cinématique, toujours à partir des équations de Saint-Venant. C'est une bonne approximation

puisque lors de la propagation d'une crue sur plusieurs kilomètres, les effets cinématiques sont dominants.

Cette approximation conduit à la relation $I = J$. Cela signifie que à chaque moment, la ligne d'énergie est parallèle au lit du cours d'eau. Le système s'est simplifié en :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{eq. 13}$$

La formule classique qui relie le débit aux caractéristiques géométriques du cours d'eau est l'équation de Manning- Strickler. On y trouve le paramètre de rugosité K , le périmètre mouillé en m P :

$$J = \left(\frac{Q}{KA^{\frac{5}{3}} P^{\frac{-2}{3}}} \right)^2 \quad \text{eq. 14}$$

Avec
$$Q = KA^{\frac{5}{3}} P^{\frac{-2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad \text{eq. 15}$$

Les conditions de débits élevés et de forte réactivité du bassin aux pluies liée à la prédominance du ruissellement superficiel peuvent conduire à des évolutions très brutales des débits que cette méthode peut reproduire, tandis que les méthodes de résolutions classiques par différences finies ont tendance à les lisser (Gaume, 2002).

Il est important de remarquer que selon l'application d'un tel modèle, la célérité Q/A , ou la vitesse de propagation de l'amont vers l'aval, augmente avec le débit.

2 Analyse des données hydrologiques

Le but de cette analyse est de caractériser la réponse hydrologique du bassin versant à un évènement pluvieux. Il s'agit d'une analyse des intensités de pluie et leurs respectives variations de débit à l'exutoire du bassin au cours des années 2001 à 2007. L'étude permet d'observer notamment les différences entre la réponse hydrologique pendant l'été et l'hiver et de distinguer la contribution des zones rurales de celles de zones urbanisées.

Dans un premier temps, les sources des données pluviométriques et hydrométriques sont décrites. Ensuite, la méthode de traitement des données est présentée en deux parties : homogénéisation des pas de temps des mesures et détection des précipitations. Pour finir, les résultats de l'étude sont représentés par des graphiques qui mettent en évidence les principales corrélations entre les paramètres choisis pour décrire le bassin.

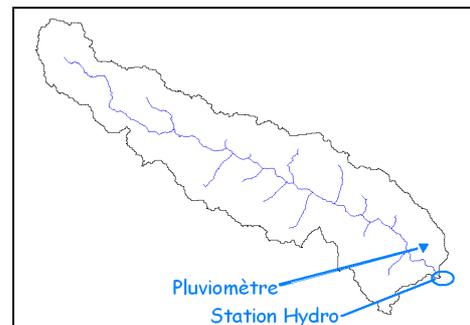
2.1 Sources des données

2.1.1 Données pluviométriques

Le pluviomètre reste l'appareil de mesure des précipitations le plus utilisé. Il détermine le cumul de la hauteur de pluie au cours du temps, permettant obtenir l'intensité de pluie en mm/h sur des pas de temps courts de l'ordre de 1 à 6 minutes généralement. (Bertrand- Krajewsky et al.)

Les données de pluie utilisées dans ce projet ont été acquises par un pluviomètre situé sur le bassin de la Chézine, près de la Piscine de Dervallières, à l'aval du bassin versant.

Géré par le Service Exploitation de la Communauté Urbaine de Nantes, l'appareil enregistre des mesures à un pas de temps de cinq minutes.



2.1.2 Données limnimétriques

La source des données de débit pour ce projet est la station hydrométrique située dans le parc de Procé, à l'aval du pont Jules César (Figure 12). La station est gérée par le service exploitation de Nantes Métropole.



Figure 12. Station limnimétrique: localisation du seuil et du capteur qui mesure les hauteurs d'eau

Un capteur à ultrasons aérien mesure les hauteurs d'eau en continu. Les mesures sont enregistrées toutes les heures, ou lorsque la hauteur varie de plus de 3%.

L'exutoire défini pour cette étude se situe au niveau de la station hydrométrique. Le bassin versant total a son exutoire en Loire.

Année	Pluviomètre		Hauteur d'eau	
	Pas de temps	Unité	Pas de temps	Unité
2001-2004	5'	mm/h	1h et variable	m
2005	5'	mm/h	1h et variable	m
2006	5'	mm/h	1h	m
Janvier à mai 2007	5'	mm/h	1h	m
Mai à décembre 2007	5'	mm/h	5'	m

Tableau 3. Données mesurées d'intensité de pluie et de hauteur d'eau

Le temps de réponse du bassin est d'environ 1h pour le premier pic de débit selon l'analyse faite pour les années de 2001 à 2004 (Priou, 2005). Le pas de temps de 15 minutes a été donc choisi pour ainsi permettre de représenter la montée des débits lors des évènements.

Le calcul du débit a été fait à partir des hauteurs d'eau mesurées et la loi de type seuil (utilisée par Nantes Métropole). Il s'agit d'une formule établie par Poleni (1717) et applicable aux seuils frontaux.

$$Q = M \times L \times h_0 \sqrt{2 \times g \times h_0} \quad \text{eq. 16}$$

Avec

Q : débit au-dessus du seuil (m³/s)

M : coefficient dépendant de la forme du seuil (0,4)

L : largeur du seuil (m)

h₀ : hauteur d'eau au-dessus du seuil (m)

g : accélération de la pesanteur (m/s²)

2.2 Traitement des données

Dans un premier temps, les données ont été modifiées dans un format d'entrée du programme d'homogénéisation du pas de temps.

Ensuite, le programme pour changer les pas de temps des données a été modifié pour améliorer l'interpolation des données de débit. Dans la version originale les débits calculés pour le pas de temps de 15 min étaient la moyenne des débits mesurés. Les courbes de débits étaient représentées par marches. Les mesures de débit étant instantanées, une interpolation linéaire en est plus adéquate. Nous pouvons comparer les résultats de ces différentes méthodes d'interpolation observant les événements représentés dans les figures 13 et 14.

Les résultats des traitements des données hydrométéorologiques sont représentés dans les figures 15 à 21.

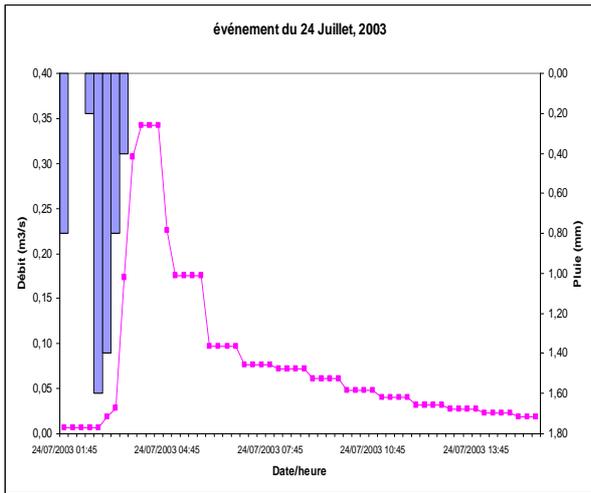


Figure 13. Débits obtenus avec l'interpolation originale

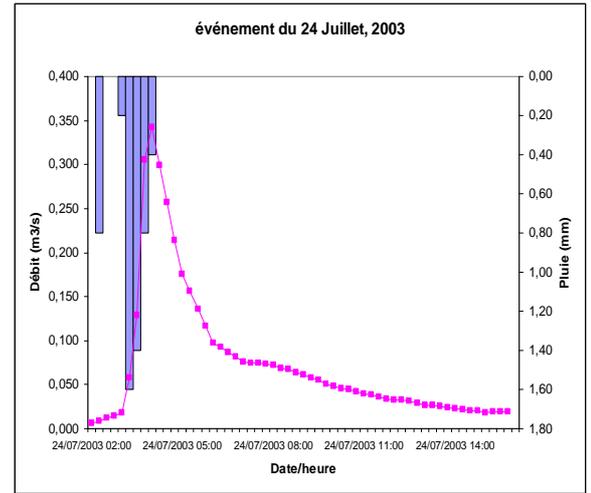


Figure 14. Débits obtenus avec interpolation linéaire

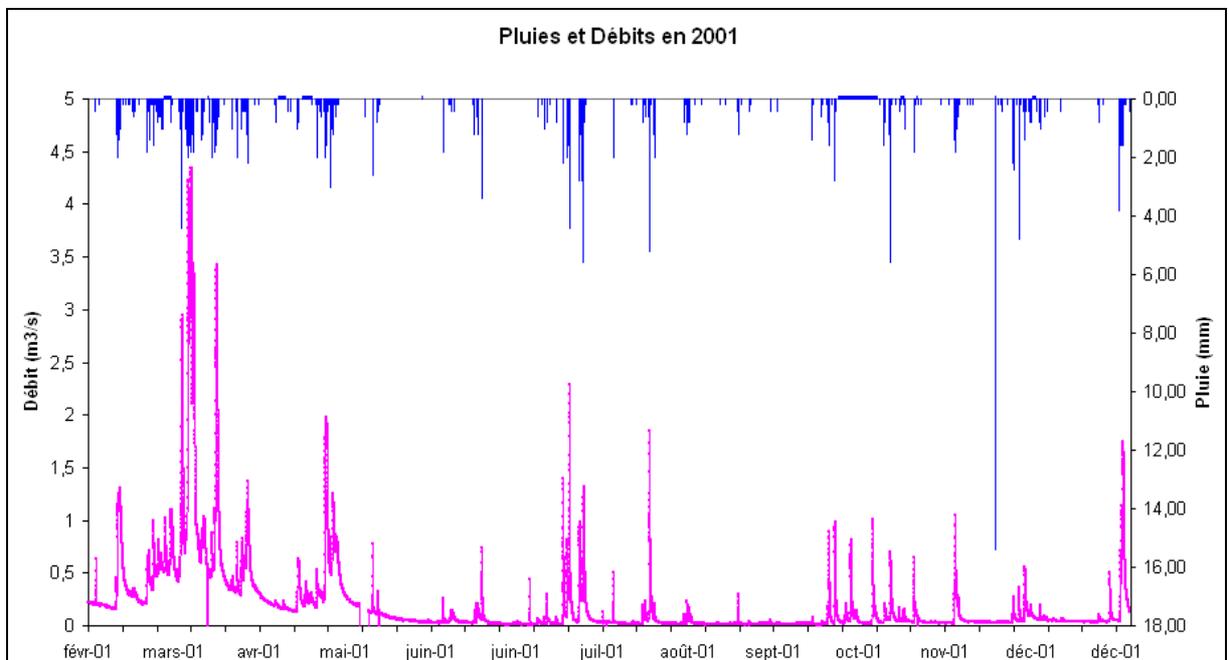


Figure 15. Pluie et débit en 2001. Données traitées au pas de temps de 15 min.

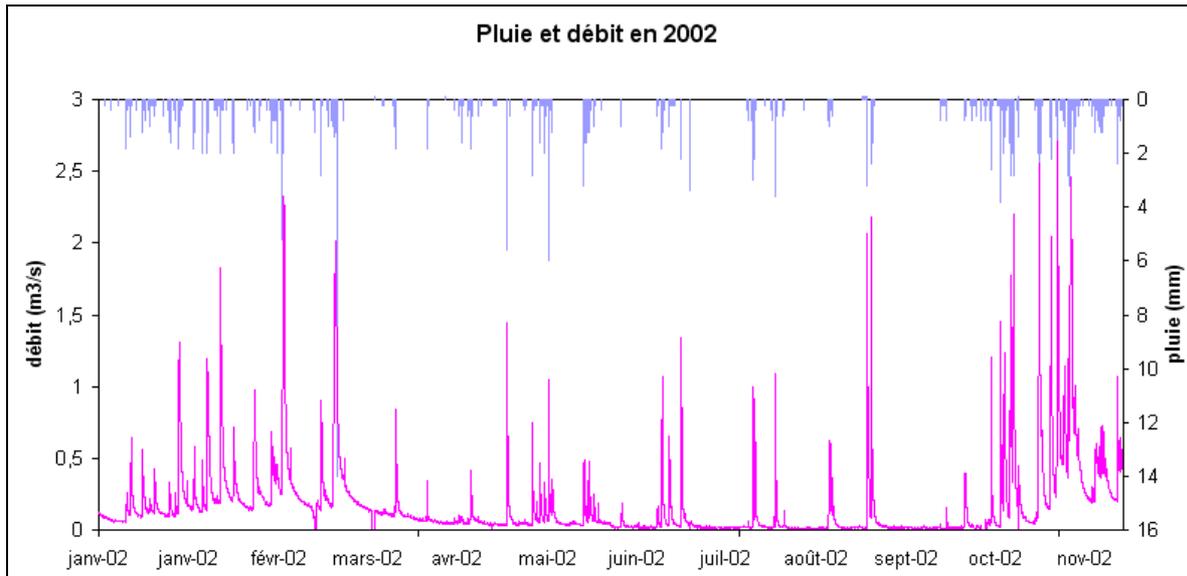


Figure 16. Pluie et débit en 2002. Données traitées au pas de temps de 15 min.

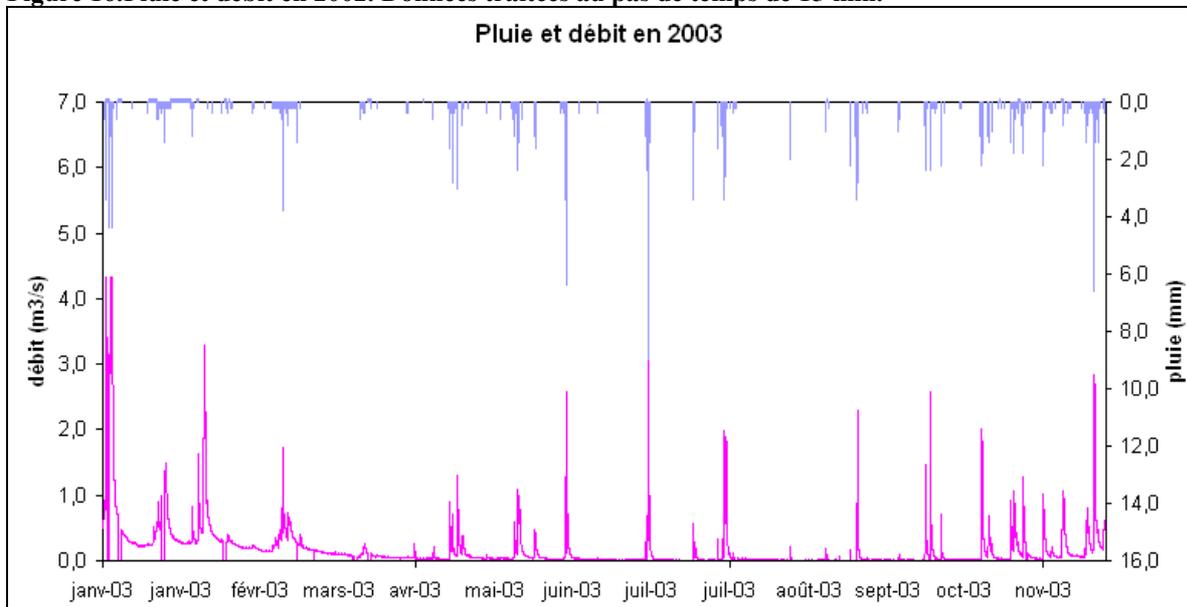


Figure 17. Pluie et débit en 2003. Données traitées au pas de temps de 15 min.

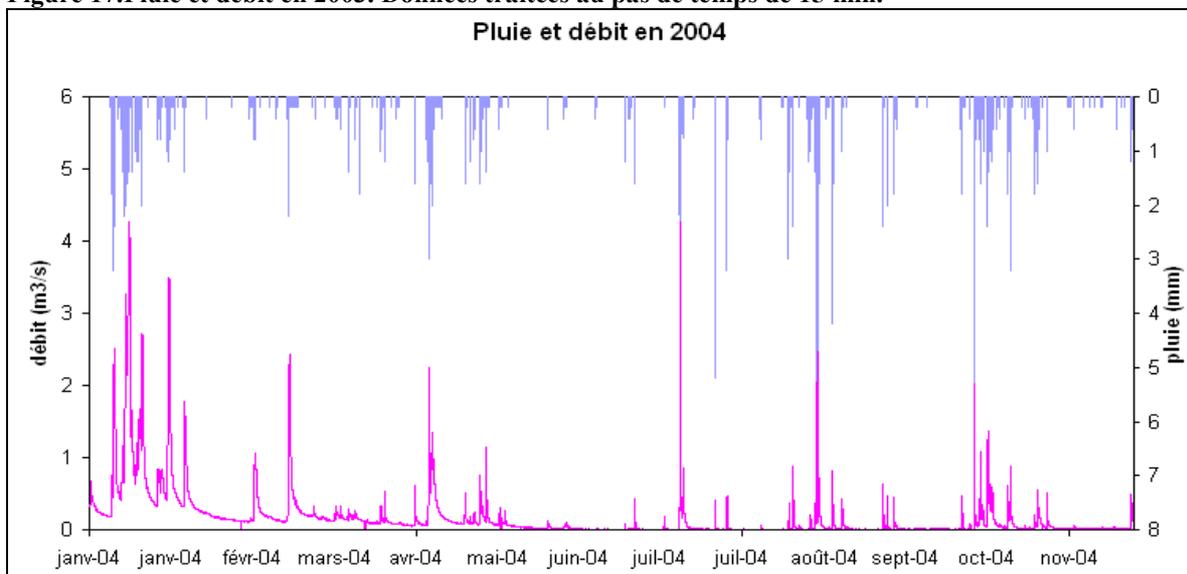


Figure 18. Pluie et débit en 2004. Données traitées au pas de temps de 15 min.

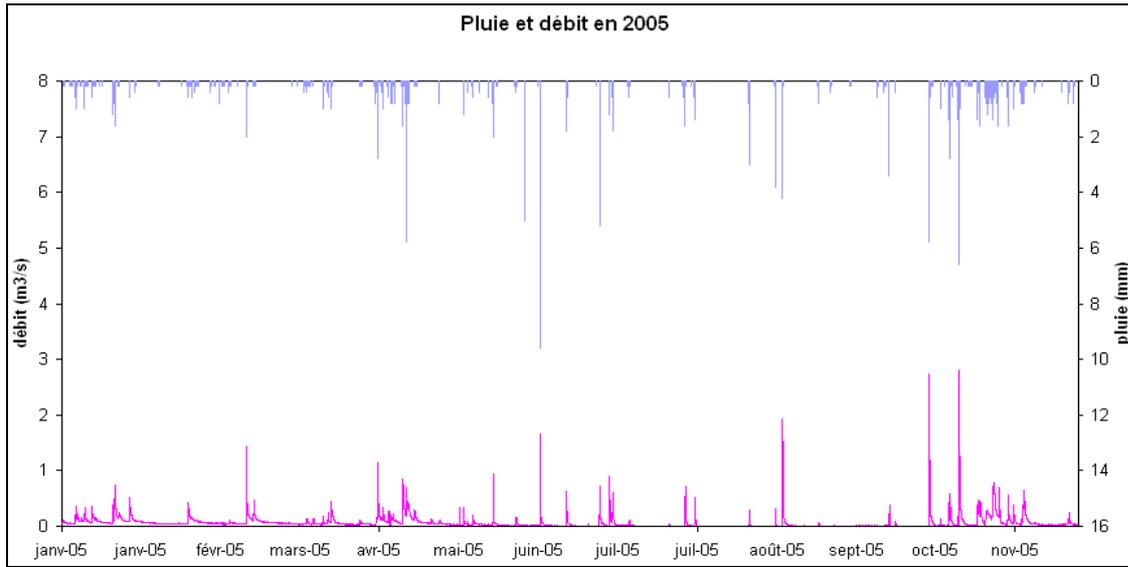


Figure 19. Pluie et débit en 2005. Données traitées au pas de temps de 15 min.

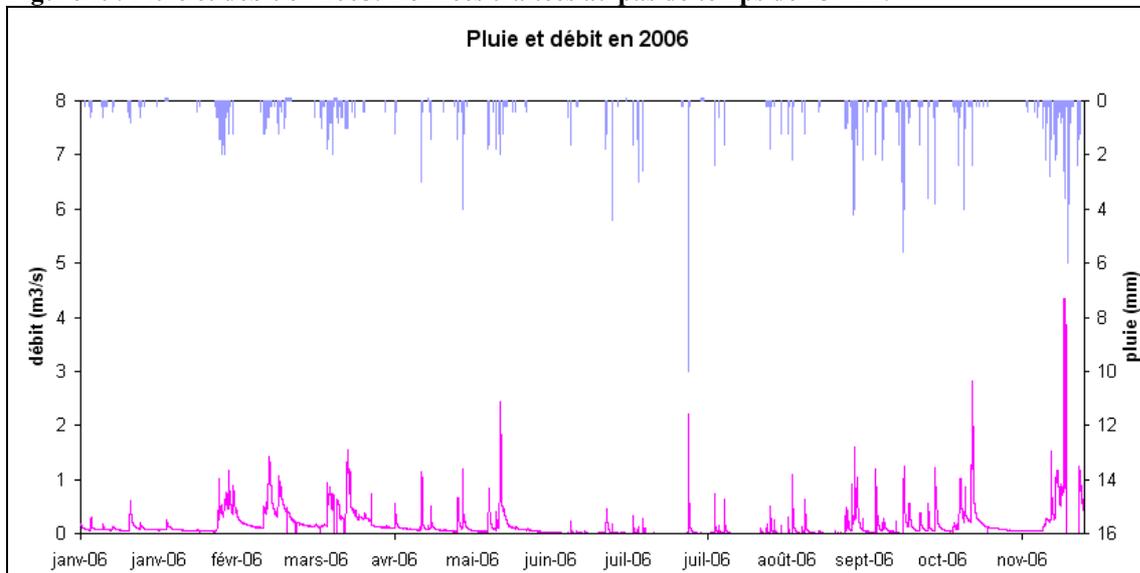


Figure 20. Pluie et débit en 2006. Données traitées au pas de temps de 15 min.

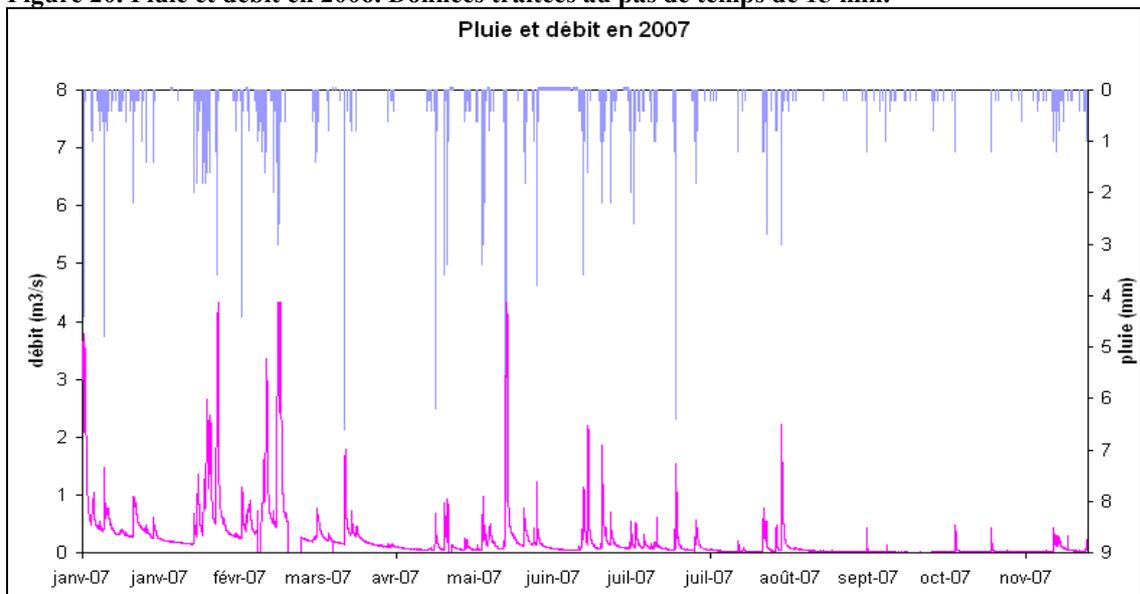


Figure 21. Pluie et débit en 2007. Données traitées au pas de temps de 15 min.

Si l'on compare ces histogrammes entre eux, il est possible de vérifier que l'année 2005 présente des pluies et des débits nettement plus faibles que les autres années. Cela est confirmé par les bulletins mensuels archivés mis à disposition par Météo France. Selon ces bulletins les déficits de pluie en 2005 ont été de l'ordre de 30 à 70%.

Tableau 4. Moyenne des données de pluie et débit sur les années 2001 à 2007, 2005 à part

	<u>2001- 2007, 2005 exclu</u>	<u>2005</u>
Cumul de pluie annuel:	834 mm	561 mm
Débit Moyen	0.21 m ³ /s	0.07 m ³ /s
Débit maximal	4.33 m ³ /s	2.80 m ³ /s

Le débit moyen de la Chézine sur la période 2001-2007 (2005 exclu) est de 0,21 m³/s et le débit maximal atteint pendant cette période est de 4,3 m³/s.

Le cumul de pluie annuel moyen obtenu (834mm) est également cohérent avec la description du climat de Nantes par Météo France (850mm).

2.3 Caractéristiques des évènements pluvieux

Lorsque les données de pluie et débit sont traitées et vérifiées, il faut délimiter les chroniques des évènements pluvieux qui seront les objets de l'analyse des réponses hydrologiques du bassin. Regardant les figures 15 à 21 il serait visiblement trop long de séparer manuellement chaque précipitation avec sa crue correspondante. Nous avons ainsi utilisé un programme de détection automatisée des évènements, développé au LCPC lors d'une thèse de doctorat (Berthier, 1999).

La recherche d'évènements pluvieux peut être divisée en 2 étapes : la détection de la partie centrale et l'identification du début et de la fin des évènements. Le programme a été initialement créé pour les bassins urbains (Berthier, 1999) et modifié pour l'adapter aux caractéristiques du bassin versant de la Chézine (Priou, 2005).

D'abord le programme cherche parmi les données d'intensité de pluie les pas de temps correspondants aux précipitations d'intensité supérieure à 0.2 mm/h. Ces pas de temps sont incorporés dans la partie centrale d'un évènement si la hauteur totale de pluie dépasse le seuil fixé à 2mm.

Ensuite, le programme cherche le moment où la hauteur d'eau de pluie dans un pas de temps soit inférieure à 0,2mm pour définir la fin et le début de la précipitation. La fin d'évènement est également testée sur le débit. Cette procédure peut être visualisée dans la Figure 22, où les paramètres du programme définissent la partie centrale de l'évènement à partir des données de précipitation.

Après la fin de la partie centrale de la pluie, le programme cherche parmi les données de débits dans les pas de temps suivants une remontée de crue pour définir la fin de l'évènement. Cela est représenté dans la Figure 23.

Face à des évènements dont la variabilité du débit était trop forte pendant la période où la fin d'évènement était cherchée (DT_{finQ} dans la Figure 23), une marge de sécurité a été créée pour ne pas arrêter l'évènement trop tôt. Il y a ainsi une durée de temps après la fin de la pluie où les remontées sont ignorées et, par conséquent, la fin d'évènement ne peut pas être définie.

Enfin, une fois définis le début et la fin d'un évènement pluvieux, le programme calcule certains paramètres qui le caractérisent:

- Pluie totale
- Intensité maximale de pluie
- Débit cumulé
- Débit maximal
- Débit initial
- Débit à la fin de l'évènement
- Durée de l'évènement
- Durée de temps sec précédant l'évènement
- Cumul de pluie pendant le temps sec précédent
- Coefficient d'écoulement
- Durée de pluie

Afin de vérifier la validité de la fonction de transfert obtenue pour les évènements, nous avons choisi quelques évènements typés de manière à faire ressortir les caractéristiques de la réponse du bassin. Nous avons fait le choix en prenant en compte le temps sec précédant, la durée de la pluie, l'intensité maximale et aussi le rapport entre l'intensité maximale et l'intensité moyenne du reste de la précipitation. Afin de trouver les évènements dont les pertes initiales soient négligeables, nous avons limité cette sélection parmi les évènements où le temps sec précédant n'a pas excédé 4 jours. Comme le but est de vérifier

visuellement la réponse à un pic de pluie, nous avons trié les événements dont la durée de pluie est courte (jusqu'à 5h) et le rapport entre intensité maximale et l'intensité moyenne est assez important.

Pour vérifier la fiabilité des résultats du programme, plusieurs hydrogrammes ont été tracés à partir des données de pluie et débit. Les événements qui possèdent une chronique de pluie simples et relativement isolés dans la chronique de précipitation sont bien définis automatiquement. En revanche, un événement de pluie longue et avec une chronique complexe génère une courbe de débit assez difficile à décrire et le choix du programme pour le délimiter n'est pas toujours satisfaisant. Nous avons vérifié tous les événements qui présentaient des valeurs de coefficient d'écoulement trop faibles ou trop fortes afin de les corriger.

Deux exemples d'événements mal détectés par le programme sont ceux du 20 et 21 mars 2001 (Figure 24). Dans les deux cas, la réponse du bassin a été beaucoup plus lente que d'habitude. Plus de 5h sont passées entre le pic de pluie et le pic de débit alors que, en générale, le temps entre les pics ne dépassent pas 2h. Par conséquent, la fin de l'évènement du 21/03/01a été définie pendant la montée du débit. La logique du programme pour les événements de la Chézine n'est pas simple car elle doit trouver un compromis entre bien séparer les pluies qui parfois se succèdent assez vite et prendre en compte la décrue qui est souvent lente pour ce bassin. Même avec cette contradiction, les résultats sont satisfaisants pour la plupart des événements et les exceptions sont rares et facilement traités au cas par cas.

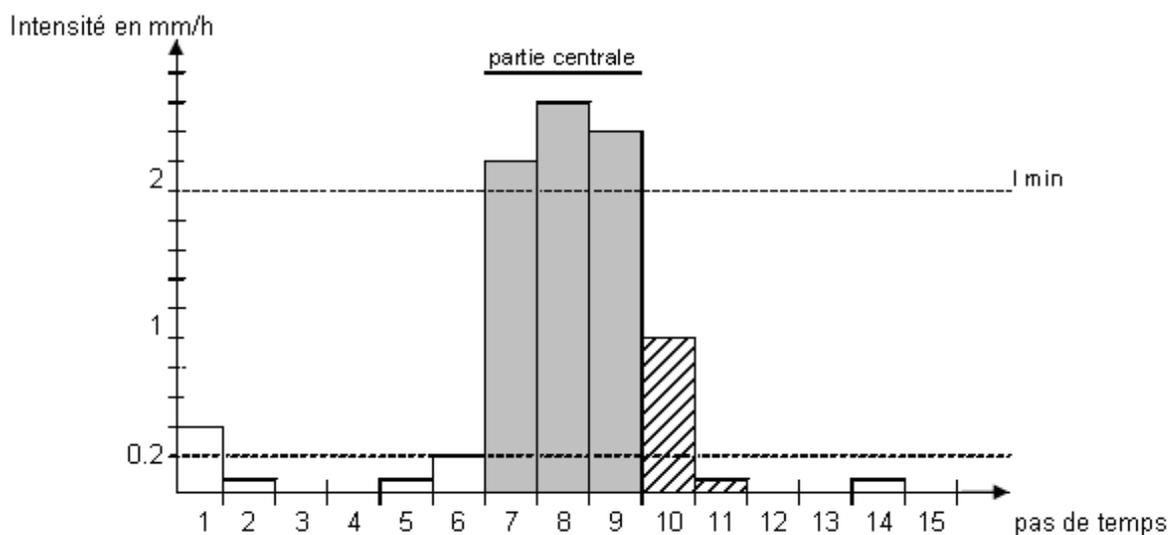


Figure 22. Principe de détection de la pluie (Mosini, 1999)

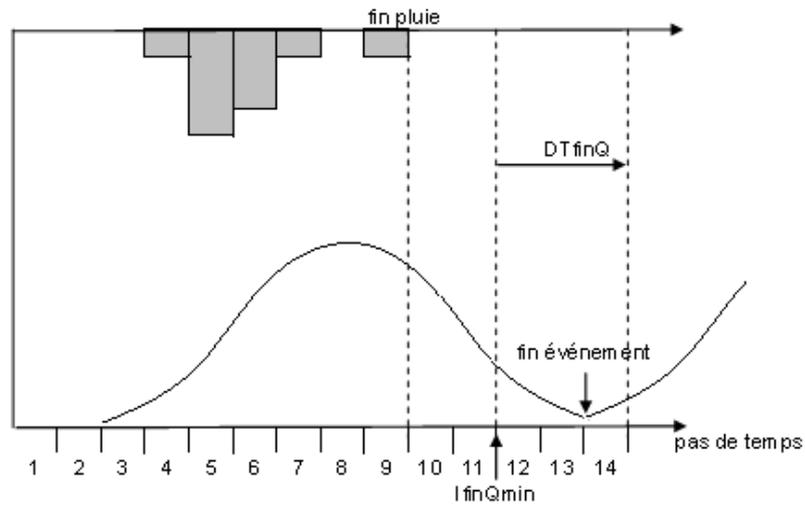


Figure 23: Principe de détection de la fin d'évènement (Mosini, 1999)

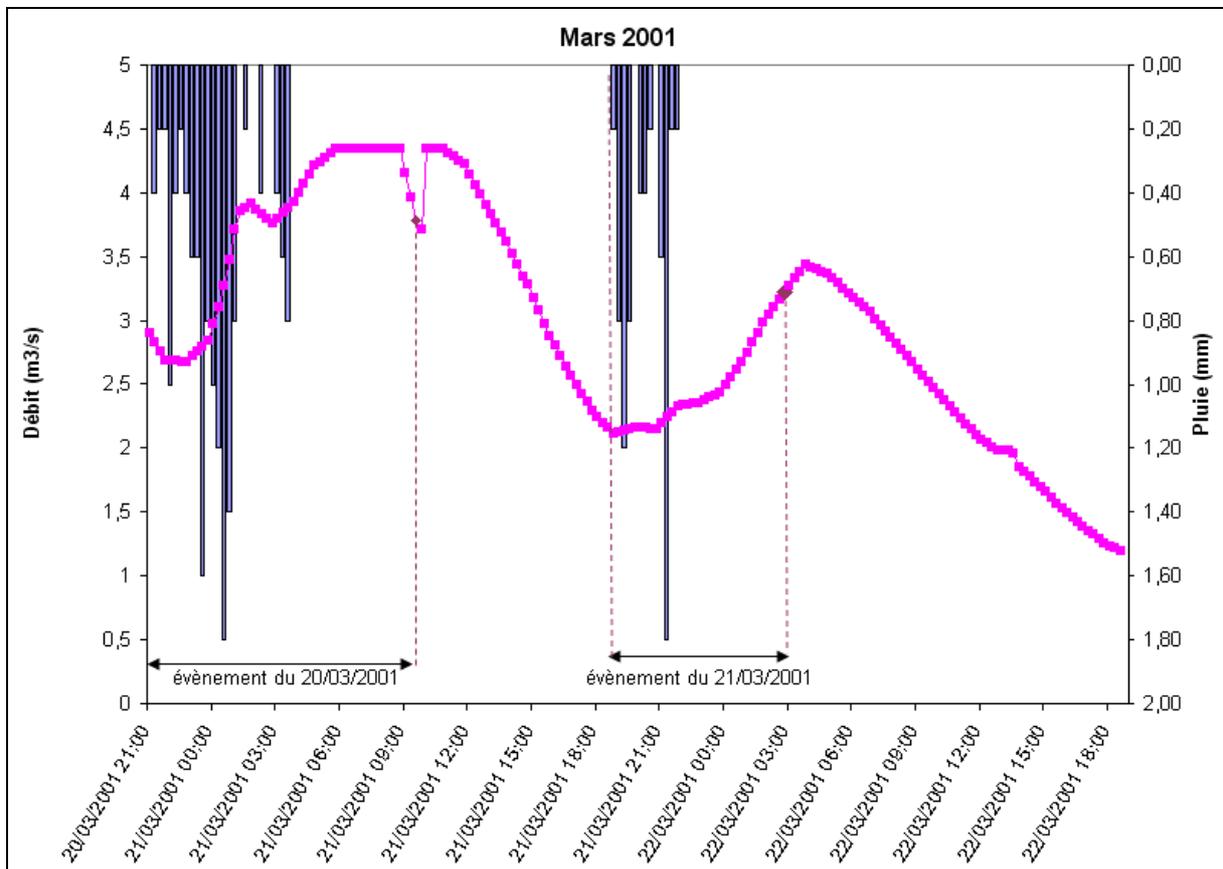


Figure 24. Evènements mal détectés par le programme de détection automatique

2.4 Résultats

Le programme a détecté 330 évènements pluvieux pour la période de 2001 à 2007, mais nous n'en avons gardé que 295 car les autres présentaient des défauts dus à la détection ou les données de hauteur d'eau étaient erronées.

Les paramètres qui résultent de la détection d'évènements ont été analysés à travers plusieurs études de corrélation, tendances et variations selon la saison. Les résultats qui contribuent visiblement à la compréhension du fonctionnement du bassin sont le coefficient d'écoulement et le débit de base.

2.4.1 Coefficient d'écoulement évènementiel

Le coefficient d'écoulement évènementiel permet de quantifier le rendement du bassin lors d'un évènement pluvieux. C'est le rapport entre le volume d'eau écoulée à l'exutoire et le volume d'eau précipitée dans le bassin.

$$C_e = \frac{\text{Volume cumulé à l'exutoire pendant l'évènement (m}^3\text{)}}{\text{Pluie cumulée pendant l'évènement (m)} \times \text{Surface du bassin versant (m}^2\text{)}}$$

Pour calculer le coefficient d'écoulement évènementiel, le volume d'eau lié au débit de base a été soustrait au volume cumulé à l'exutoire, car il s'agit de l'eau déjà présente avant l'évènement. Dans ce calcul, le débit de base correspond au débit le plus faible entre les débits initial et final (Figure 25).

Le coefficient d'écoulement moyen sur la période de 2001-2007 (2005 exclu) est de 0,10 mais il est visiblement variable selon la saison. La Figure 26 montre l'évolution temporelle des valeurs des coefficients d'écoulement calculés pour les évènements pluvieux de la période 2001 à 2007. Il est déjà possible d'observer une variation saisonnière. La distribution des coefficients d'écoulement est représentée sur l'histogramme de la Figure 27. La plupart des évènements (77%) possèdent un coefficient plus faible que 0,12.

Nous nous intéressons aussi à la variation mensuelle de la moyenne des coefficients d'écoulement représentée dans la Figure 28 avec les écart-types respectifs. Les valeurs sont nettement plus importantes pendant les mois d'hiver que pendant les mois d'été.

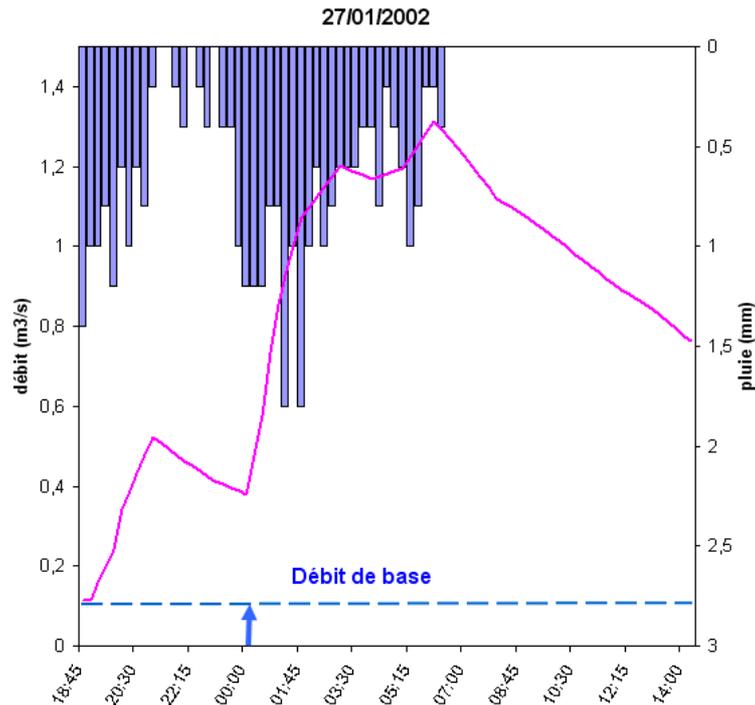


Figure 25. Hydrogramme de l'évènement pluvieux du 27/01/2002

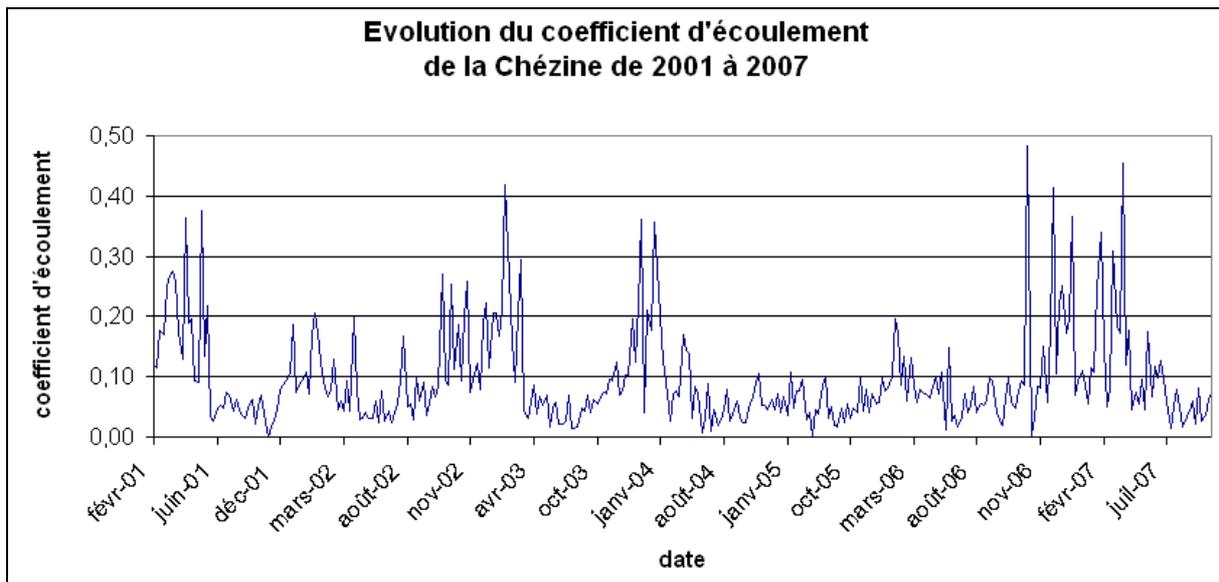


Figure 26. Coefficient d'écoulement des évènements pluvieux de la période 2001-2007

La tendance de trouver des valeurs de coefficient d'écoulement plus faibles en été et plus fortes en hiver avait déjà été mise en évidence par l'analyse des données de 2001 à 2004 (Priou, 2005). La Figure 29 confirme cette tendance pour l'analyse étendue jusqu'à 2007. Le coefficient d'écoulement moyen pendant l'été (0,05) est visiblement plus faible que la moyenne en hiver (0,16). En revanche, les écart-types trop importants révèlent une grande

hétérogénéité de ces sous-groupes d'évènements séparés par saison, ce qui nous a dissuadés d'adopter cette division pour la caractérisation du comportement hydrologique du bassin.

Nous avons ainsi regardé également l'influence de la période de temps sec précédant chaque évènement pluvieux. La Figure 30 montre que toutes les valeurs de coefficient d'écoulement sont inférieures à 0.3 pour les évènements dont la période sèche précédente est supérieure à 10 jours. Il est possible d'observer aussi que tous les évènements avec un coefficient d'écoulement supérieur à 0.3 possèdent une période de temps sec inférieure à 2 jours et demi. Cela montre que l'état hydrique du bassin a en effet une grande influence sur sa réponse hydrologique. En effet, lorsque le sol est très sec avant un évènement pluvieux une partie plus importante de la pluie est stockée, ce qui diminuera le volume de pluie efficace. Par contre, le paramètre est difficilement utile pour caractériser la réponse du bassin étant donné que les évènements avec une durée de temps sec de moins de 5 jours présentent des valeurs très variables de coefficient d'écoulement (variant de 0 à 0.7) et aussi parce que les coefficients d'écoulement inférieurs à 0.1 peuvent avoir une durée de temps sec précédant variant de 0 à 55 jours.

Les saisons et la durée de temps sec précédant influencent la réponse du bassin mais il fallait trouver un paramètre ayant un rapport plus direct avec le coefficient d'écoulement. Le paramètre qui caractérise assez bien l'état hydrique du bassin et montre une bonne corrélation avec les coefficients d'écoulement est le débit de base.

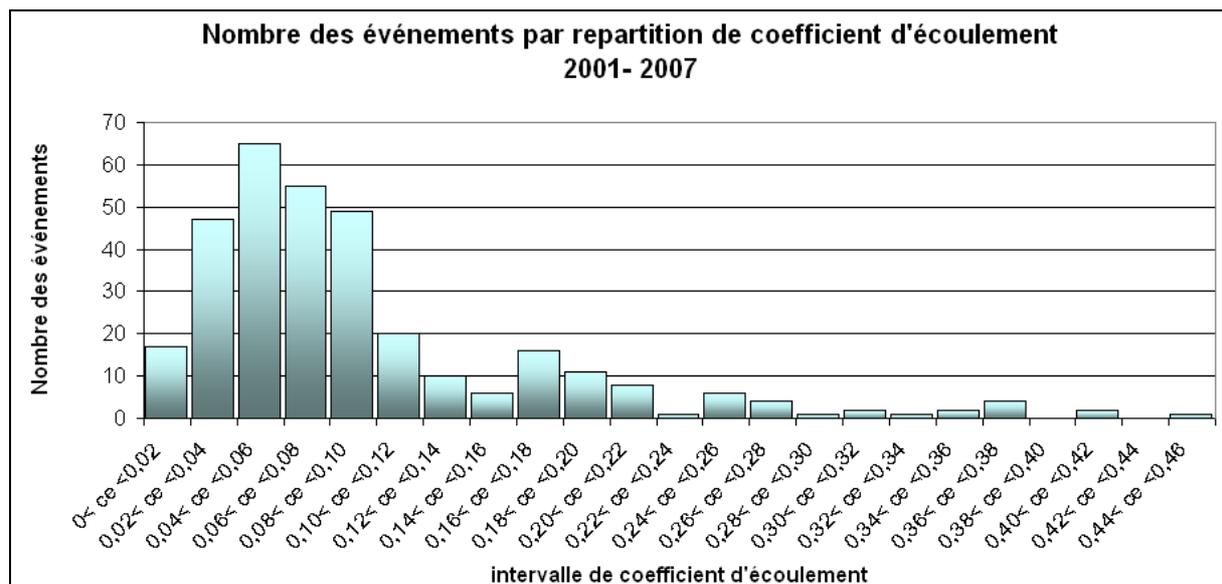


Figure 27. Distribution des valeurs de coefficient d'écoulement pour la période de 2001 à 2007

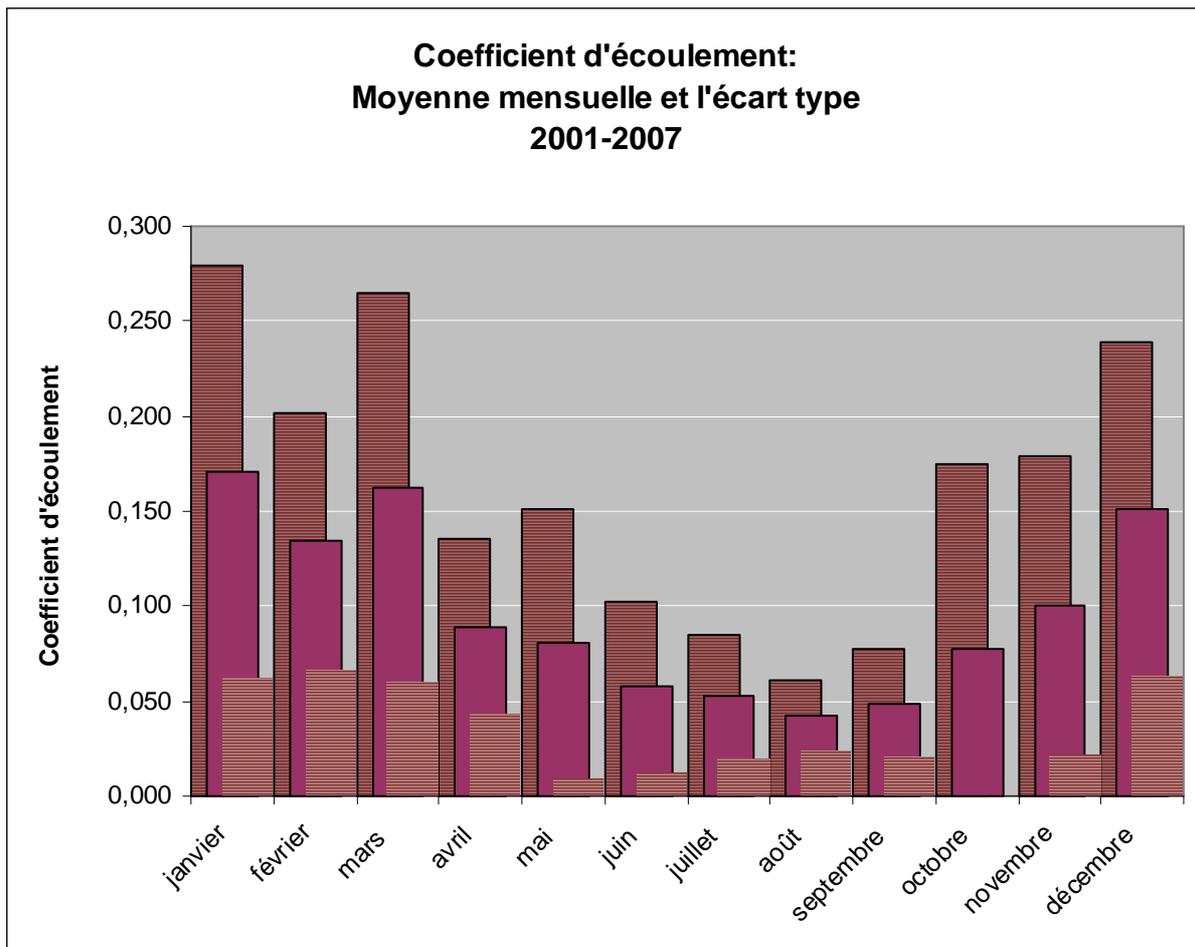


Figure 28. Moyenne des coefficients d'écoulement mensuel et les écart-types en rouge foncée

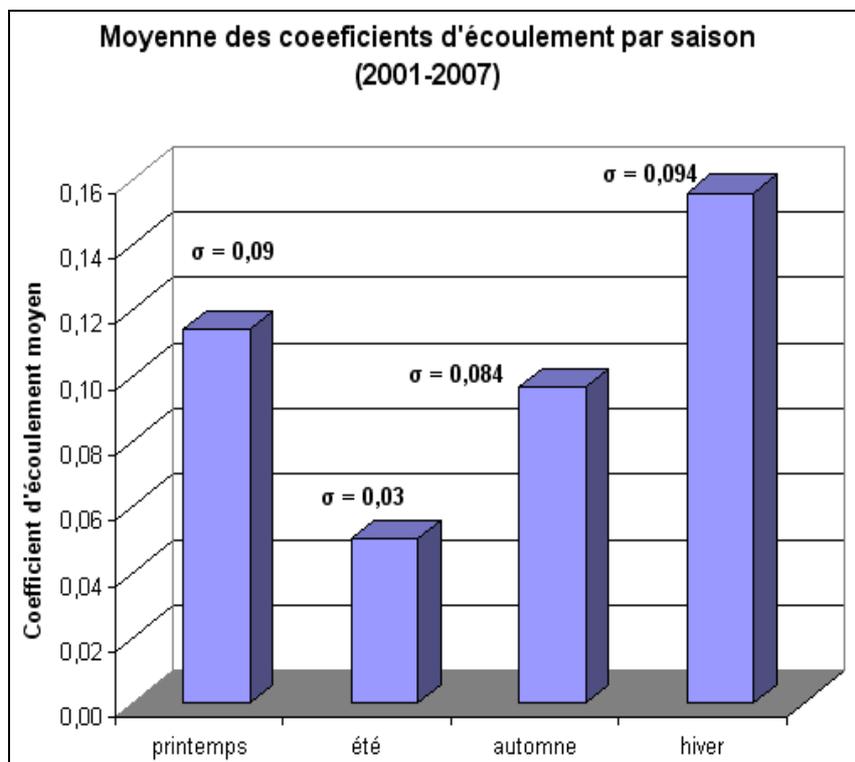


Figure 29. Moyenne des coefficients d'écoulement par saison

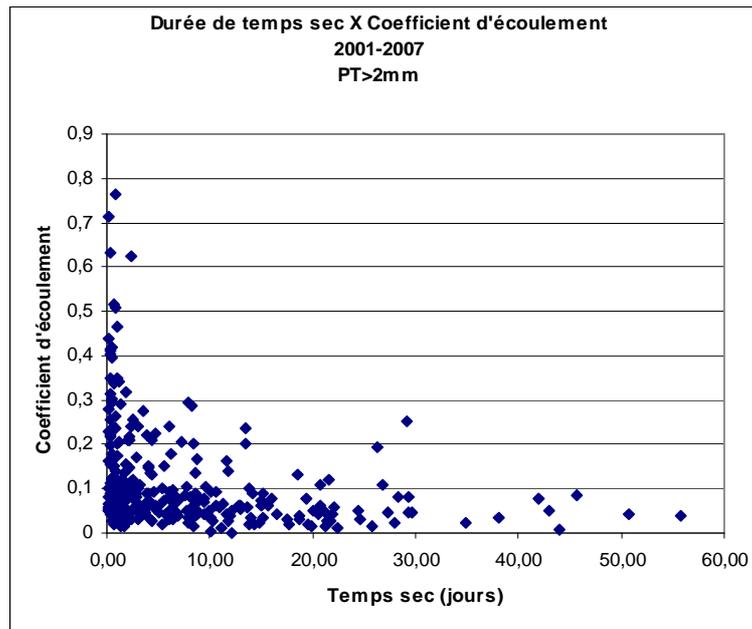


Figure 30. Variation du coefficient d'écoulement en fonction de la durée de temps sec précédant à l'évènement pluvieux

2.4.2 Débit de base

Le débit de base est souvent considéré comme un indicateur de l'état hydrique du bassin versant. La Figure 31 permet d'observer la variation de la moyenne des débits de base observés chaque mois pendant les années 2001 à 2007. Si l'on compare la Figure 28 avec cette dernière, nous trouvons une tendance similaire, ce qui nous amène à chercher une possible corrélation entre ces deux paramètres. La relation entre le coefficient d'écoulement et le débit de base est confirmée par le coefficient R^2 de 0.62 entre les deux variables (Figure 32).

Le coefficient d'écoulement événementiel est représentatif de l'étendu de zone contributive d'un bassin versant durant un évènement pluvieux. La réponse hydrologique du bassin augmente à mesure que les sols perméables atteignent la saturation. Cela nous amène à faire une première hypothèse de fonctionnement du bassin : quand le débit de base est faible, les surfaces contributives sont essentiellement les zones imperméabilisées (urbanisées). Au contraire, pour les évènements avec un débit de base plus important, il faut prendre en compte aussi les surfaces rurales saturées.

Dans le but de trouver une logique de comportement du bassin en fonction de ces différences mises en évidence dans l'analyse hydrométéorologique, cette partie est conclue par une division des évènements en deux groupes selon leur état hydrique initial :

- Les évènements d'état hydrique sec, dont le débit de base est inférieur à 0.2 m³/s
- Les évènements d'état hydrique humide avec un débit de base supérieur ou égal à 0.2 m³/s ;

La Figure 33 montre que la moitié des évènements de type « sec » possèdent ses coefficients d'écoulement entre 0.04 et 0.08 et 80% ont leur coefficient entre 0.03 et 0.10. C'est un groupe avec une réponse assez homogène puisque les coefficients d'écoulement sont en général proches de la moyenne (0.06). En revanche, le groupe des évènements de type « humide » sont bien plus hétérogènes. 50% des évènements de ce deuxième groupe ont des coefficients d'écoulement qui varient entre 0.11 et 0.25. Cette différence d'homogénéité se reflétera aussi dans le moment de choisir la surface contributive pour la fonction de transfert de chaque groupe. Elle sera considérée comme constante pour les évènements « secs » mais variable pour les « humides ».

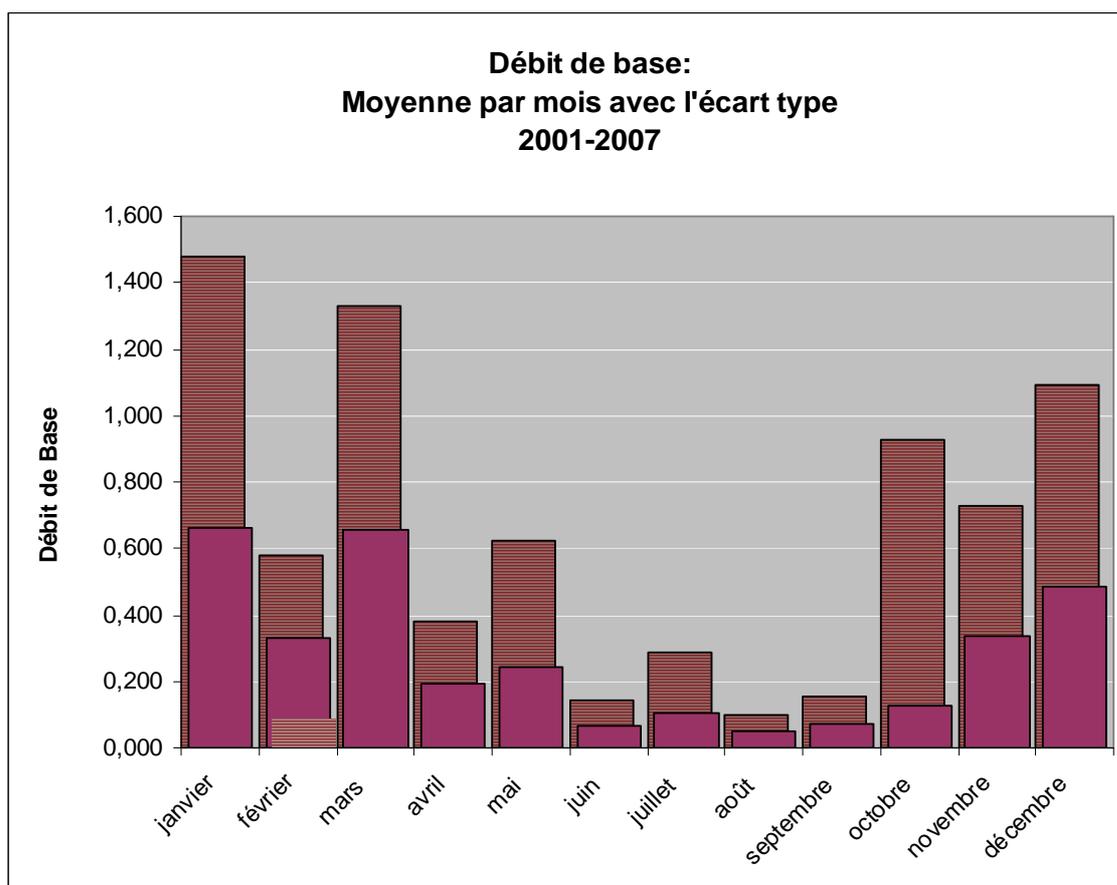


Figure 31. Moyenne mensuelle des débits de base

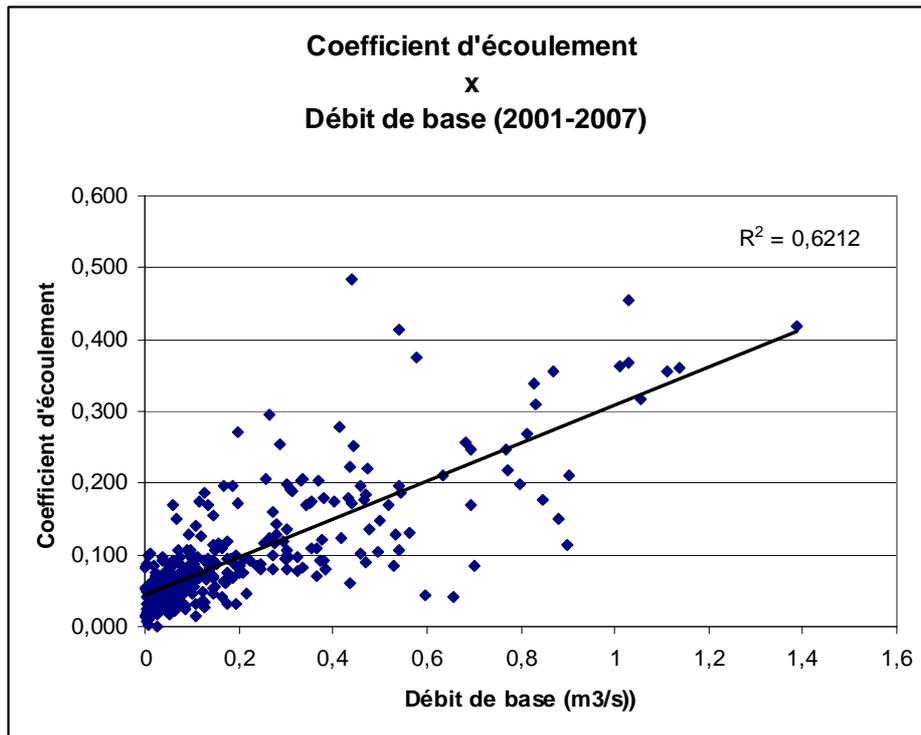


Figure 32. Coefficient d'écoulement en fonction du débit de base

Division des événements selon l'état hydrique du bassin

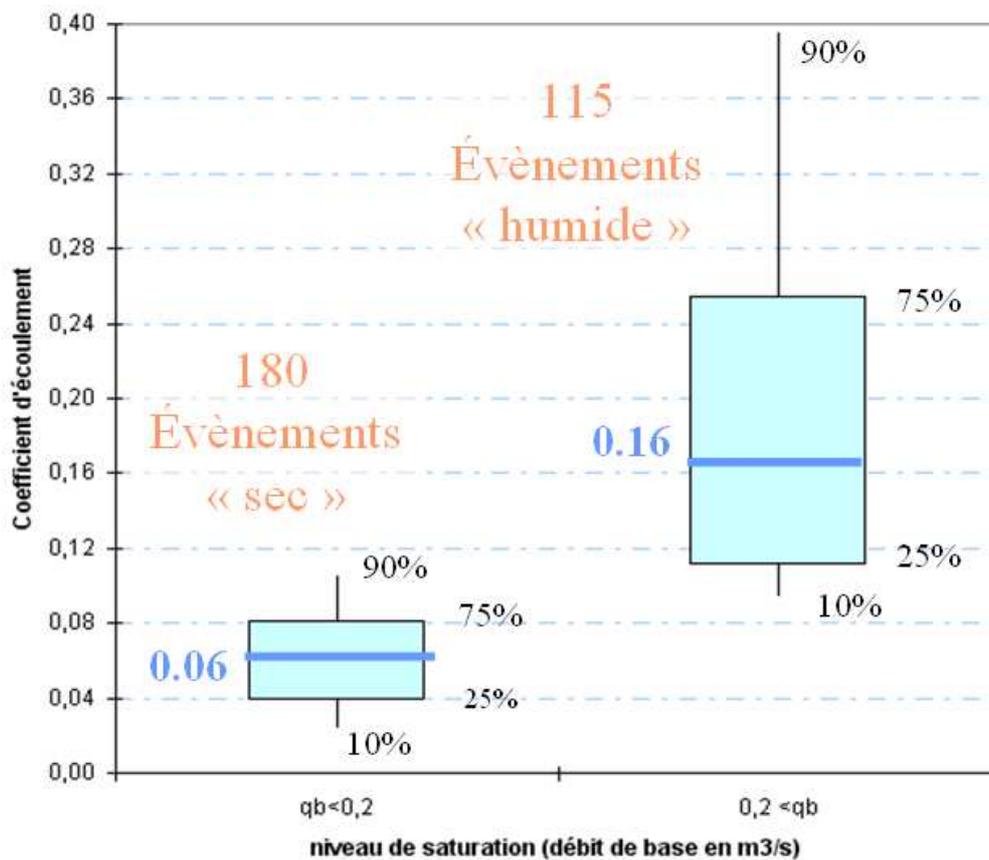


Figure 33. Sous-groupes d'événements selon l'état hydrique du bassin.

3 Analyse géomorphologique

Dans l'optique d'expliquer les phénomènes dynamiques observés dans l'analyse des données hydrométriques nous allons poursuivre par le traitement et l'analyse des données géomorphologiques.

Plusieurs couches d'informations géographiques ont été fournies par Nantes Métropole :

- Bâtiments
- Surfacing des voies
- Surfaces d'eau (rivières et fleuves)
- Zones d'occupation du sol
- Modèle Numérique de Terrain (MNT) : *Projection* : Lambert II Centre Paris (ou Lambert Zone II) ; *Pas d'espace* : 20 mètres)

Nous avons mentionné auparavant dans la présentation de la fonction de transfert (Cf.1.4 *Introduction à la modélisation hydrologique*) les principales étapes du traitement du Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour en extraire le réseau hydrographique et en dériver la fonction de transfert. Dans cette section, nous allons décrire l'application de cette méthodologie sur le bassin versant de la Chézine. Dans un deuxième temps, nous allons expliquer la méthode utilisée pour différencier les pixels imperméabilisés des pixels ruraux ou naturels. Enfin, les résultats de ces traitements serviront de base pour l'analyse morphologique qui sera présentée à la fin de cette section.

3.1 Traitement des données géo-référencées

Le Modèle Numérique de Terrain représente la topographie à l'aide d'un maillage où on retrouve une valeur d'altitude par pixel. La Figure 34 montre l'image du raster du MNT visualisé avec OrbisGIS. Dans le but de déterminer le réseau hydrographique, le traitement du MNT s'est déroulé suivant les étapes décrites dans la section 1.4.1.

Tout d'abord le MNT est transformé dans une maille de 20m par 20m et un lissage de surface a corrigé les pixels qui avaient des valeurs d'altitude aberrantes par rapport à leurs pixels voisins.

Les cheminements sont tracés selon l'algorithme D8 (O'Callaghan et Mark, 1984) et le bassin versant a été défini à partir de son exutoire, qui correspond à la station hydrométrique dans le parc de Procé (Figure 35). L'aire drainée pour chaque pixel est

calculée en fixant une valeur minimale de 1 pixel, soit 400m^2 . La valeur maximale obtenue dans le bassin est de 72544 pixels ou 29km^2 , à son exutoire.

Ensuite nous avons distingué les pixels « rivière » des pixels « versant » dans le bassin en extrayant le réseau hydrographique. Pour cela, nous avons comparé visuellement le cours d'eau obtenu à partir des valeurs de seuil arbitraires avec celui représenté sur les cartes topographiques IGN du bassin. Le résultat obtenu pour un seuil de 1000 pixels, ou 0.4km^2 peut être visualisé dans la Figure 36.

Nous avons ainsi calculé la distance de chaque pixel à l'exutoire. Nous avons également dérivé une fonction qui calcule les distances du parcours en versant et en rivière, pour permettre d'attribuer une vitesse d'écoulement différente dans ces deux milieux.

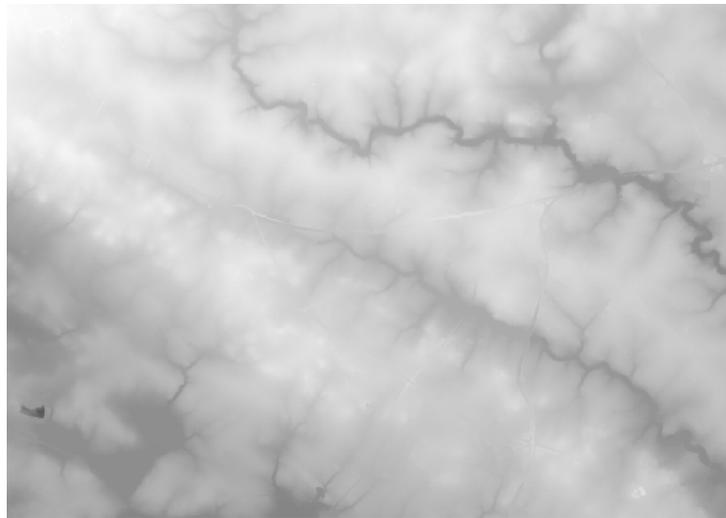


Figure 34. Représentation d'une partie du Modèle Numérique de Terrain (MNT) fourni par Nantes Métropole

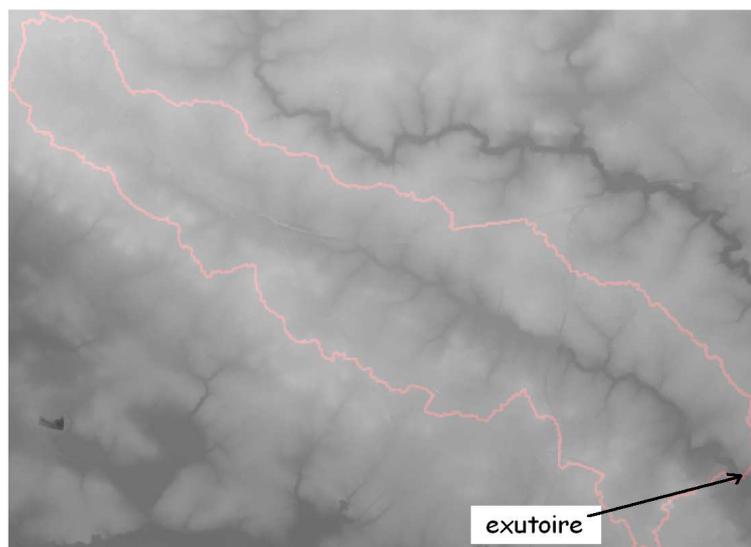


Figure 35. Dlimitation du bassin versant à partir des coordonnées de son exutoire

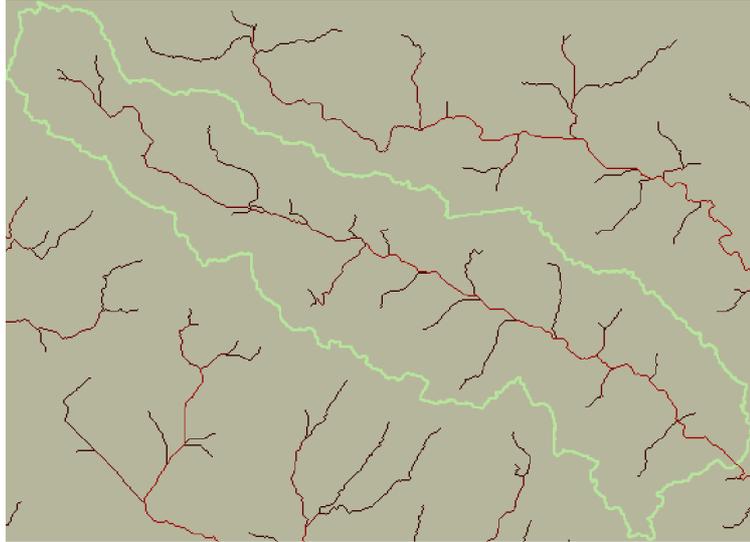


Figure 36. Définition des pixels qui forment la rivière. L'accumulation utilisée a été de 1000 pixels.

3.2 Définition des mailles imperméabilisées du bassin versant

Dans l'optique de prendre en compte les surfaces urbaines dans la modélisation, les mailles imperméabilisées du bassin versant ont du être définies. La partie de chaque maille interceptée par des surfaces de voiries ou des bâtiments a été considéré dans le pourcentage d'imperméabilisation calculé.

La Figure 37 montre une partie du MNT intercepté par les voiries (en gris) et les bâtiments (en orange). La vue de l'ensemble est présentée dans la Figure 38, où on y trouve le cours d'eau en bleu, les limites du bassin en noir, les bâtiments en gris et les routes en orange.

Le total de surfaces imperméabilisées dans le bassin est ainsi évalué à 18%.



Figure 37. Intersection des mailles du MNT et les couches de bâtiments (en orange) et surfaciques de voies (en gris)

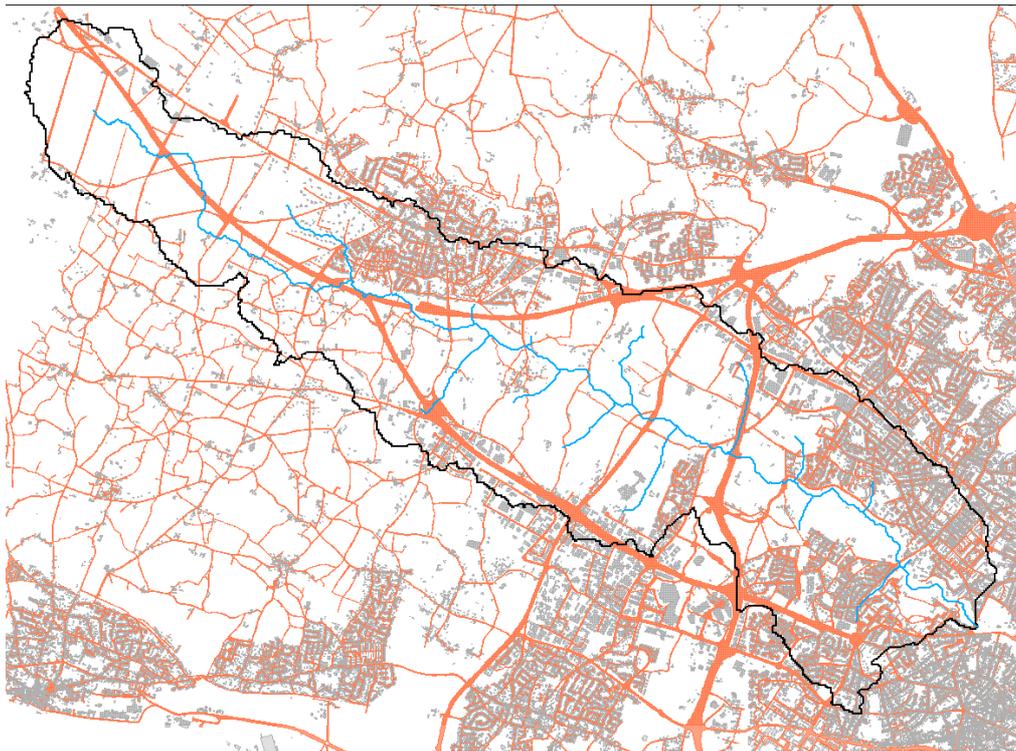


Figure 38. Représentation des zones imperméabilisées du bassin versant de la Chézine.

3.3 Analyse morphologique

Maintenant que nous avons rassemblé toutes les informations cartographiques nécessaires, nous pouvons commencer l'analyse morphologique du bassin versant.

La fonction largeur $W(x)$ « Width Function » (Rodriguez-Iturbe, I., et Rinaldo A., 1997), souvent considérée comme une approximation de la fonction de transfert est définie par le nombre de mailles du réseau de drainage à une distance x de l'exutoire. Pour la Chézine la fonction largeur est représentée dans la Figure 39.

Comme nous avons séparé les événements pluvieux de type sec de ceux de type humide et que nous faisons l'hypothèse que seules les surfaces imperméabilisées participent au ruissellement de surface des événements de type sec, nous pouvons appliquer la fonction largeur aux seules mailles imperméabilisées. On parle alors de fonction d'imperméabilisation (*Imperviousness Function*, Gironas J., 2007), Figure 40

Il est possible d'identifier les agglomérations qui correspondent à chaque pic du graphique de la fonction d'imperméabilisation. Dans un rayon d'environ 2500m, centré sur la station hydrométrique, se trouve la portion nord-ouest de Nantes. Ensuite la ville de St. Herblain peut être localisée à une distance d'à peu près 4000m. Enfin, plus en amont du bassin, Sautron correspond au troisième pic (Figure 41).

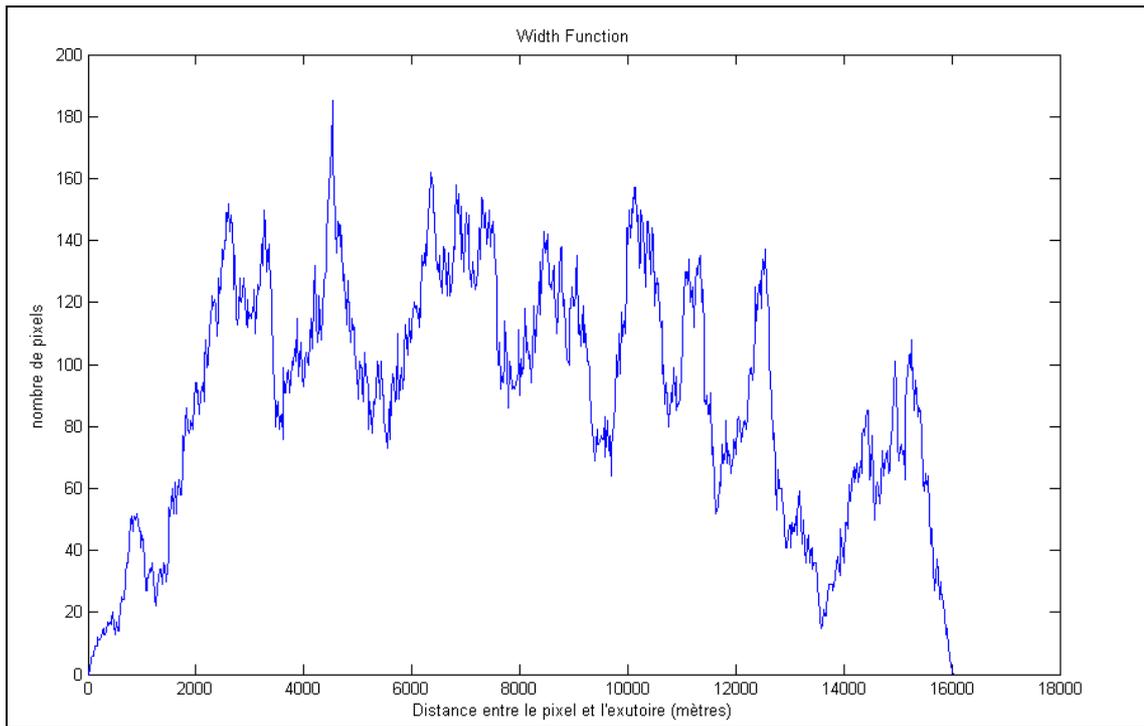


Figure 39. Width Function du bassin versant de la Chézine

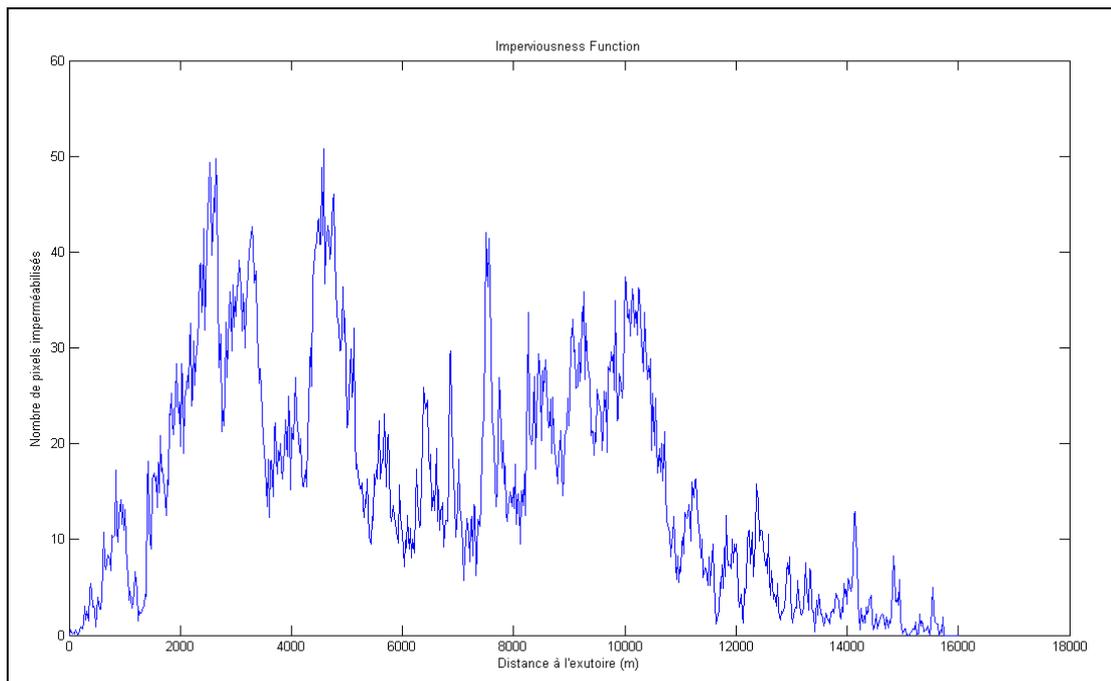


Figure 40. Imperviousness Function

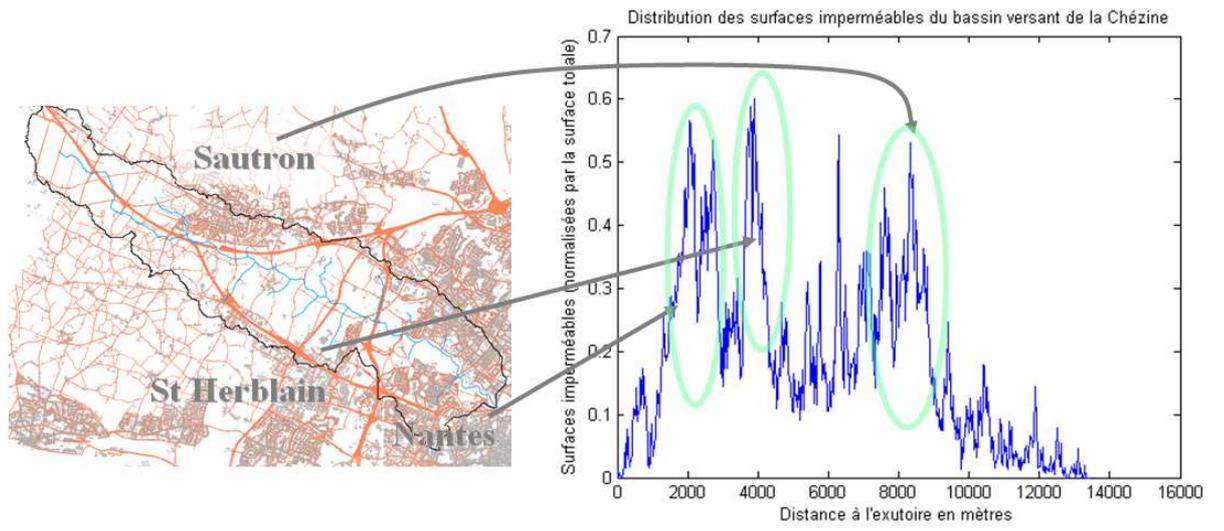


Figure 41. Localisation des surfaces imperméabilisées et les agglomérations correspondantes

4 Détermination des fonctions de transfert

Suite à l'analyse des données, nous pouvons maintenant déterminer dans une première approche des fonctions de transfert pour le bassin versant de la Chézine.

La stratégie adoptée est de partir d'hypothèses simples pour approcher la dynamique du bassin, en utilisant les résultats précédemment trouvés lors de l'analyse des données hydrométéorologiques et de l'analyse géomorphologique du bassin. Ensuite en fonction des résultats obtenus, nous raffinons les hypothèses.

Les hypothèses suivantes sont admises pour une première approche:

Pour les événements d'état hydrique sec

- la réaction de la partie rurale est négligeable (seules les surfaces imperméables contribuent au ruissellement)
- La partie urbaine se caractérise par un coefficient d'écoulement constant de 0.06. Cette hypothèse est basée sur le fait que ce groupe des événements de type secs a un coefficient d'écoulement assez uniforme, centré sur un coefficient moyen de 0.06, avec un écart-type de 0.03.

Pour les événements d'état hydrique humide

- La partie urbaine se caractérise toujours par un coefficient d'écoulement de 0.06
- La partie rurale participe au ruissellement selon la théorie des zones contributives
- La proportion de surfaces contributives dans la partie rurale varie d'un événement à l'autre
- L'étendue des zones contributives varie très peu durant les événements pluvieux ordinaires.

L'application de ces hypothèses est présentée dans les deux parties suivantes qui traitent successivement des événements d'état hydrique sec et des événements d'état hydrique humide, tels que définis dans § 2.4.2.

4.1 Etude de la réponse du bassin en état hydrique sec

L'eau qui précipite sur les surfaces imperméables ne ruisselle pas totalement. Une fraction de la pluie est interceptée et stockée dans les dépressions du terrain. Une autre partie retourne à l'atmosphère via le phénomène d'évapotranspiration. Il s'agit de la fonction de production, mentionnée dans § 1.4. Comme ce travail est consacré à l'étude de la fonction de transfert, nous avons calculé la pluie nette de manière simplifiée, afin de nous permettre de comparer les courbes de débit observé avec les résultats obtenus à partir de la fonction de transfert géomorphologique.

Ainsi, pour les événements d'état hydrique sec, lors que 18% de surfaces urbanisées génèrent un coefficient d'écoulement de 0,06, il a été considéré que seul 1/3 des ces surfaces contribue réellement au ruissellement. Cette pluie nette est ensuite transférée en affectant une vitesse constante en rivière et une vitesse constante sur versant.

Notre choix de vitesse initiale est basé sur l'observation de la réponse des événements dont la pluie ne présente qu'un pic bien marqué et de courte durée, comme celui du 17 octobre 2007 (Figure 45). Le temps de réponse observé étant d'environ 1h15 et considérant que le premier pic de la fonction d'imperméabilisation (*Imperviousness Function*, Cf. §3), se trouve à environ 2.5km de l'exutoire, la vitesse moyenne sera par conséquent de 0.56m/s. Nous avons testé quelques combinaisons de vitesses en rivière et sur versant autour de cette moyenne et considéré les fourchettes de vitesse trouvées dans la littérature (Cf. §1.4) afin de choisir les vitesses de référence.

Ces paramètres de vitesse de référence ont été calés en comparant, à chaque variation de l'un d'eux, le débit simulé et celui mesuré. Cette méthode d'optimisation est appelée méthode du Simplex (J.A Nelder et R. Mead, 1965). Un critère permet de juger de la qualité de l'optimisation : le critère de Nash (Nash et Sutcliffe, 1970).

$$C_{nash} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad \text{eq. 17}$$

Avec : $Q_{obs,t}$ le débit observé à l'instant t
 $Q_{sim,t}$ le débit simulé par le modèle à l'instant t
 \bar{Q}_{obs} la moyenne des débits observés
 n le nombre de pas de temps

Ce critère tient compte de l'écart relatif entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées mais il s'intéresse aussi à la forme globale de la courbe. Plus le critère est proche de un et plus les résultats sont satisfaisants.

Toujours dans l'analyse de l'épisode de référence du 17 octobre 2007, appliquant le test de Nash pour différentes vitesses sur versant et en rivière, entre 0.3 et 0.8m/s, nous avons atteint le meilleur coefficient de Nash de 0.59 pour les valeurs de 0.6m/s en rivière et 0.4m/s en versant. Le résultat de cette simulation est montré dans la Figure 43. Pour ces valeurs de vitesse, l'hydrogramme unitaire, ou la fonction de transfert, obtenu est représenté dans la Figure 45.

Le rapport de volume d'eau ruisselé est caractérisé pour chaque évènement par le coefficient d'écoulement. Nous avons estimé ainsi la vitesse des autres évènements à partir du rapport entre les coefficients d'écoulement, les vitesses de référence et l'équation 9 (Cf.§1.4).

Pour l'évènement du 17 juin 2007 (Figure 44) les vitesses calculées sont de 0,714m/s en rivière et 0,476m/s sur versant et le critère de Nash obtenu pour cette simulation est de 0,68. Nous avons appliqué cette procédure également pour l'évènement du 09 juillet 2002, qui présente un pic de pluie bien marqué. Le critère de Nash du résultat est de 0.65 (Figure 47).

Bien que la décrue ne soit pas bien représentée dans les simulations, l'allure des courbes est assez similaire à celle des débits observés. Nous observons bien les deux pics qui s'expliquent par la réaction des surfaces imperméabilisées de Nantes et Saint Herblain pour le premier pic et celles des surfaces imperméabilisées de Sautron pour le deuxième. Compte-tenu des hypothèses simples que nous avons faites, en particulier concernant la fonction de production, on peut considérer que ces résultats préliminaires pour les évènements d'état hydrique sec sont satisfaisants dans un premier temps.

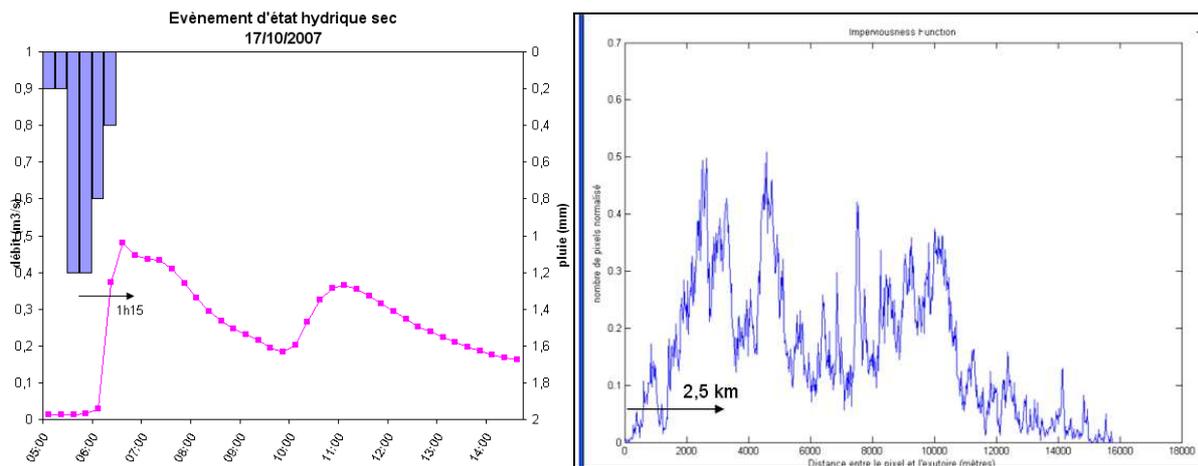


Figure 42. Détermination d'une vitesse de référence (à gauche) à partir d'un évènement typé et de l'Imperviousness function (à droite)

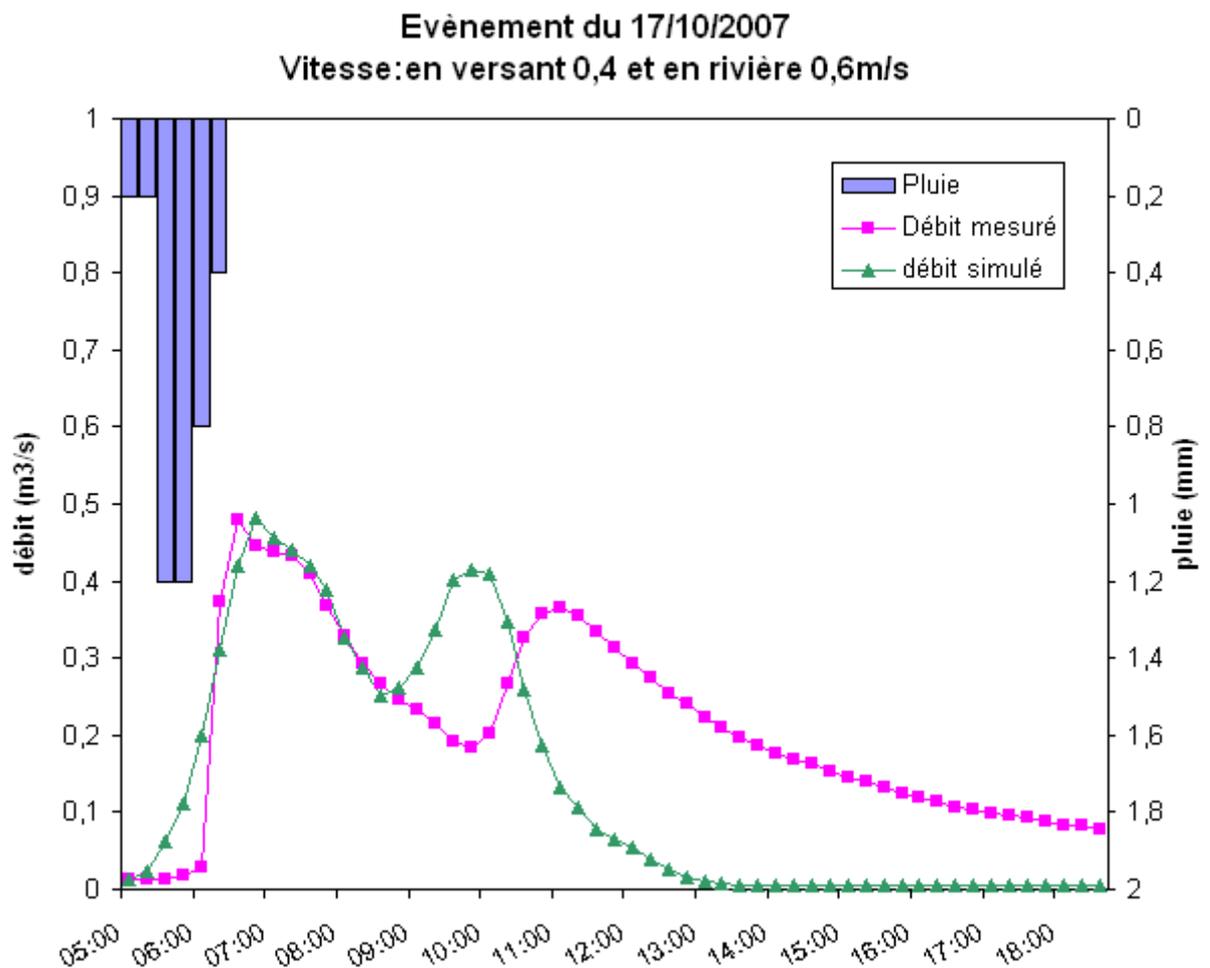


Figure 43. Evènement du 17 octobre 2007

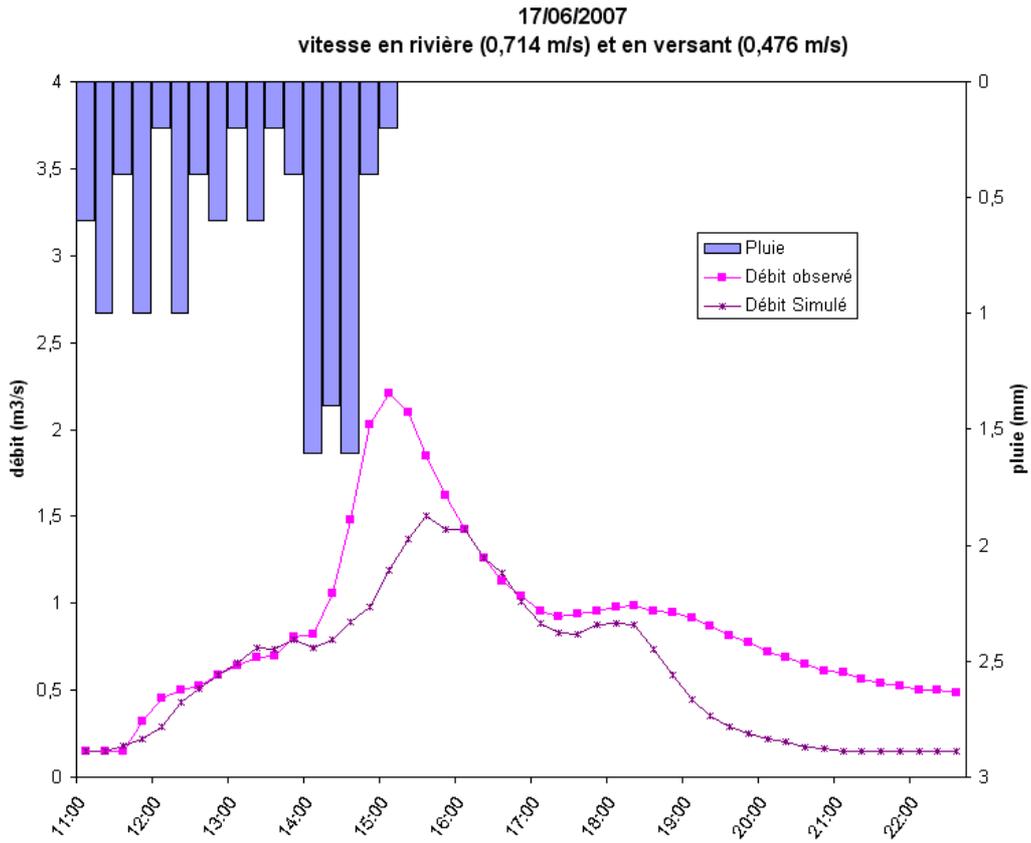


Figure 44.. Evènement du 17 juin 2007. Simulation avec le critère de Nash de 0.68.

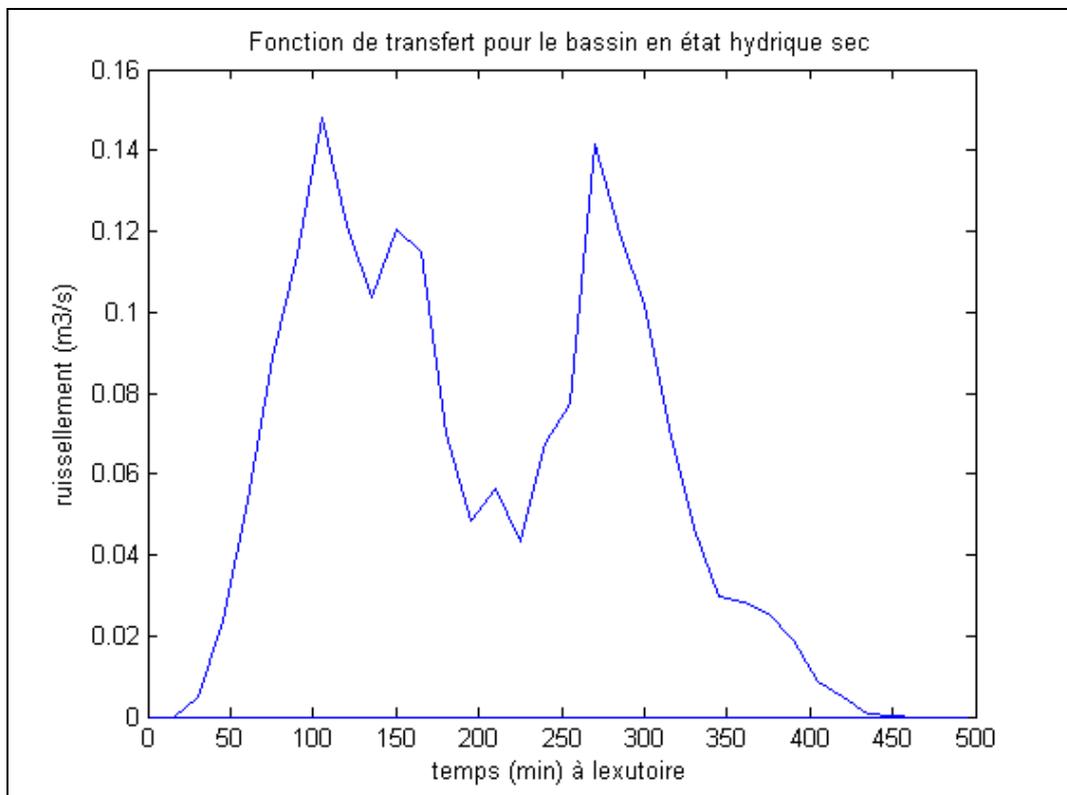


Figure 45. Fonction de transfert, ou Hydrogramme Unitaire, pour les évènements d'état hydrique sec. Vitesse d'écoulement en rivière de 0,6m/s et en versant de 0,4m/s (coefficient d'écoulement de 0,105)

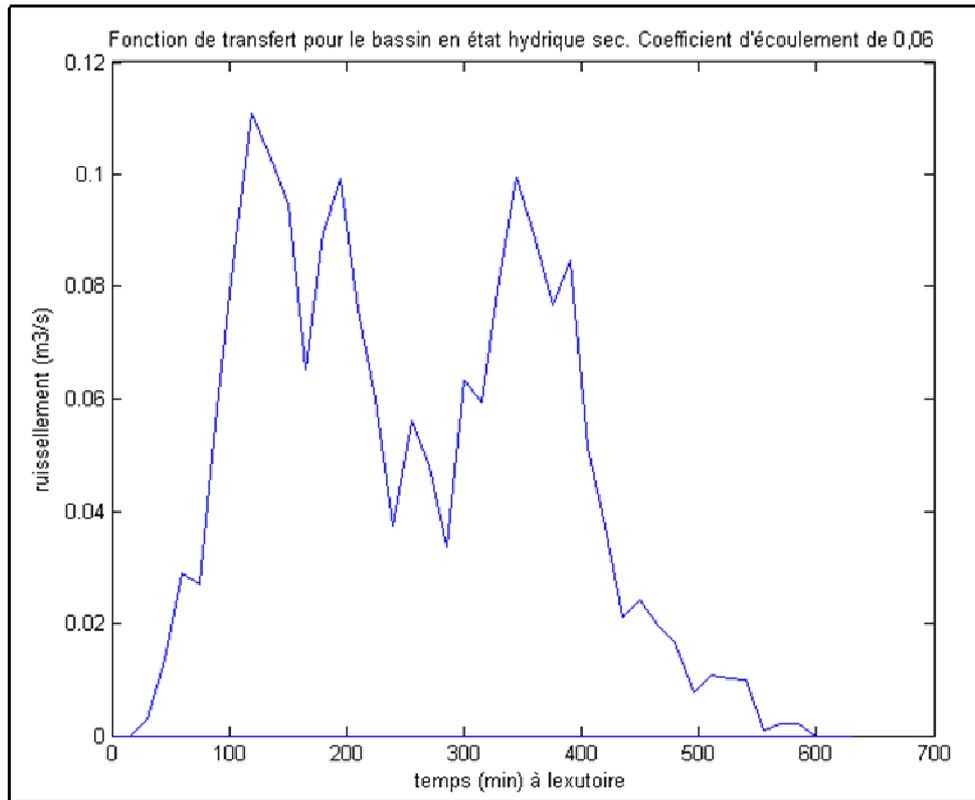


Figure 46. Fonction de transfert, ou Hydrogramme Unitaire, pour les événements d'état hydrique sec. Vitesse d'écoulement en rivière de 0,48m/s et en versant de 0,32m/s (coefficient d'écoulement de 0,06)

Evènement du 09 juillet 2002

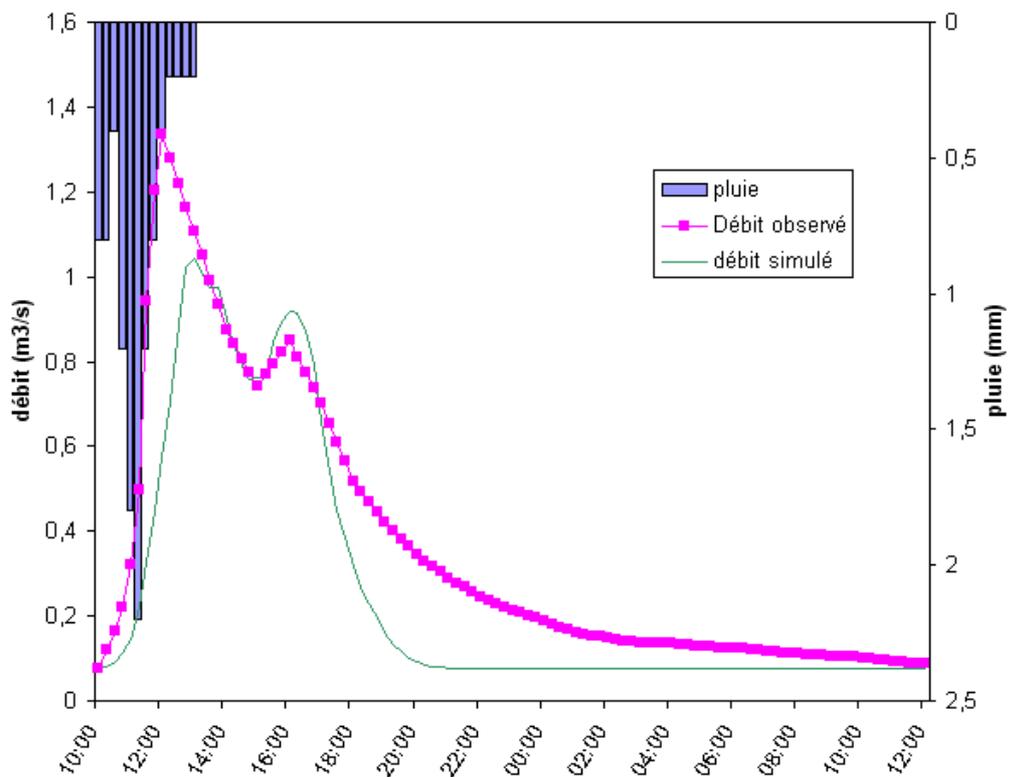


Figure 47. Évènement du 09 juillet 2002. Coefficient de Nash du résultat de la simulation: 0,64

4.2 Etude de la réponse du bassin en état hydrique humide

Dans le but de reproduire la dynamique du bassin versant périurbain en conditions humides lors d'un évènement pluvieux, le volume apporté par la partie rurale a été estimé à partir des valeurs de coefficients d'écoulement.

Nous conservons une contribution au ruissellement des surfaces imperméabilisées de 0,06 selon l'analyse des évènements d'état hydrique sec. Le coefficient de ruissellement rural est obtenu pour chaque évènement en soustrayant la contribution urbaine (0,06) du coefficient d'écoulement total. Cela donne une estimation du pourcentage du bassin versant qui représente la zone contributive rurale qui contribue au ruissellement.

Connaître la proportion des surfaces contributives ne suffit pas. Nous devons aussi les localiser afin de connaître les distances et donc le temps nécessaire à l'eau pour rejoindre l'exutoire.

Pour localiser géographiquement ces surfaces saturées, nous avons utilisé la notion d'indice topographique qui permet de comparer la propension des pixels à se saturer. Notre travail s'appuie sur la base conceptuelle de la génération de ruissellement sur surfaces saturées dites contributives (Cf. §1.4). A partir de la distribution des valeurs des indices topographiques du bassin versant de la Chézine, représentée dans la Figure 48, nous avons déterminé les intervalles de coefficient correspondant à chaque indice topographique seuil, défini comme l'indice topographique minimal pour lequel le pixel est saturé. Donc tous les pixels dont l'indice topographique est supérieur à l'indice topographique seuil participent au ruissellement avec les surfaces imperméables. Le Tableau 5 montre la relation entre les classes de valeurs de coefficient d'écoulement des évènements de type humide et les indices topographiques seuils correspondants.

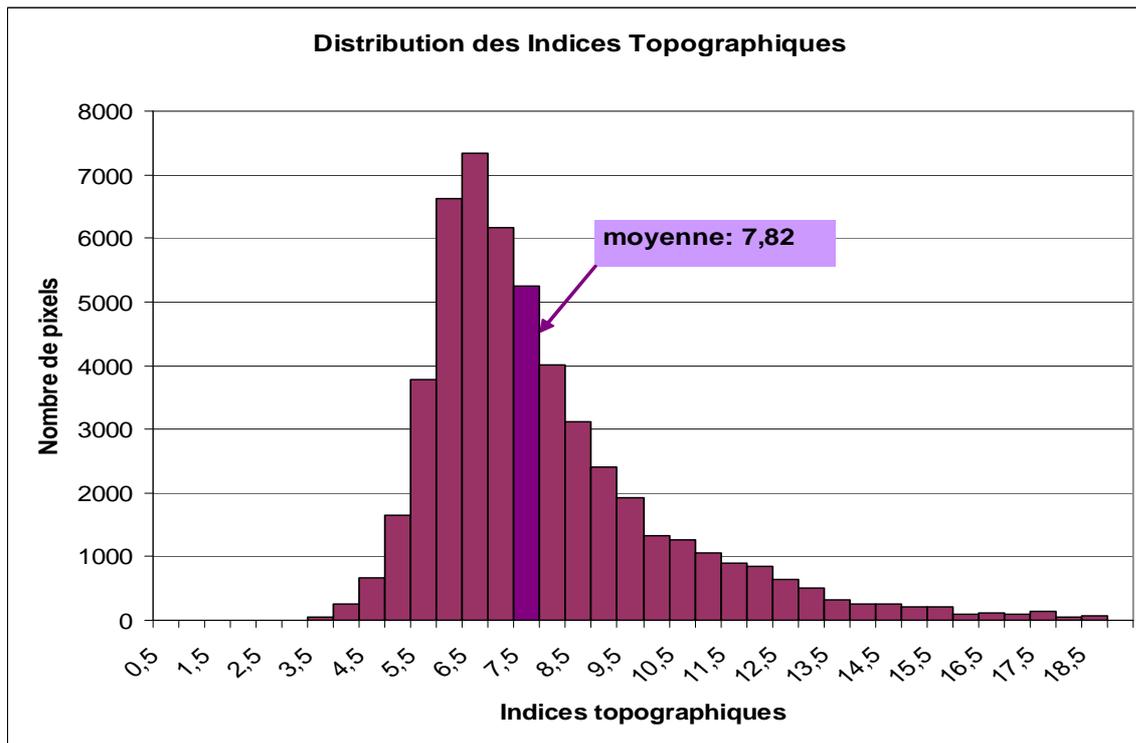


Figure 48. Distribution des valeurs des Indices Topographiques de la zone rurale du bassin versant

Tableau 5. Relation entre les coefficients d'écoulement, les pixels saturés dans la partie rurale et l'Indice Topographique Seuil correspondant

Intervalles de Coefficient d'écoulement	Pixels Ruraux Saturés	Indices Topographiques Seuil
0,540 < Coeff	34845	4
0,538 < Coeff <0,540	34725	4,5
0,533 < Coeff <0,538	34295	5
0,517 < Coeff <0,533	33200	5,5
0,484 < Coeff <0,517	30808	6
0,424 < Coeff <0,484	26414	6,5
0,349 < Coeff <0,424	21001	7
0,286 < Coeff <0,349	16408	7,5
0,232 < Coeff <0,286	12471	8
0,190 < Coeff <0,232	9441	8,5
0,158 < Coeff <0,190	7099	9
0,134 < Coeff <0,158	5353	9,5
0,115 < Coeff <0,134	3999	10
0,102 < Coeff <0,115	3061	10,5
0,093 < Coeff <0,102	2403	11
0,086 < Coeff <0,093	1893	11,5
0,081 < Coeff <0,086	1523	12
0,077 < Coeff <0,081	1228	12,5
0,074 < Coeff <0,077	1010	13
0,071 < Coeff <0,074	816	13,5
0,069 < Coeff <0,071	623	14
0,067 < Coeff <0,069	509	14,5
0,065 < Coeff <0,067	396	15
Coeff <0,065	0	15,5

Une fois déterminés le nombre de pixels ruraux saturés et leur localisations pour un évènement donné, nous les ajoutons au tiers des surface urbaines et affectons des vitesses suivant la même procédure adoptée pour les évènements de type « sec ». Cependant, nous avons maintenant des écoulements sur versant sur surfaces imperméabilisées et sur surfaces végétalisées. Il est probable que les vitesses sur ces deux types de surface diffèrent. Ainsi, sur versant, nous affectons une vitesse différente entre les mailles imperméabilisées et les mailles rurales. De plus, comme la montée de débit est plus importante pour les évènements d'état hydrique humide, nous pouvons imaginer que la différence entre les vitesses en rivière en amont et vers l'aval soit plus prononcée. Pour cette raison, nous appliquons une correction qui augmente la vitesse en rivière à partir du milieu du bassin, considérant que le débit dû au ruissellement augmente vers l'aval. A partir de la proportion (eq.9) dérivée de la formule de Manning- Strickler (Cf. §1.4) et supposant que le débit soit presque deux fois plus importante en aval, cette correction est estimée à 30%.

Nous avons réalisé le calage des vitesses, comme pour l'évènement de référence pour les épisodes de type « sec ». L'évènement choisi comme référence pour les vitesses des évènements humides est celui du 01 janvier 2007, qui possède un coefficient d'écoulement de 0.13. Pour une vitesse en rivière de 0.5m/s, sur versant rural de 0.03m/s et sur versant urbain (imperméabilisé) de 0.3m/s, nous avons un critère de Nash de 0.63 (Figure 49).

Appliquant la proportion dérivée de Manning-Strickler (Cf. §1.4) pour l'épisode du 18/03/2001, qui a un coefficient d'écoulement de 0.1, nous avons obtenu une vitesse en rivière de 0.45, sur versant rural de 0.027 et sur surface imperméable de 0.27. La courbe simulée présente un critère de Nash de 0.5 (Figure 50).

A la mesure que le coefficient d'écoulement augmente, le deuxième pic de la fonction de transfert devient plus important en détriment du premier et les deux pics se rapprochent (Figure 51). Cela signifie que le temps de réponse est plus long pour des évènements qui ont un coefficient d'écoulement plus élevé. Le résultat est cohérent avec l'hydrogramme de la Figure 24 (§ 2.3) qui correspond à un évènement du type « humide » pour lequel le temps de réponse du bassin versant est entre 5 et 6 heures.

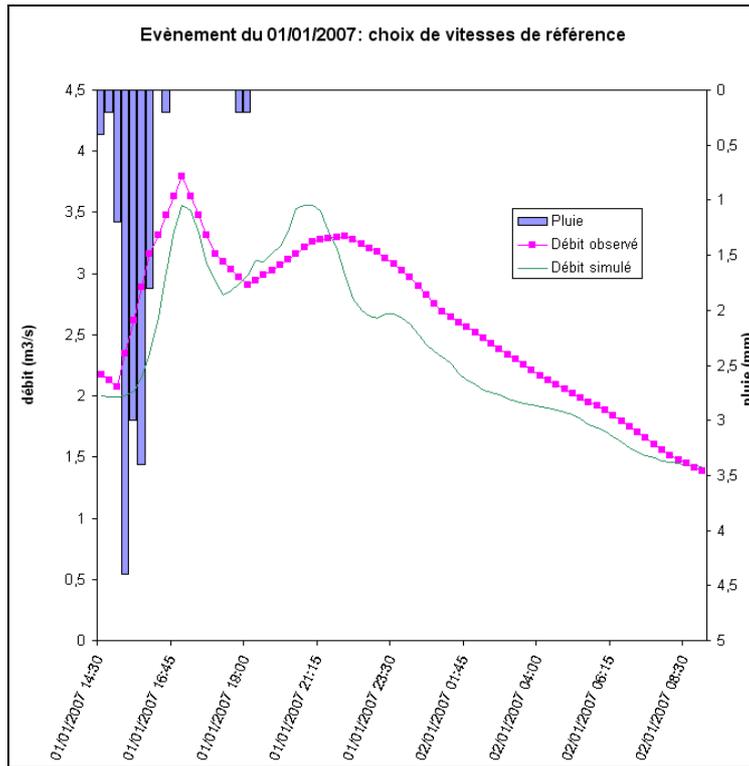


Figure 49. Episode choisi pour le choix des vitesses de référence. Vitesse en rivière: 0,5 m/s; vitesse sur versant rural 0,03m/s; vitesse sur surface imperméabilisée : 0,3m/s. Critère de Nash obtenu de 0,63.

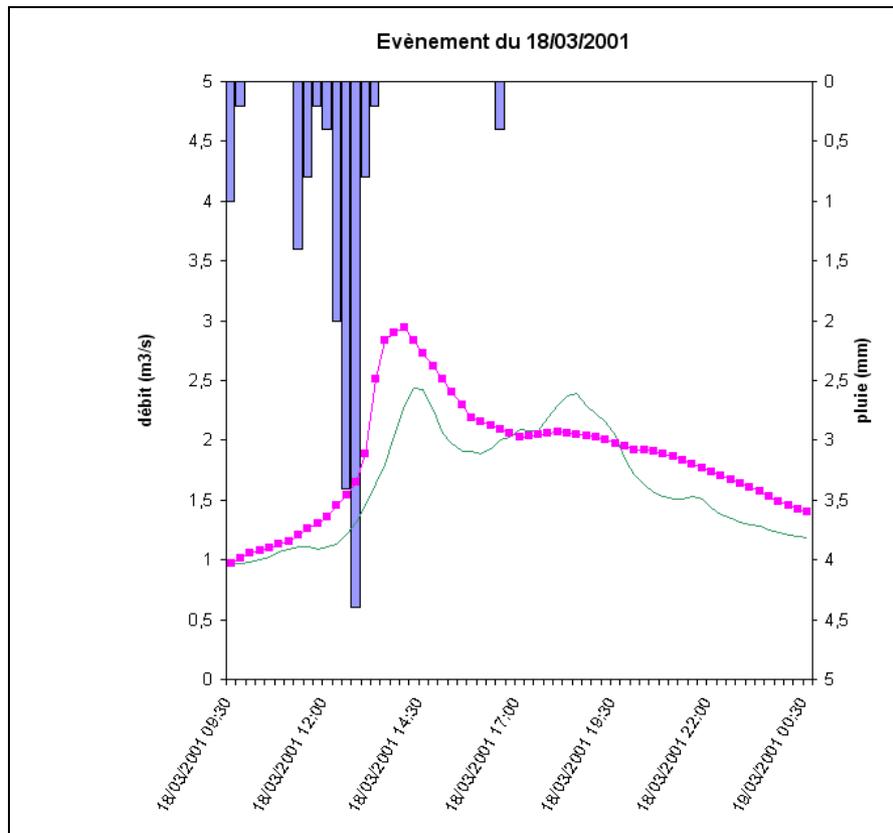


Figure 50. Episode du 18/03/2001. Vitesse en rivière: 0,45 m/s; vitesse sur versant rural 0,027m/s; vitesse sur surface imperméabilisée : 0,27m/s. Critère de Nash obtenu de 0,50.

Fonctions de transfert pour les épisodes de type humide en fonction des coefficients d'écoulement

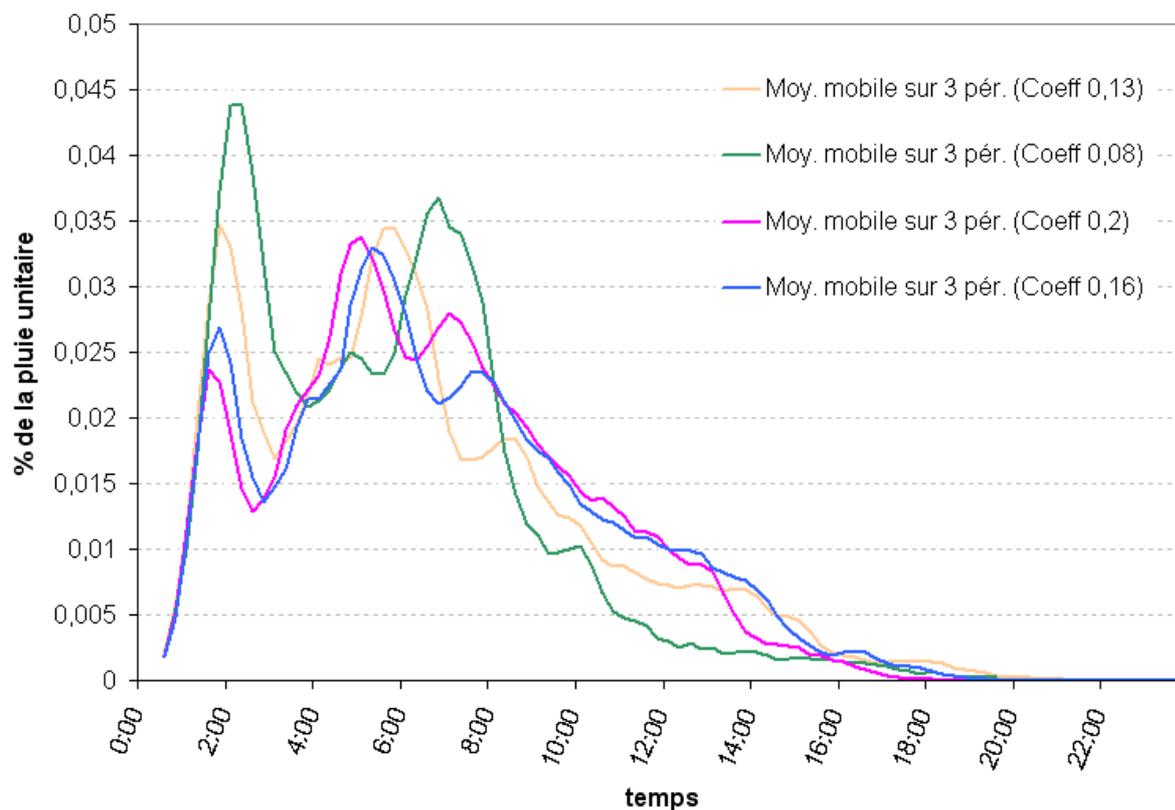


Figure 51. Fonction de transfert pour les événements de type humide selon les coefficients d'écoulement de 0.08 , 0.13, 0.16 et 0.20

5 Conclusion

Le travail s'est déroulé suivant une méthodologie différente des modélisations pluie-débit classiques qui se résument en formulation, calage des paramètres et validation du modèle. Notre but n'est pas de développer un outil de prévision de crues dans un premier temps, mais d'apporter des connaissances sur les processus et les particularités du fonctionnement d'un bassin périurbain. Cette étude préliminaire nous permet de comprendre l'influence des éléments qui participent de la génération du ruissellement dans le bassin versant de la Chézine, où on trouve à la fois une grande surface rurale ou naturelle mais aussi une urbanisation hétérogène croissante. La démarche adoptée part d'hypothèses simples qui sont raffinés selon les résultats obtenus.

Tout d'abord nous avons regardé dans les détails les évènements pluvieux sur sept années (2001-2007). Un travail précédant (Priou, 2005) basé sur l'analyse des données de 2001 à 2004 a montré une réponse saisonnière du bassin. Selon notre étude, bien que la tendance des évènements d'été soit en effet contrastée avec celle des évènements d'hiver, cette division regroupe des évènements pour lesquels la réponse hydrique du bassin diffère trop. L'analyse des données hydrométriques a mis en évidence l'existence de différentes réactions du bassin selon son état hydrique initial, représenté par le débit de base. Nous avons ainsi pu construire une fonction de transfert pour les évènements de faible débit de base, ou d'état hydrique initial sec, et puis nous l'avons adaptée pour les évènements d'état hydrique humide.

Rappelant qu'il s'agit d'une approche maillée à partir du MNT, les étapes de cette démarche sont 4 :

1. Définition des pixels qui contribuent au ruissellement. Pour les évènements de type « sec », nous avons fait l'hypothèse que la zone rurale ne participe pas au ruissellement car elle infiltre ou stocke toute l'eau qu'y tombe. Comme les évènements secs présentent une réponse assez homogène avec un coefficient d'écoulement moyen de 0,06 et compte-tenu du taux d'imperméabilisation du bassin de 0,18, nous avons considéré que seul un tiers des pixels imperméables réagit. Pour les évènements de type humide nous avons considéré la même contribution de la partie urbaine et ajouté à la surface contributive les surfaces rurales saturées. La partie rurale qui réagit est obtenue à partir du coefficient

d'écoulement observé qui ne provient pas des surfaces imperméabilisées et à l'aide des indices topographiques pour les localiser spatialement.

2. Calcul des distances entre chaque maille et l'exutoire. L'extraction du bassin versant et son réseau hydrologique est fait à partir du MNT et l'algorithme D8 pour déterminer les cheminements de l'eau. Nous avons calculé pour chaque pixel les distances parcourues en rivière et les distances parcourues sur versant.
3. Affectation des vitesses d'écoulement. Nous avons déterminé les vitesses d'écoulement en chaque type de surface (rivière, versant rural, versant urbain) à partir de l'analyse morphologique, les temps de réponses observés et la proportionnalité entre la vitesse et le débit.
4. Application des suites de pluies des événements observés pour vérifier la cohérence entre la dynamique reproduite et les courbes des débits à l'exutoire.

Les fonctions de transfert obtenues pour les événements d'état hydrique sec expliquent les deux pics souvent observés sur les hydrogrammes. Dans le travail de Priou (2005), l'hypothèse pour les expliquer était que le premier pic représentait l'eau d'origine urbaine et le deuxième correspondait à la réaction des zones rurales. L'analyse morphologique montre que le premier pic de débit correspond au ruissellement provenant de Nantes et le deuxième de Sautron, c'est-à-dire que les deux pics sont présents même quand le ruissellement dans la zone rurale est négligeable. Néanmoins, nous pouvons observer dans les événements d'hiver que le deuxième pic est en effet souvent bien amplifié par les contributions des surfaces saturées rurales.

Perspectives

Par rapport à la méthodologie ici appliquée, il y a encore des améliorations qui peuvent générer d'autres résultats et raffiner ceux qui ont été obtenus.

Bien que nous ayons affecté différentes valeurs de vitesse d'écoulement suivant le type de surface (végétalisé, imperméabilisé, rivière) ce paramètre pourrait encore varier selon la position dans le bassin et prendre plus en compte les caractéristiques du milieu où l'eau coule. De nombreux travaux sont consacrés à la variation de la vitesse le long de la rivière. D'un point de vue expérimental, des jaugeages pourraient être effectués pour avoir une notion de la variation réelle de vitesse d'écoulement.

Toujours dans la logique de ce travail d'essayer de mieux comprendre les évènements plutôt que de les modéliser directement, une analyse des images radar sur le bassin durant les évènements pluvieux permettrait de préciser l'impact de la distribution spatiale de la pluie sur la réponse hydrologique du bassin versant et potentiellement expliquer certains comportements, puisque devant cette étude, nous avons fait l'hypothèse classique d'une pluie spatialement uniforme.

Une étude préliminaire sur l'influence d'un bassin de stockage localisé juste en amont de l'exutoire dans le parc de Procé indique que cet élément pourrait aussi influencer le débit observé, atténuant ses pics quand une part de l'eau est retenue pendant son remplissage (Leroux, 2008). Malheureusement ce travail n'a pas pu aboutir à une réponse à ce sujet puisque durant la période du stage, les conditions climatiques ont été défavorables (pas d'évènement pluvieux). Néanmoins, la forme allongée du pic de crue sur l'hydrogramme est observée dans certains épisodes. Notamment en mars 2001 nous avons trouvé deux temps de réponse de plus de 5h alors que la réponse du bassin en général ne dépasse pas 2h... Nous croyons qu'il serait intéressant de donner une suite à l'étude de ce bassin de stockage afin de confirmer son rôle dans la réponse hydrologique de la Chézine.

Une fois que les processus et le fonctionnement du bassin seront bien compris à partir des études et analyses a posteriori de son comportement, il faudra aussi en dériver des outils prévisionnels, indépendants des paramètres calculés après la fin de l'évènement.

Considérant que ce travail s'est focalisé sur la seule fonction de transfert, la principale perspective d'application et poursuite de ce travail sera de réaliser une modélisation hydrologique complète, ce qui est prévu dans le cadre du projet AVuPUR (ANR-VMC).

Références bibliographiques

- Berthier E.** (1999). *Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain. Elaboration du modèle et première évaluation.* Thèse préparée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – centre de Nantes.
- Bertrand-Krajewsky J.- L., Laplace D., Joannis C., Chebbo G.,** (2000), *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*, Paris.
- Beven K. et Kirkby M.** (1979). *A physically-based variable contributing area model of basin hydrology.* Hydrol. Sci. Bull., 24:43-69.
- Candela A, Noto L.V., Aronica G.** (2005) *Influence of surface roughness in hydrological response of semiarid catchments.* Journal of Hydrology 313 (2005) 119–131
- DHI et Biotopé** (2005) *Etude préalable à la restauration et à la mise en valeur de la vallée de la Chézine*
- Dunne, T., Zhang, W., Aubry, B. F.,** (1991) . *Effects of Rainfall, Vegetation, and Microtopography on Infiltration and Runoff.* Water Resources Research, Volume 27, Issue 9, p. 2271-2285
- Gaume E.,**(2002) *Eléments d'analyse sur les crues éclair.* Thèse de doctorat, ENGREF, CERREVE
- Gironas J., Roesner L.A.**(2007). *Morphologic Approach in Studying Developing Urban Watersheds.* Geophysical Research Abstracts, Vol. 9, 01818.
- Luna B. L** (1953). *Downstream Change of Velocity in Rivers.* American Journal of Science; ol . 251, août 1953, p.606-6241
- Montgomery D et Dietrich W.,** (1989). *Source areas, drainage density and channel initiation.* *Water resources Research*, 25:p. 1907-1918.
- Moussa R,** (1996). *Analytical analytical solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow.* Hydrological processes, 10p:1209-1227.
- Mussy** (2002). Cours d'Hydrologie Générale. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
- Obled C. et Zin I.** (2004). *TOPMODEL : principes de fonctionnement et application.* INP-Grenoble, ENS Hydraulique et Mécanique, Laboratoire LTHE. La Houille Blanche n° 1.
- O'Callaghan J, et mark D.,** (1984). *The extraction of drainage networks from digital elevation data.* *Graphics Image Processes*, 28 :p. 323-344.
- Perrin C., Michel C., et Andréassian V.,** (2003). *Improvement of a parsimonious model for stream flow simulation.* Journal of Hydrology, 279:p 275-289.
- Ponce V, Li R,** (1978). *Applicability of kinematic and diffusion models.* ASCE Journal Hydrology, 104(HY3) :p.353-360.
- Priou Amélie** (2005). *Etude hydrologique du bassin versant périurbain de la Chézine.* Mémoire de fin d'études à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Rennes.
- Rodriguez-Iturbe, I., et Rinaldo A.** (1997). *Fractal River Basins: Chance and self-organization*, Cambridge University Press, New York.
- Tarboton D. G.** (2005). *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM) method.* Utah State University

USDA (1956). *Hydrology National Engineering Handbook*.

Versini P.A. (2007) *Surveillance du risqué diffuse le long des itinéraires routiers*. Thèse préparée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées – centre de Nantes.

Wood E, Lettenmaier D et Zartarian V, (1992). *A land-surface hydrology parametrization with subgrid variability for general circulation model*. Journal of geophysical research, 97: p. 2717-2728.

Woolhisier D. et Liggett J, (1967). *Unsteady one-dimentional flow over a plane : the rising hydrograph*. Water Resources Research, 3 :p. 753-771.

Yildiz O. (2002). *An Investigation of the Effect of Drainage Density on Hydrologic Response*. Kirikkale University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Kirikkale-TURKEY

Sites Internet

Météo France, 12 juin 2008

Infoclimat, 05 août 2008

BRGM, 01 août 2008

www.athys-soft.org, 20 août 2008