



HAL
open science

Étude et analyse géographique et hydrologique du bassin-versant de la Sèvre-Nantaise dans le cadre d'un projet de ralentissement dynamique

Camille Douguet

► **To cite this version:**

Camille Douguet. Étude et analyse géographique et hydrologique du bassin-versant de la Sèvre-Nantaise dans le cadre d'un projet de ralentissement dynamique. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2015. dumas-01582126

HAL Id: dumas-01582126

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01582126v1>

Submitted on 6 Jan 2022

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.



Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES

Etude et analyse géographique et hydrologique du bassin-versant de la Sèvre-Nantaise dans le cadre d'un projet de ralentissement dynamique.

Secteur du bassin de la Sèvre-Nantaise

Camille DOUGUET

PROMOTION MANCHE

Stage réalisé du 12 janvier 2015 au 07 juillet 2015

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à remercier toutes les personnes et les organismes qui ont contribué, sur le plan scientifique, technique ou administratif, à l'accomplissement de mon projet de fin d'étude durant toutes ses phases de préparation, de traitement, d'analyse et de rédaction.

Je tiens à remercier tout particulièrement :

M. Alexandre Lesage, ingénieur hydraulique, pour m'avoir encadré tout au long de ce stage. Merci pour son soutien, son aide, ses conseils et ta patience quotidienne.

Mon maître de stage, M. Yann Gasowski, ingénieur hydraulique et responsable du service hydraulique, pour son soutien, son aide et pour la variété des missions qu'il m'a confié.

M. Jean-Michel Murtin, chef du service Hydraulique et Environnement d'Artelia Nantes, pour m'avoir accueillie au sein de son service et m'avoir fait confiance.

L'ensemble des collègues du service Hydraulique et Environnement pour les rires, le soutien moral, les pauses café, les viennoiseries réconfortantes et les soirées à la Cavale.

Les autres stagiaires Engessiens temporairement Bretons pour leur soutien moral, les rires, les concerts et les nombreuses visites de Brest.

Ma famille pour leur soutien moral téléphonique hebdomadaire.

Au musée Picasso pour une après-midi culturelle parisienne entre mère et fille réconfortante.

Résumé

Etude et analyse géographique et hydrologique du bassin de la Sèvre-Nantaise dans le cadre d'un projet de ralentissement dynamique.

Le bassin-versant de la Sèvre-Nantaise est particulièrement vulnérable aux inondations et la présence de communes implique des risques humains et économiques. Le gestionnaire de bassin, l'Etablissement Public Territorial de Bassin (EPTB) de la Sèvre-Nantaise, a lancé au début des années 2000 un programme d'actions visant à maîtriser le risque de crues à travers notamment l'élaboration de Programmes d'Actions de Prévention contre les Inondations (PAPI), d'Atlas de Zone Inondable, de banques de données et la mise en place d'aménagements. Le projet, directement issu du plan d'action de l'EPTB, s'inscrit donc dans un contexte de lutte contre les inondations au sein du bassin-versant de la Sèvre-Nantaise. Dans un but de préservation du paysage, de limitation des impacts sur le milieu naturel et d'optimisation des coûts/bénéfices, les gestionnaires du bassin se sont orientés vers des méthodes de lutte contre les inondations dites « douces » dans le cadre du ralentissement dynamique. Le ralentissement dynamique est basé sur un étalement du pic de crue, une diminution de la vitesse des écoulements et une limitation des ruissellements. Ce type de méthode est encore peu développé et encore moins appliqué sur le terrain. De nombreux chercheurs se penchent actuellement sur le développement et l'optimisation des aménagements « doux » dans le cadre du ralentissement dynamique mais leur efficacité est largement débattue. Le projet s'inscrit donc dans un cadre de recherche scientifique et s'avère être pilote dans ce type d'aménagement. Le but final est d'aboutir à l'implantation d'ouvrages et à la mise en place de mesures de manière concrète. Un tel projet demande au préalable une expertise précise du territoire d'étude. Ce rapport présente la première phase de ce vaste projet soit l'analyse géographique du bassin-versant de la Sèvre-Nantaise à travers un traitement SIG et la première étape de l'étude hydrologique menée principalement sur la base de modélisations.

Geographic and hydrologic analysis of the "Sèvre-Nantaise" watershed as a part of a dynamic retention project.

The "Sèvre-Nantaise" watershed is particularly vulnerable to flood and cities involve human and economic risks. At the beginning of year 2000, watershed managers launched few actions as publication of "PAPI" and maps of liable to flooding areas, creation of data banks and plans of land settlement for struggling against floods. This project had been established directly from these actions and appears as a real part of flood control plans. In order to conserve landscapes, limit environmental damaging and optimize cost/benefit balance, watershed managers turned to "sweet" methods of flood struggling in the framework of dynamic retention. Dynamic retention notion is based on the spate peak spreading, diminution of flows velocity and limitation of flows. This type of method is still underdeveloped and not concretely applied. Several researchers are investigating for developing and optimizing "sweet" measures and hydraulic structures but effectiveness of such settlements is not proved yet. Because this project is dealing with underdeveloped methods and aims to apply concretely principles of "sweet" dynamic retention, it appears as a part of a scientific research programs. In this context, actors need to know perfectly the area of study, meaning "Sèvre-Nantaise" watershed. This report presents the territorial analysis through a geographical study, GIS treatments and hydrologic model.

Sigles et abréviations

AZI = Atlas de Zones Inondables

CLC = Corinne Land Cover

CN= Curve Number

EPTB = Etablissement Public Territorial de Bassin

GASPAR (Base) = Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives au Risques naturels et technologiques

HEC-HMS = Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System

IRSTEA= Institut national de Recherche en Sciences et Technologie pour l'Environnement et l'Agriculture

PAPI = Programme d'Actions de Prévention contre les Inondations

SAGE = Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SCS= Soil Conservation Service

SDAGE = Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

SIG = Système d'Information Géographique

SN = Sèvre-Nantaise

Tc =Temps de concentration

Glossaire

Base Gaspar = Base de données recensant par communes l'ensemble des catastrophes naturelles types séismes, inondations, avalanches, éruption volcanique, feu de forêt, nucléaire, grêle...etc.

Champs d'expansion des crues = Zone propice au déversement des eaux de crues sans risques humains, économiques et financiers.

Coefficient de Muskingum K= Temps mis par le pic de crue pour s'écouler de l'amont vers l'aval d'un tronçon de cours d'eau.

Coefficient de Muskingum X= Coefficient de pondération pour estimer la capacité de stockage d'un tronçon de cours d'eau.

Coefficient de stockage = Temps mis par les gouttes stockées au sein d'un bassin-versant pour s'écouler jusqu'à l'exutoire.

Curve Number = Coefficient représentant la sensibilité d'un sol au ruissellement en fonction de données pédologiques et d'occupation du sol.

Lag time = Temps de retard entre le pic de précipitations et le pic de crue.

Ralentissement dynamique= Méthode de lutte contre les inondations basé principalement sur l'étalement du pic de crue et la diminution des écoulements.

Temps de concentration = Durée maximale nécessaire à une goutte d'eau pour s'écouler de l'amont à l'aval jusqu'à l'exutoire.

Zone tampon= Dans ce contexte, zone intermédiaire entre la rivière et les enjeux capable d'absorber la crue (ou une partie) et constituant ainsi une protection contre les inondations.

Table des matières

Remerciements	3
Résumé.....	4
Sigles et abréviations.....	5
Glossaire	5
Introduction.....	11
1. CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	13
1.1 Acteurs du projet et partenaires d'Artelia	13
1.1.1 L'Etablissement Public Territorial du Bassin la Sèvre- Nantaise.....	13
1.1.2 Coopération avec l'IRSTEA.....	13
1.2 Problématique.....	14
1.2.1 Présentation du projet	14
1.2.2 Etat de l'art sur le ralentissement dynamique	14
1.3 Présentation de la zone d'étude	17
1.3.1 Présentation et localisation du site d'étude	17
1.3.2 Réseau hydrographique du bassin versant	18
1.3.3 Caractéristiques climatique.....	20
1.3.4 Géologie et topographie du site.....	20
1.3.5 Occupation du sol.....	21
1.3.6 Le contexte réglementaire	23
1.4 Données de l'étude	24
1.4.1 Données SIG	24
1.4.2 Données divers	25
2 PHASE 1 : DETERMINATION DES BASSINS VERSANTS TESTS	27
2.1 Découpage du territoire de la Sèvre-Nantaise en sous bassins-versants	27
2.2 Etude morphologique.....	28
2.2.1 La superficie des bassins versants	29
2.2.2 Etude des pentes	30
2.2.3 L'indice de Gravelius.....	30
2.2.4 Longueur de talweg	31
2.2.5 Le linéaire de cours d'eau.....	31
2.2.6 Temps de concentration.....	31
2.3 Etude du ruissellement.....	32

2.4	Analyse du paysage	34
2.4.1	L'occupation du sol.....	34
2.4.2	Les paysages atypiques : bocages et zones humides	35
2.4.3	Les ouvrages hydrauliques majeurs	36
2.5	Etude de l'aléa inondation	37
2.6	Analyse des enjeux	39
2.7	Analyse multidimensionnelle et choix final des bassins-versants tests	40
2.7.1	Méthodologie de l'analyse	40
2.7.2	Filtre 1 : la sensibilité au ruissellement	41
2.7.3	Filtre 2 : Les arrêtés inondations de la base GASPAR.....	42
2.7.4	Filtre 3 : la surface des bassins	44
2.7.5	Synthèse et corrélation des informations issues de l'analyse.....	44
3	PHASE 2 : ETUDE HYDROLOGIQUE DES BASSINS TESTS	48
3.1	Choix des bassins-versants à modéliser	49
3.2	Construction du modèle hydraulique.....	50
3.2.1	Représentation des composants hydrauliques	51
3.2.2	Choix des paramétrages des composants hydrauliques du modèle	52
3.2.3	Détermination des caractéristiques hydrauliques des bassins nécessaires à la modélisation	54
3.3	Construction du modèle météorologique.....	57
3.4	Calage du modèle	58
3.4.1	Présentation de la méthodologie	58
3.4.2	Premier calage avec l'évènement pluvieux d'été.....	61
3.4.3	Second calage avec l'évènement pluvieux d'hiver.....	64
3.4.4	Résultats finaux du calage du modèle HEC-HMS	66
4	Conclusion	67
	Bibliographie.....	68
	ANNEXES.....	71

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques principales des affluents du bassin de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.....	19
Tableau 2: Géologie globale des sous-bassins versants de la Sèvre-Nantaise et sensibilité au ruissellement, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.....	20
Tableau 3: Données SIG fournies par l'EPTB de la Sèvre-Nantaise en février 2015.....	24
Tableau 4: Documentation fournie par l'EPTB de la Sèvre-Nantaise en février 2015.	25
Tableau 5: Répartition des sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise en fonction de leur superficie, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.....	30
Tableau 6: Répartition des sous bassins-versants en fonction de la pente de leur talweg, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.....	30
Tableau 7: Temps de concentration en fonction de la superficie des bassins de la Sèvre-Nantaise....	32
Tableau 8: Nombre de sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise en fonction du seuil de sensibilité au ruissellement.	41
Tableau 9: Nombre de sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise en fonction du seuil maximum de superficie.	44
Tableau 10: Caractéristiques globales de bassin-versant de Saint-Fulgent, bassin de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.....	50
Tableau 11: Récapitulatif des méthodes de calculs retenues pour la modélisation sur HEC-HMS et des paramètres à renseigner.	54
Tableau 12: Pourcentage de surface imperméabilisée pour chaque sous bassins-versants de Saint-Fulgent, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France, 2006.....	55
Tableau 13: Temps de concentration de Giandotti et de Sogreah et coefficients de stockage respectifs pour chaque sous bassins-versants.....	56
Tableau 14: Coefficient K de Musingum pour chaque tronçons du modèle HEC-HMS.....	57
Tableau 15: Caractéristiques de la station hydrométrique de Saint-Fulgent et utilisée lors du calage du modèle HEC-HMS.	59
Tableau 16: Caractéristiques des deux stations pluviométriques utilisées pour le calage du modèle HEC-HMS	60
Tableau 17: Description des deux évènements pluvieux utilisés pour le calage du modèle HEC-HMS (fréquences issues de MétéoFrance à la station de Nantes-Bouguenais pour la période 1982-2008). 60	60
Tableau 18: Inventaire des paramètres de calage et de leur potentielle variabilité.	61
Tableau 19: Valeurs des CN et de l'infiltration initiale de chaque sous bassins-versants pour le calage du modèle estival.	63
Tableau 20: Valeurs des CN et de l'infiltration initiale de chaque sous bassins-versants pour le calage du modèle hivernal.....	65
Tableau 21: Valeurs finales des paramètres après le calage du modèle.	66
Tableau 22: Désignation de la classe de sol du SCS en fonction de la pédologie. (Hillel 1974; Musy and Higy 1998; Elmehdi et al. 2013.).....	92
Tableau 23: Distribution des Curve Number en fonction de la classe de sol et de l'occupation du sol, méthode du SCS (Elmehdi et al. 2013.; Cronshey 1986).....	93
Tableau 24: Surface agricole, urbaine et forestière pour chaque sous bassin-versant du bassin de Saint-Fulgent en 2006, Pays de la Loire, France.....	94

Tableau 25: Paramètres nécessaires aux calculs des temps de concentration et des coefficients de stockage de Giandotti et Sogreah et résultats des calculs pour chaque sous bassin-versant, bassin versant de Saint-Fulgent, France.....	96
Tableau 26: Paramètres nécessaires aux calculs des lag time de Giandotti et Passini et résultats des calculs pour chaque tronçon du bassin versant de Saint-Fulgent, France.....	99
Tableau 27: Paramètres à renseigner pour la construction du hyétogramme synthétique en double triangle.	99
Tableau 28: Présentation des coefficients K de Muskingum pour chaque tronçon du bassin-versant de Saint-Fulgent.	102

Table des figures

Figure 1: Localisation de la zone du bassin versant d'étude en France	17
Figure 2: Présentation du bassin Loire-Bretagne, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France	18
Figure 3: Présentation du réseau hydrographique de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.....	19
Figure 4: Topographie du bassin de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France	21
Figure 5: Carte de l'occupation du sol au sein de la Sèvre-Nantaise en 2006, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France. <i>Source : Banque Corinne Land Cover 2006</i>	22
Figure 6: Présentation et localisation des 181 sous bassins-versants du bassin de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.....	28
Figure 7: Analyse de la superficie des 181 sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.....	29
Figure 8: Illustration de l'indice de Gravelius avec trois bassins de la Sèvre-Nantaise.....	31
Figure 9: Sensibilité du bassin de la Sèvre-Nantaise au ruissellement, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France, 2009. <i>Source : Benjamin, 2009</i>	33
Figure 10: Illustration du résultat obtenu après traitement SIG de l'information de ruissellement. ...	33
Figure 11: Occupation du sol par sous bassins-versant de la Sèvre-Nantaise en 2006, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.....	35
Figure 12: Répartition du bocage et des zones humides au sein des sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise en 2012, Pays de la Loire, France.	36
Figure 13: Répartition des aléas inondations au sein du bassin de la Sèvre-Nantaise, zones inondables (2006), nombre de catastrophes naturelles (2010) et enquête inondations (2014) Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.....	38
Figure 14: Localisation des enjeux au sein du bassin de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, 2006.	39
Figure 15: Illustration de la méthode utilisée pour l'analyse multidimensionnelle.....	41
Figure 16: Localisation des sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise en fonction du seuil de sensibilité au ruissellement.....	42

Figure 17: Localisation des sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise potentiellement responsables d'inondations en aval, 2010.	43
Figure 18: Corrélation entre les bassins de superficie inférieure à 10km ² et de sensibilité au ruissellement de classe 3+4 supérieure à 50%.....	45
Figure 19: Localisation des 22 sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise sélectionnés à l'issue de l'analyse multidimensionnelle.....	46
Figure 20: Localisation du bassin-versant de Saint-Fulgent et du sous bassin-versant test, Pays de la Loire, France.....	50
Figure 21: Découpage du bassin-versant de Saint-Fulgent en 28 têtes de bassins et 25 bassins intermédiaires pour la modélisation sur HEC-HMS.....	51
Figure 22: Bassin-versant de Saint-Fulgent modélisé sur HEC-HMS.....	52
Figure 23: Illustration de la méthode de calage envisagée.....	59
Figure 24: Hyétoqramme de l'évènement pluvieux du 10/05/2005 au 12/05/2005 mesuré à la station du Pallet.....	60
Figure 25: Hyétoqramme de l'évènement pluvieux du 02/01/2003 au 04/01/2003 mesuré à la station de Landes-Guenusson.....	61
Figure 26: Evolution de l'hydrogramme calculé par HEC-HMS au cours du calage du modèle estival.	62
Figure 27: Evolution de l'hydrogramme calculé par HEC-HMS au cours du calage du modèle hivernal.	64
Figure 28: Hyétoqramme synthétique issu des paramètres présentés et qui servira pour le calcul des coefficients K de Muskingum	100
Figure 29: Hydrogramme résultant de la modélisation lancée avec le hyétoqramme synthétique... ..	101

Introduction

Le bassin de la Sèvre Nantaise est concerné par de nombreuses inondations sur son territoire. Une dizaine d'inondations remarquables ont marqué les esprits notamment en 1960, 1983, 1995 et 1999 mais également plus récemment au cours de l'hiver 2000-2001. Une soixantaine de communes sur les 144 communes que compte ce bassin sont susceptibles d'être inondées. Ces dernières sont principalement dues à l'apparition de crues soudaines et importantes des cours d'eau majeurs mais également à des phénomènes plus locaux de ruissellements pluvieux.

Face à ces problématiques, les gestionnaires du bassin de la Sèvre-Nantaise ont lancé plusieurs démarches P.A.P.I, et mènent depuis de nombreuses années des programmes d'étude du risque inondation via la mise au point d'Atlas de Zones Inondables (AZI), des campagnes de communication et de sensibilisation de la population et des études du territoire pour mieux l'appréhender et disposer de données précises.

Les acteurs locaux ont donc développé depuis plusieurs dizaines d'années des réflexions autour du risque inondation. Un des points centraux repris dans les SDAGE des dernières années concerne la capacité « *de mieux vivre avec les crues* ». Les principales propositions apportées préconisent de mettre un terme à l'urbanisation des zones inondables, améliorer la protection des zones inondables déjà urbanisées et reconquérir le caractère naturel et la qualité écologique et paysagère des champs d'expansion de crue. Trois notions centrales ressortent de ces propositions, la prévention et l'adaptation de l'homme à son territoire, la protection contre les crues et l'utilisation du territoire et des milieux naturels comme zones « tampons ». Plusieurs orientations dans la lutte contre les inondations sont donc envisagées par les acteurs du bassin de la Sèvre-Nantaise. La mise en place d'ouvrages classiques « durs » type bassins et la canalisation des chenaux reste au cœur des plans d'aménagement mais des solutions plus douces et atypiques sont envisagées. De plus en plus de collectivités se tournent vers des propositions alternatives généralement moins coûteuses, plus faciles à mettre en place, plus respectueuses à la fois de la dynamique hydrologique et écologique et s'intégrant bien dans le paysage. Parmi ces solutions novatrices, la lutte contre le ruissellement et le ralentissement des écoulements apparaissent comme incontournables. Ces notions sont en lien direct avec la gestion du territoire, en particuliers l'occupation du sol et la gestion des rivières. Elles s'incorporent à une notion plus vaste appelée *ralentissement dynamique* qui est actuellement au centre des projets du bassin de la Sèvre-Nantaise. Ce projet s'intéresse à la lutte contre les inondations mais dans un cadre novateur et éloigné des études typiques d'aménagement contre les crues.

Est présenté dans un premier temps le contexte de l'étude à travers une description des acteurs, de la zone d'étude et du projet lui-même. Dans un second temps, une analyse géographique détaillée du bassin de la Sèvre-Nantaise est réalisée pour mieux l'appréhender et définir les objets de l'étude. Enfin, la troisième partie présente le début de l'étude hydrologique visant à comprendre la dynamique d'écoulement du bassin.

1. CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE

1.1 Acteurs du projet et partenaires d'Artelia

1.1.1 L'Etablissement Public Territorial du Bassin la Sèvre- Nantaise

Les Etablissements Publics Territoriaux de Bassins (EPTB) ont fait leur apparition pour la première fois en 1997 (Marc, 2006 ; Pustelnik, 2008) mais n'ont été officiellement reconnus comme acteurs de la gestion de l'eau au sein de bassins-versants qu'en 2003 (Pustelnik, 2008). L'objectif principal des EPTB consiste à imposer une gestion globale de l'eau sur l'ensemble d'un bassin de l'amont à l'aval. Ils ont un rôle de vecteurs et « d'interfaces » pour rassembler des acteurs variés tels que les agences de l'eau, l'Etat, les collectivités territoriales et les usagers autour d'actions communes (Pustelnik, 2008).

Les EPTB travaillent sur les trois aspects centraux de la gestion de l'eau soit le réglementaire (Schémas d'Aménagements et de Gestion des Eaux SAGE, directives et règlements européens et nationaux...), le financier (politiques territoriales, projets de l'Agence de l'eau, contrats de projets...) et le contractuel (plans de gestion des étiages, contrats de rivières...) (Pustelnik, 2008). Les domaines principaux gérés par les EPTB concernent la gestion de la demande en cohérence avec la disponibilité de la ressource, la lutte contre les inondations, la préservation des écosystèmes aquatiques, la reconquête de la qualité de l'eau, la gestion des étiages et le développement d'observatoires.

Le périmètre de l'EPTB de la Sèvre-Nantaise se limite au bassin de la Sèvre-Nantaise mais s'étend sur les quatre départements que sont la Vendée (85), la Loire-Atlantique (44), le Maine et Loire (49) et les Deux-Sèvres (79).

L'EPTB de la Sèvre-Nantaise est né du regroupement de sept syndicats qui se partageaient le territoire du bassin-versant. Cette pluralité syndicale est justifiée par la nécessité d'une gestion interdépartementale couplée à un réseau relativement dense de rivières, à savoir six rivières principales. Cette association d'acteurs publics multiples permet d'optimiser les partenariats et d'améliorer l'efficacité et la cohérence de la gestion du bassin, notamment à travers une gouvernance raisonnée et globale des zones hydrographiques amont et aval. La mise au point du SAGE en 2006 (cf. chapitre 1.3.6) traduit la cohésion de l'association syndicale.

1.1.2 Coopération avec l'IRSTEA

Le ralentissement dynamique étant un domaine encore expérimental et faisant l'objet de projets de recherche, une coopération avec un programme de recherche actif présente une aide non négligeable. Nous avons donc fait appel à l'IRSTEA Lyon pour mettre en place un partenariat d'échanges scientifiques et d'informations. Plusieurs rapports de recherche et de conférences nous ont été fournis, en particulier sur les questions d'efficacité de certains ouvrages ou de solutions « types ».

1.2 Problématique

1.2.1 Présentation du projet

Dans une optique de sauvegarde du patrimoine naturel et paysager et d'optimisation des coûts/bénéfices des aménagements, l'EPTB souhaite mettre en place des mesures « douces » de lutte contre les inondations, notamment dans un contexte de ralentissement dynamique. Cette étude s'inscrit dans une vision de gestion raisonnée des bassins-versants hydrographiques afin d'agir le plus en amont, sur la genèse des phénomènes de ruissellement concourant à l'apparition de problématiques d'inondation. Elle amène à s'interroger sur les moyens de réduire ces phénomènes de ruissellement et notamment sur leur efficacité tout en évitant de générer des effets négatifs sur les autres fonctionnalités de ces systèmes. Nous nous concentrerons donc uniquement sur la notion de ralentissement dynamique dans le cadre de mesures dites « douces » sans faire appel aux ouvrages type bassins et canalisations des chenaux. Néanmoins, il est à noter que les crues visées par ces aménagements sont d'une période de retour relativement faible, de l'ordre au maximum de 2 à 5ans.

Comme le laisse entendre la coopération avec l'organisme de recherche IRSTEA, ce projet est en partie tourné vers la recherche. En effet, le ralentissement dynamique à solutions « douces » est une notion nouvelle qui doit encore être largement explorée. Le succès n'étant donc pas totalement garanti, l'EPTB souhaite que le projet ne se concentre que sur deux bassins-versants de taille limitée à 10km², l'un de type urbain et l'autre rural. Les études hydraulique et hydrologique ainsi que les aménagements se cantonneront donc à ces deux zones réduites.

Le projet est divisé en 3 phases majeures :

- Phase 1 : Sélection de deux bassins-versants sur l'ensemble du bassin de la Sèvre-Nantaise comme objets d'étude à partir d'une analyse multidimensionnelle fondée sur des données géographiques et hydrologiques.
- Phase2 : Collecte de données bibliographiques et de terrain, spécifiques aux bassins définis. En parallèle deux modélisations hydrologique et hydraulique sont réalisées dans le but de mieux connaître les réactions des bassins tests aux évènements pluvieux et les zones vulnérables aux inondations.
- Phase 3 : Propositions d'aménagements doux et détermination de leur efficacité grâce aux modèles élaborés en phase 2.

Cette étude s'écoulant sur environ 2ans, seules les deux premières phases ont été abordées lors de ce stage.

1.2.2 Etat de l'art sur le ralentissement dynamique

1.2.2.1 Principe général

Le ralentissement dynamique s'est développé depuis les dernières décennies afin de lutter contre le risque croissant d'inondation. L'augmentation de l'aléa inondation résulte de l'accroissement de facteurs tels que l'augmentation des surfaces imperméabilisées (Chocat,

1989; Viel et al., 2014), la modification des pratiques culturales (Bocher, 2005; Benjamin, 2009; Joannon, 2004) et la réduction des champs d'expansion des crues et des zones humides (journal local Safer Flandres Artois). Ces facteurs ont eu pour principales conséquences de favoriser et d'augmenter les ruissellements pluviaux réduisant ainsi les temps de propagation des crues.

L'application du ralentissement dynamique dans un cadre de sauvegarde du patrimoine environnemental est relativement récente et est apparue suite à la prise de conscience de l'importance de la sauvegarde des milieux écologiques. Ce domaine reste donc encore expérimental et la plupart des grands principes énoncés sont débattus et plus ou moins acceptés par la communauté scientifique.

Le principe d'agir en amont pour réduire l'aléa inondation en aval est désormais connu sous l'intitulé de Ralentissement Dynamique des Crues. Il repose sur les deux principes majeurs que sont le stockage des eaux en surplus et le ralentissement des écoulements (Bocher, 2005; Poulard et al., 2008; Joannon, 2004). Ces deux actions impliquent :

- Le ralentissement des eaux s'écoulant sur les versants, autrement dit la maîtrise du ruissellement de versant, ce qui va retarder d'autant leur arrivée aux cours d'eau ;
- L'atténuation de l'accélération des écoulements au sein même du lit des cours d'eau ;
- Le stockage de l'eau pour étaler dans le temps la crue et limiter son intensité en laminant le pic de crue;
- La mise en valeur et la restauration des connexions avec les annexes fluviales et le lit majeur pour permettre la dérivation d'une partie des écoulements en crue et l'augmentation des infiltrations vers les nappes ;
- L'augmentation de la rugosité et la revégétalisation des berges et des versants ;

Ces mesures peuvent être mises place au sein même du lit mineur, dans le lit majeur ou au niveau des versants.

1.2.2.2 Solutions à l'étude

Afin de mettre en pratique les principes de ralentissement dynamique, l'aménagement raisonné du territoire est essentiel et passe par la transformation paysagère et une modification de l'occupation du sol.

1.2.2.2.1 Les actions sur le paysage

Ces actions portent sur « les linéaires » qui correspondent aux éléments paysagers tels que les haies et les talus, les fossés, les réseaux de drainage et les réseaux routiers (Viel, et al., 2014; Poulard et al., 2008; Bocher, 2005). Ces éléments modifient le sens et la direction de l'écoulement et influent sur la durée nécessaire aux eaux ruisselées pour atteindre le lit mineur.

La réintroduction du bocage est actuellement fortement débattue en raison de son efficacité plus ou moins convaincante (Poulard et Le Hénaff, 2015 ; Bocher, 2005; Viel et al., 2014). Les haies permettent de modifier le sens et la vitesse d'écoulement et de détourner le surplus d'eau du cours d'eau. Néanmoins, l'état physique de la haie joue un rôle non négligeable dans son efficacité et un simple trou de feuillage peut au contraire canaliser un écoulement (Viel et al., 2014).

Leur construction n'étant que très rarement raisonnée et adaptée au ralentissement dynamique, les réseaux de drainage et routiers court-circuitent les obstacles à l'écoulement tels que les haies et les talus (Viel et al., 2014). Etant peu rugueux, ils induisent une accélération des écoulements qui sont alors plus difficiles à arrêter (Montgomery, 1994 ; Sun et McNulty, 1998 ; Sebbab, 2000 ; Wemple et al., 2001 ; Moussa et al., 2002 ; Bocher, 2005). De plus, le positionnement des routes impacte directement les écoulements. Ainsi, une route légèrement enfoncée devient une zone privilégiée pour les écoulements. A l'inverse, la surélévation des routes est efficace puisqu'elle joue alors le rôle de digue et crée une zone de stockage (Poulard et al., 2008). L'installation de drains en fond de collecteurs, types ravines ou fossés, permet le rejet des eaux de ruissellement dans une zone souhaitée telle qu'une gravière ou une zone végétalisée. Leur rôle est alors positif (Poulard et al., 2008).

1.2.2.2 Adaptation de l'occupation du sol aux problématiques inondation

L'occupation du sol influence fortement le ruissellement, les zones d'activité agricole et les zones végétalisées type prairie et forêt sont particulièrement concernées. La rugosité du sol est un paramètre clé de ces phénomènes.

Les pratiques culturales sont très largement remises en cause, en particulier les cultures intensives en openfield où sont cultivées des plantes semi-tardives type maïs, betteraves ou pomme de terre (Joannon, 2004 ; Bocher, 2005; Poulard et al., 2008). Ce type de culture implique des hectares de sols parfaitement nus, en particulier durant l'hiver, ou une croûte de battance est susceptible de se former et intensifier le ruissellement. Le sens des rainures produites lors du travail du sol par rapport au sens de la pente, pendant les labours par exemple, est également particulièrement important. Il favoriserait la direction des écoulements et l'intensité de l'érosion. Des labours perpendiculaires au sens de la pente sont préférables (Joannon, 2004 ; Bocher, 2005; Poulard et al., 2008).

Le couvert végétal joue un rôle important dans le ralentissement des écoulements et dans l'augmentation de la capacité d'infiltration des sols. Les zones enherbées permettent en effet l'absorption d'une partie des écoulements et favorisent le dépôt de sédiments, autant d'apports qui n'atteindront pas le lit mineur. La limitation du pâturage est nécessaire pour la sauvegarde de zones suffisamment végétalisées.

1.2.2.3 Limites du ralentissement dynamique dit « doux »

1.2.2.3.1 La nécessité d'une gestion territoriale globale ou intégrative

La description des propositions étudiées ci-dessus met en lumière la difficulté de jugement de l'efficacité de tel ou tel aménagement. Elle dépend fortement de la localisation, de l'état et de l'intégration de l'aménagement par rapport aux autres éléments paysagers. Ceci implique une gestion extrêmement raisonnée, à long-terme et adaptée à chaque territoire. La mise en place d'un tel management est loin d'être évident et nécessite un travail d'analyse approfondi.

1.2.2.3.2 Des aménagements transparents aux crues violentes

La protection des territoires contre les inondations dans le cadre du ralentissement dynamique reste limitée. Il est explicité que, pour des temps de retour trop élevés ou en période hivernale très pluvieuse, quand les sols sont continuellement saturés, l'efficacité de

ces solutions douces est quasiment nulle (Schüler, 2007 ; Poulard et Le Hénaff, 2015). Des crues brusques et violentes, de périodes de retour généralement longues ou déclenchées par des pluies d'orages, ne peuvent être encaissées par des ouvrages trop discrets et plus fragiles que les aménagements bétonnés (Poulard et Le Hénaff, 2014 ; Poulard et al., 2008; Bocher, 2005).

Il est généralement considéré que les mesures « douces » de ralentissement dynamique sont optimales pour des crues de période de retour inférieure ou égale à 2ans.

1.3 Présentation de la zone d'étude

1.3.1 Présentation et localisation du site d'étude



Le Bassin de la Sèvre-Nantaise se situe au sud-est de la ville de Nantes. Il est divisé entre les régions Pays de la Loire et Poitou-Charentes et s'étend sur les quatre départements que sont les Deux-Sèvres, la Loire-Atlantique, le Maine-et-Loire et la Vendée (cf. figure 1). Ce bassin s'inscrit dans le bassin hydrographique Loire-Bretagne (cf. figure 2 et atlas en annexe1-carte1). Il compte 134 communes dont Nantes, la plus grosse agglomération de la région.

Figure 1: Localisation de la zone du bassin versant d'étude en France

Le bassin de la Sèvre-Nantaise s'étend sur environ 2350 km², depuis les sources de la Sèvre-Nantaise situées dans les communes de Neuvy-Bouin et de Beugnon jusqu'à son exutoire situé à Nantes (site de l'EPTB de la Sèvre Nantaise). Sa rivière principale est la Sèvre-Nantaise qui s'écoule sur 136km avant de se jeter dans la Loire au sein de la ville de Nantes. Elle est le dernier grand affluent de la Loire avant l'Atlantique.

La Sèvre-Nantaise est la principale source d'eau potable du bassin, elle alimente 27 000 habitants et 11communes (site de l'EPTB de la Sèvre Nantaise). Le captage d'eau potable est localisé au sein de la commune du Longeron dans le département du Maine-et-Loire. Ce captage définit un bassin d'alimentation en eau potable d'une superficie d'environ 769km².

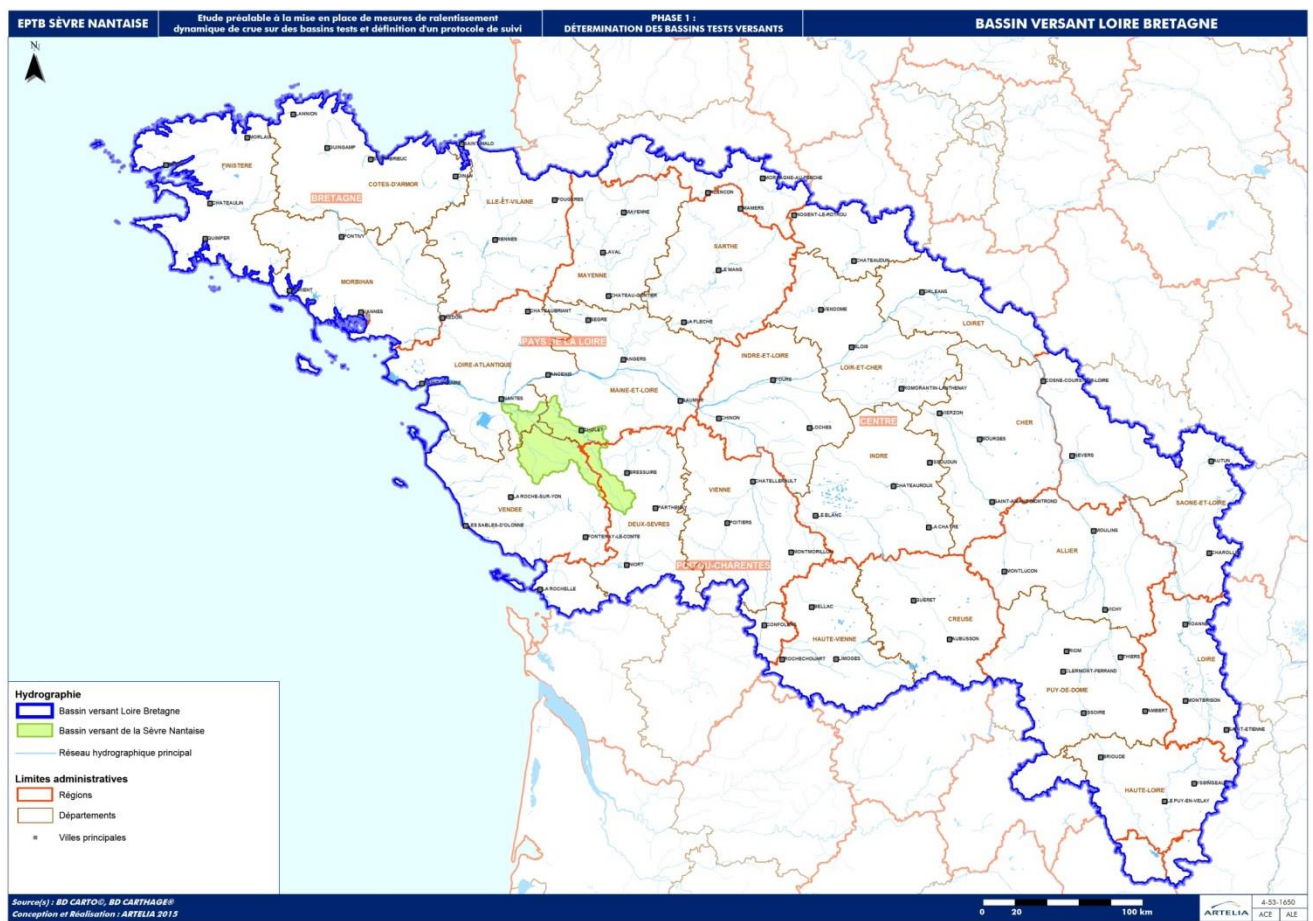


Figure 2: Présentation du bassin Loire-Bretagne, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France

1.3.2 Réseau hydrographique du bassin versant

Le bassin de la Sèvre Nantaise compte 6 cours d'eau principaux, la Sèvre Nantaise, la Maine, la Moine, la Sanguèze et l'Ouin (cf. figure 3 et atlas en annexe1-carte2). La pente de l'ensemble des rivières ne dépassant jamais 1 %, elles sont qualifiées de rivières de plaine (SAGE de la Sèvre-Nantaise 2006, Artelia). Les caractéristiques des affluents de la Sèvre Nantaise sont exposées ci-dessous (SAGE de la Sèvre-Nantaise 2006, Artelia). La Sèvre connaît des périodes de crues assez fréquentes, 5 inondations ont été recensées entre 1960 et 2001 avec des périodes de retour allant de 5 ans à 50ans. Le bassin souffre donc d'inondations relativement puissantes et récurrentes

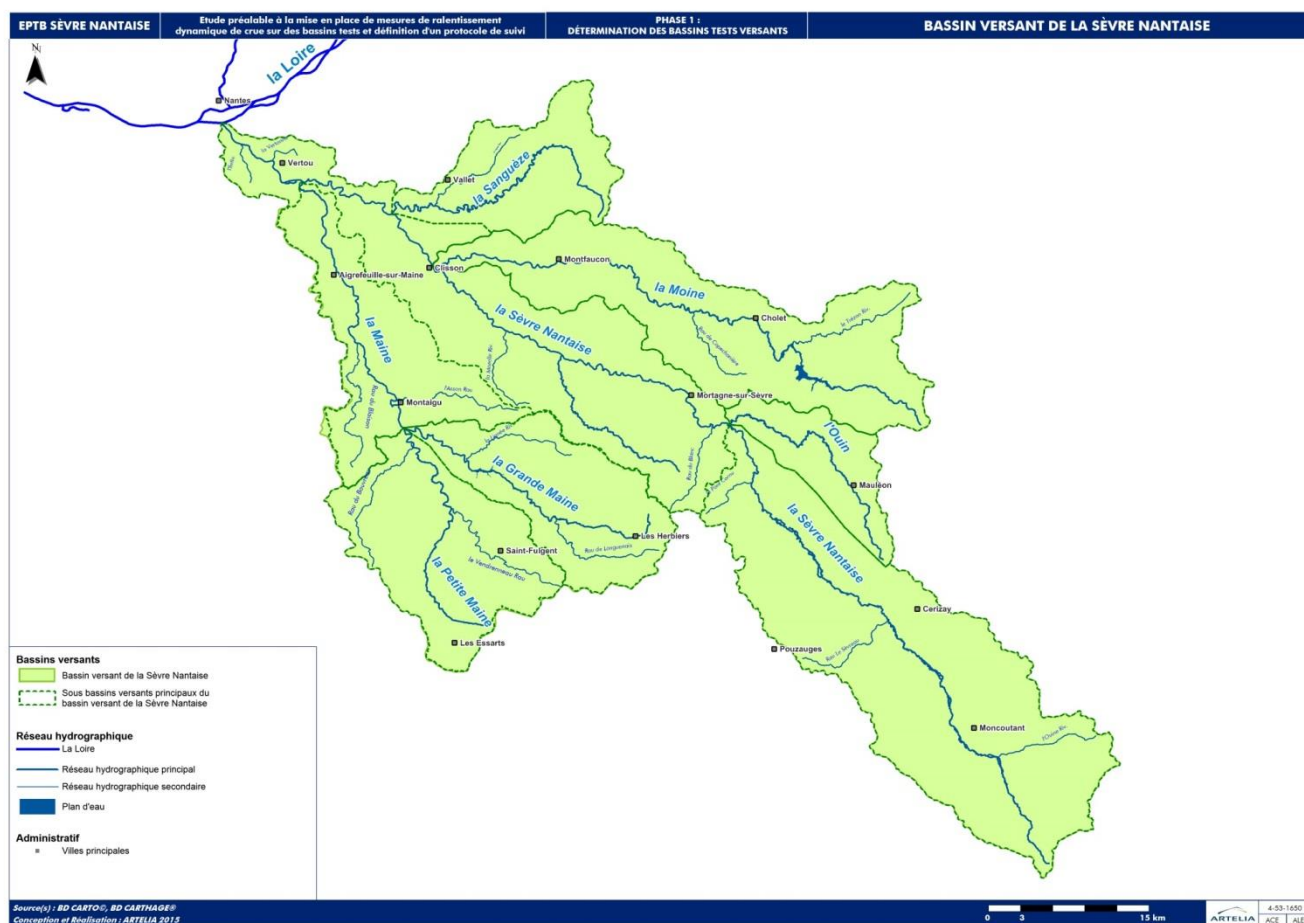


Figure 3: Présentation du réseau hydrographique de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France

Les caractéristiques des rivières du bassin de la Sèvre-Nantaise sont présentées dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 1).

Rivières	Type d'affluent de la SN	Communes sur la confluence	Longueur du réseau hydrographique	Superficie du bassin	Proportion par rapport au bassin de la SN	Type de crue
La Sèvre-Nantaise	/	/	136 km	2350 km ²	64%	Rapides et violentes
La Maine	De rive gauche	Vertou	97 km	209 km ²	9%	Crues sur 24h et décrues sur 2j
La Moine	De rive droite	Clisson	69km	382 km ²	16%	Crues et décrues sur 10h
La Sanguèze	De rive droite	Le Pallet	44km	162 km ²	7%	Crues et décrues sur 10h
L'Ouin	De rive droite	Saint-Laurent-sur-Sèvre	35km	100 km ²	4%	Crues sur 10h et décrues lentes

Tableau 1: Caractéristiques principales des affluents du bassin de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France

1.3.3 Caractéristiques climatique

Le régime hydrologique de la Sèvre Nantaise est pluvial donc très irrégulier, au faible débit d'étiage succèdent les forts débits de crue. Le climat général de la région est de type océanique, caractérisé par des pluies fréquentes. La pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin de la Sèvre est d'environ 810 mm avec des pointes à Secondigny de 1 052 mm.

1.3.4 Géologie et topographie du site

La géologie du bassin est assez hétérogène d'un sous bassin à l'autre. Les caractéristiques géologiques principales et remarquables sont résumées dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 2).

Rivières	Géologie du bassin	Impact sur le sol en termes de ruissellement
La Sèvre-Nantaise	Roches métamorphiques et loëss/alluvions	Peu perméable
La Maine	Roches métamorphiques et couches sédimentaire	Hydromorphe, ruissellements favorisés
La Moine	Roches granitiques et couches argileuses	Imperméable
La Sanguèze	Gabbros et alluvions	Peu perméable
L'Ouin	Roches éruptives et sédiments	Relativement perméable

Tableau 2: Géologie globale des sous-bassins versants de la Sèvre-Nantaise et sensibilité au ruissellement, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France

Malgré une variété de natures géologiques, l'ensemble du bassin est caractérisé par une certaine imperméabilité des sols. Cette particularité implique une tendance naturelle à un ruissellement prononcé ce qui renforce la place capitale de la problématique ruissellement dans notre étude sur le ralentissement dynamique.

L'ensemble du bassin de la Sèvre Nantaise est caractérisé par un relief accentué, prolongement du massif armoricain (cf. figure 4 et atlas en annexe1-carte3). Ces hauteurs offrent un obstacle aux circulations atmosphériques d'Ouest et de Sud-Ouest, ce qui génère de fortes précipitations. Les altitudes maximales et minimales sont respectivement de 290 mètres à St Michel-Mont-Mercure et 3m à Nantes.

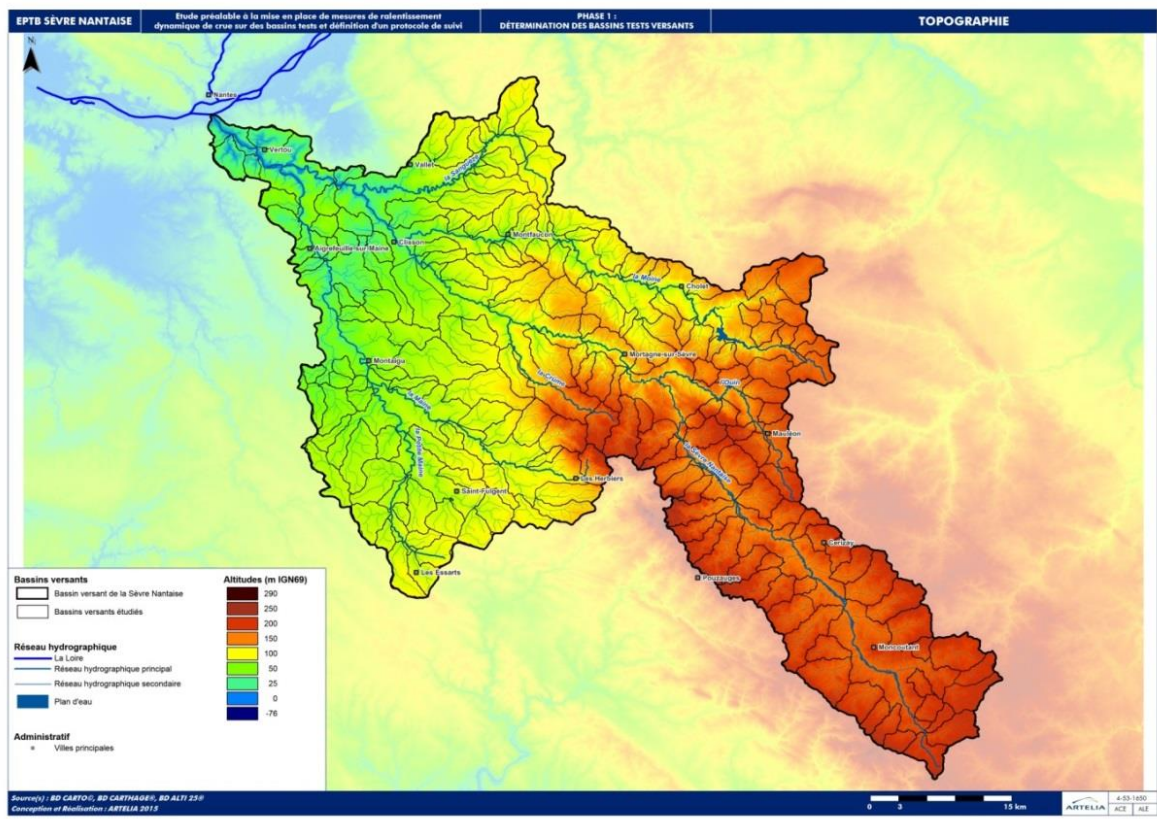


Figure 4: Topographie du bassin de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France

1.3.5 Occupation du sol

La description de l'occupation du sol du bassin de la Sèvre-Nantaise provient de la banque Corine Land Cover (CLC). La carte ci-dessous montre l'occupation du sol du bassin de la Sèvre-Nantaise (cf. figure 5 et atlas en annexe1-carte4).

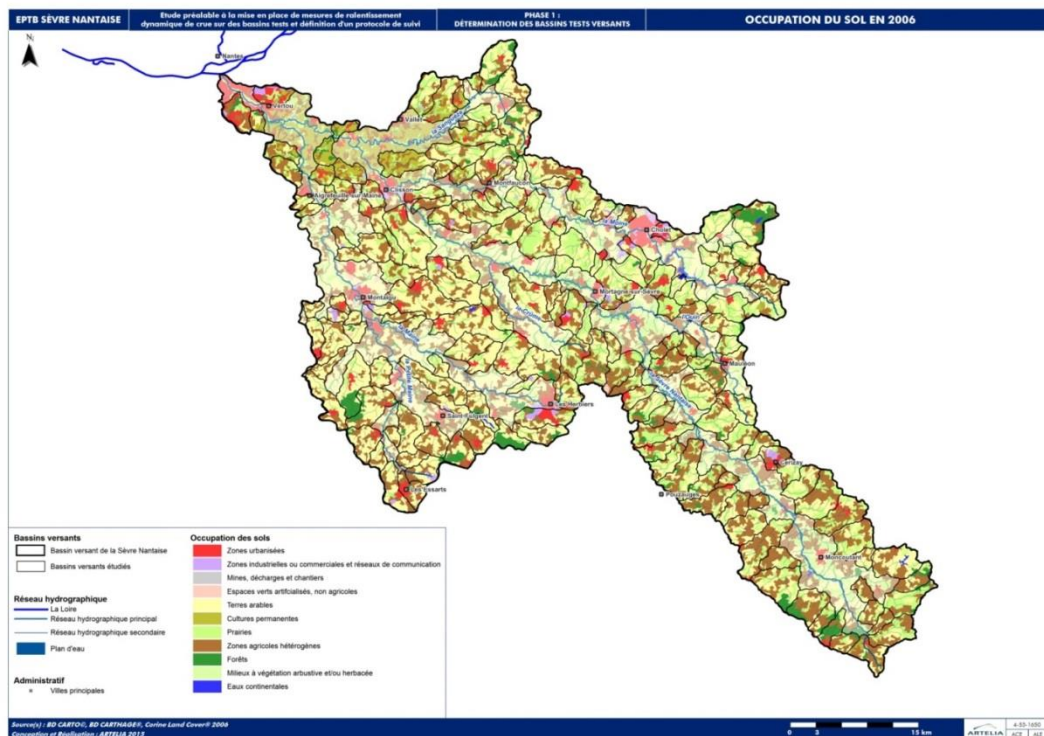


Figure 5: Carte de l'occupation du sol au sein de la Sèvre-Nantaise en 2006, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France. Source : Banque Corinne Land Cover 2006

1.3.5.1 L'urbanisation

Le bassin est relativement urbanisé du fait de la présence d'un grand nombre de communes (134). Les zones urbaines principales sont localisées :

- A l'ouest du bassin à l'approche de l'agglomération nantaise ;
- Au nord, au sein du bassin de la Moine où se situe la commune de Cholet (54 181 habitants en 2012) ;
- A l'ouest au niveau de l'embouchure de la Petite et Grande Maine se situe la communauté de commune des Terres de Montaigu (33 462 habitants en 2012) ;
- Au sud le bassin de la Grande Maine abrite la commune des Herbiers (15 688 habitants en 2012) ;
- Au sein du bassin du Longeron est implantée la commune de Bressuire (18 966 habitants en 2012) ;

La zone globalement la moins urbanisée et la moins peuplée correspond au bassin du Longeron qui correspond à la partie allongée en amont, à l'extrême sud-est du bassin de la Sèvre.

1.3.5.2 Les espaces agricoles

Le bassin est caractérisé par une importante densité de champs et de zones agricoles. Le territoire est plutôt bocager, avec des densités de haies relativement homogènes. L'activité se tourne principalement vers la monoculture intensive de plantes industrielles, essentiellement maïs, blé, orge, tournesol et autres oléagineux et protéagineux. Ce type de pratique culturale favorise le ruissellement et l'érosion des sols (Joannon, 2004 ; Bocher, 2005; Poulard et al., 2008) et sera donc discuté dans l'étude.

1.3.5.3 Les forêts et zones végétalisées

Le développement de l'agriculture a encouragé la déforestation, ne laissant que des zones forestières éparses et peu étendues. Néanmoins, les zones arbustives et sauvages sont encore relativement présentes, en particuliers en tête des bassins.

Les zones humides sont généralement situées en fond de vallée, le long des talwegs, elles sont donc assez peu concernées par les problématiques d'inondation par ruissellement. Ces zones à forte dynamique écologique sont relativement rares sur le bassin. La densité de zones humides est la plus importante dans le bassin du Longeron à hauteur de Pouzauges.

1.3.5.4 Les plans d'eau et ouvrages hydrauliques remarquables

Le repérage des plans d'eau est important pour la suite de l'étude puisque les bassins-versants sélectionnés ne devront pas en abriter. En effet, la présence d'étangs, lacs, retenues ou bras morts peut modifier les écoulements et les ruissellements ce qui donne au bassin une spécificité hydraulique qui ne sera pas généralisable à l'ensemble du territoire de la Sèvre-Nantaise.

De nombreux petits plans d'eau, non inventoriés, sont répartis sur l'ensemble du bassin mais leur importance est relative. Seuls quatre plans d'eau remarquables sont susceptibles d'impacter l'étude. Ils sont artificiels et correspondent à des retenues de barrages. Barrages et retenues sont listés ci-dessous :

- Deux barrages, le Ribou et le Verdon, ont été implantés sur la Moine en amont immédiat de Cholet. Ils jouent tous deux un rôle d'alimentation en eau potable et viennent en soutien pendant l'étiage de la Moine. Ils n'ont pas la fonction d'écrêteur de crue. Néanmoins, ces barrages influencent légèrement le temps de montée de la crue sur Cholet.
- Le barrage de la Bultière a été installé sur le cours de la Grande Maine à Chavagnes-en-Paillers. Il joue un rôle d'approvisionnement en eau potable, de soutien lors de l'étiage de la Maine ainsi que d'écrêteur de crues annuelles et décennales.
- Le barrage des Trois-Rivières est présent sur la commune du Longeron. Le barrage ne tient pas le rôle d'écrêteur de crue, les crues de décembre 1999 et janvier 2001 ayant contribué à le noyer. Il est destiné à l'approvisionnement en eau potable.

1.3.6 Le contexte réglementaire

Le SAGE, réalisé en 2006 établit une série de mesures à mettre en place au sein du bassin-versant de la Sèvre Nantaise. Une partie des actions proposées est en lien direct avec le ralentissement dynamique et vise en particuliers à limiter le ruissellement.

Suite au choix de la stratégie d'aménagement, un programme d'actions a été établi et notamment le lancement du projet de ralentissement dynamique. Les principales mesures envisagées en lien avec notre thème d'étude sont :

- Des actions de communication sur les techniques de réduction du ruissellement d'origine agricole ;
- Des actions de terrain :

- Maîtriser le ruissellement urbain ;
- Maîtriser le ruissellement routier ;
- Expérimenter sur des bassins tests ;
- Mettre en place de mesures de réduction de la vulnérabilité ;
- Revégétaliser des fonds de vallées.

Ce dernier PAPI a été validé pour servir de base à un nouveau PAPI sur la période 2012-2015. Une des actions centrales de ce nouveau PAPI consiste en une expérimentation à l'échelle de bassins-versants tests quant à la problématique des ruissellements et à l'évaluation des effets de mesures douces de réduction du ruissellement. Le projet d'aménagement dans le cadre du ralentissement dynamique s'inscrit donc dans une démarche à long-terme, globale, collective et issue d'une réflexion aboutie.

1.4 Données de l'étude

Les données de l'étude présentées ci-dessous proviennent des services de l'EPTB de la Sèvre-Nantaise.

1.4.1 Données SIG

Données	Description	Date
BD Alti	MNT du bassin de la Sèvre Nantaise (précision 25m et 50m)	2012/2013
BD Carthage	Cours d'eau principaux et secondaires du bassin de la Sèvre Nantaise Délimitation des bassins versants	2011
BD Ortho	Orthophotos du bassin de la Sèvre Nantaise	2011 et actualisation 2012
BD Parcellaire	Cadastre/délimitation parcelles Carte France	2011
BD Topo	Cadastre Eléments de l'environnement Limite administrative	2011/2012
Corine Land Cover	Occupation des sols	1990 – 2000 – 2006
MNT Radar DREAL PdL	Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la Sèvre Nantaise intermédiaire – Lambert 93 – précision 5m	2011
PCI-2012	Cadastre : Parcelles et Bâti du bassin de la Sèvre Nantaise	2012
SCAN25	SCAN25 du bassin de la Sèvre Nantaise	2007 - 2009
2014_Sol_Agrocampus_IGCS	Pédologie des sols sur la Sèvre-Nantaise	2013/2014

Tableau 3: Données SIG fournies par l'EPTB de la Sèvre-Nantaise en février 2015.

1.4.2 Données divers

Données	Description	Date
2010_Risques_inondations_GA SPAR_Prim_net	Rapport de stage – Les risques majeurs en Rhône Alpes Liste arrêté de CatNat des communes du bassin de la Sèvre Nantaise	2006
2014_Sol_Agrocampus_IGCS	Description du protocole IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols) – INRA Application au bassin de la Sèvre Nantaise	2013/2014
Agriculture_ASP_RPG	Détail des parcelles agricoles à l'échelle du bassin de la Sèvre Nantaise	
Climatologie_Meteo_France	Données pluviométriques à l'échelle du bassin de la Sèvre Nantaise	/
Haies	Localisation des Haies existantes à l'échelle du bassin de la Sèvre Nantaise	/
2006_enjeux_inondations	Localisation des enjeux impactés par les enveloppes de crues (5, 10, 50, 100ans) des principaux affluents	2012
2006_zones_inondables	Enveloppes d'inondation pour différentes occurrences (5, 10, 50, 100ans) des principaux affluents	2006
2009_Prelocalisation zones humides	Pré-localisation des zones humides sur la base du MNT (BD Alti) – précision moyenne	2009
2009_ruissellement	Catégories de ruissellement (Classe 1 à 4) – Etude globale du ruissellement à l'échelle du bassin de la Sèvre Nantaise (EPTB Sèvre Nantaise)	2009
2012_agregation_DEC_haies	Base de données sur les haies recensées sur le bassin de la Sèvre Nantaise	2012
2012_agregation_DEC_ZH	Base de données sur les zones humides recensées sur le bassin de la Sèvre Nantaise	2012
2012_Fusion_CLC2006_RPG2009	Analyse d'utilisation des produits phytosanitaires	2012
2012_Prelocalisation_tetes_bv	Délimitation des bassins de tête sur la base de la BD Alti dans le cadre du SAGE Sèvre Nantaise	2012
2013_Microbassins	Découpage de micros bassins versants dans le cadre du CTMA	2013
2014_Information_preventive_inondations	Recensement des dispositifs existants dans le cadre de la prévention des inondations pour les communes du bassin de la Sèvre Nantaise	2014

Tableau 4: Documentation fournie par l'EPTB de la Sèvre-Nantaise en février 2015.

2 PHASE 1 : DETERMINATION DES BASSINS VERSANTS TESTS

Cette phase est essentiellement fondée sur un travail géographique d'analyse du territoire complété par un traitement SIG avec le logiciel MapInfo. Elle consiste à étudier en détail les caractéristiques du territoire de la Sèvre-Nantaise à l'échelle des sous bassins-versants. L'objectif est de déterminer les sous bassins-versants les plus intéressants et les plus adaptés à une étude sur le ralentissement dynamique. La concrétisation finale du projet et des solutions proposées via l'implantation d'ouvrages implique de correctement choisir les bassins-versants. L'efficacité des actions et la réussite du projet dépend fortement du choix des objets d'étude.

2.1 Découpage du territoire de la Sèvre-Nantaise en sous bassins-versants

L'EPTB de la Sèvre-Nantaise a fourni une table SIG initiale où le bassin de la Sèvre était déjà subdivisé en plusieurs micros bassins-versants. Un redécoupage et un redimensionnement des bassins issus de cette table ont été nécessaires pour agrandir des bassins trop petits, corriger les erreurs de tracé et éviter que certains bassins ne soient parcourus par des affluents trop larges. En effet, les zones d'étude visées correspondent aux têtes de bassins de manière à éviter les zones inondables en périphérie des cours d'eau principaux pour lesquels les solutions « douces » de ralentissement dynamique ne sont pas efficaces. De plus, les inondations par débordement de cours d'eau majeur ne rentrent pas dans la problématique du projet.

Bien que le cahier des charges ait imposé comme condition une superficie de bassin inférieure ou égale à 10km², certains bassins sont plus étendus pour des raisons de cohérence avec le réseau hydrographique. Cette démarche permet également de diminuer sensiblement le nombre final de bassins à étudier. Au besoin, les sujets intéressants mais trop étendus pourront facilement être redimensionnés dans un second temps selon les critères de l'EPTB.

Au final, 181 bassin-versants ont été redécoupés. Ils ont situés en tête de bassin versant en amont des cours d'eau. Leur surface est comprise environ entre 3km² et 26km² (cf. figure 6 et annexe1-carte5).

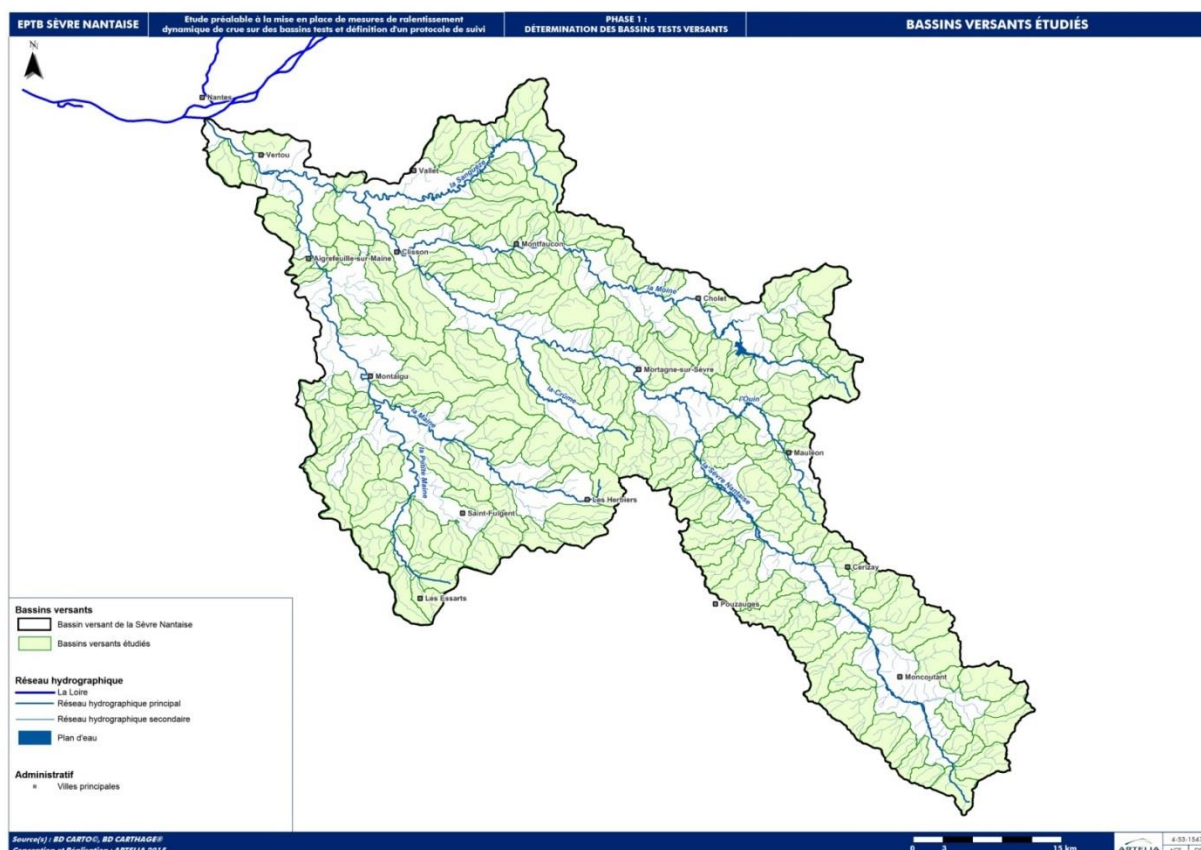


Figure 6: Présentation et localisation des 181 sous bassins-versants du bassin de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France

La délimitation des bassins-versants étant maintenant arrêtée, la prochaine étape consiste à les caractériser. L'étude est réalisée à l'échelle du micro bassin-versant. Cinq domaines de caractérisation seront abordés via :

- Une étude hydrologique, hydraulique et morphologique ;
- Une étude de la vulnérabilité au ruissellement ;
- Une étude sur l'occupation du sol ;
- Un inventaire des aléas ;
- Un inventaire des enjeux ;

Pour éviter toute lourdeur, les résultats des caractéristiques détaillées ne sont pas présentés pour les 181 bassins-versants. Seuls les caractéristiques des bassins-versants les plus intéressants sont présentées (cf.annexe3).

2.2 Etude morphologique

L'étude morphologique a pour objectif d'estimer le taux de « traits » morphologiques communs entre les bassins. L'idée finale est de sélectionner des bassins dotés des caractéristiques morphologiques les plus homogènes par rapport aux autres bassins dans le but de généraliser les résultats obtenus lors des tests et appliquer sans échec les mêmes solutions à d'autres territoires de la Sèvre-Nantaise.

Les caractéristiques morphologiques analysées sont les suivantes (cf. annexe 2 pour le détail des calculs) :

- La superficie en km²
- Le périmètre en km
- La longueur du talweg en km
- La pente du talweg en %
- La pente du bassin versant en %
- L'indice de Gravelius
- Les temps de concentration de Giandotti et Sogreah en min
- Le linéaire de cours d'eau en km/km²

2.2.1 La superficie des bassins versants

La superficie des bassins s'étale sur une large échelle, de 2,4 à 26,1 km² et présente une grande hétérogénéité (cf. figure 7, atlas en annexe1-carte6 et tableau 5). Les périmètres, varient également beaucoup, de 7,2 à 29km.

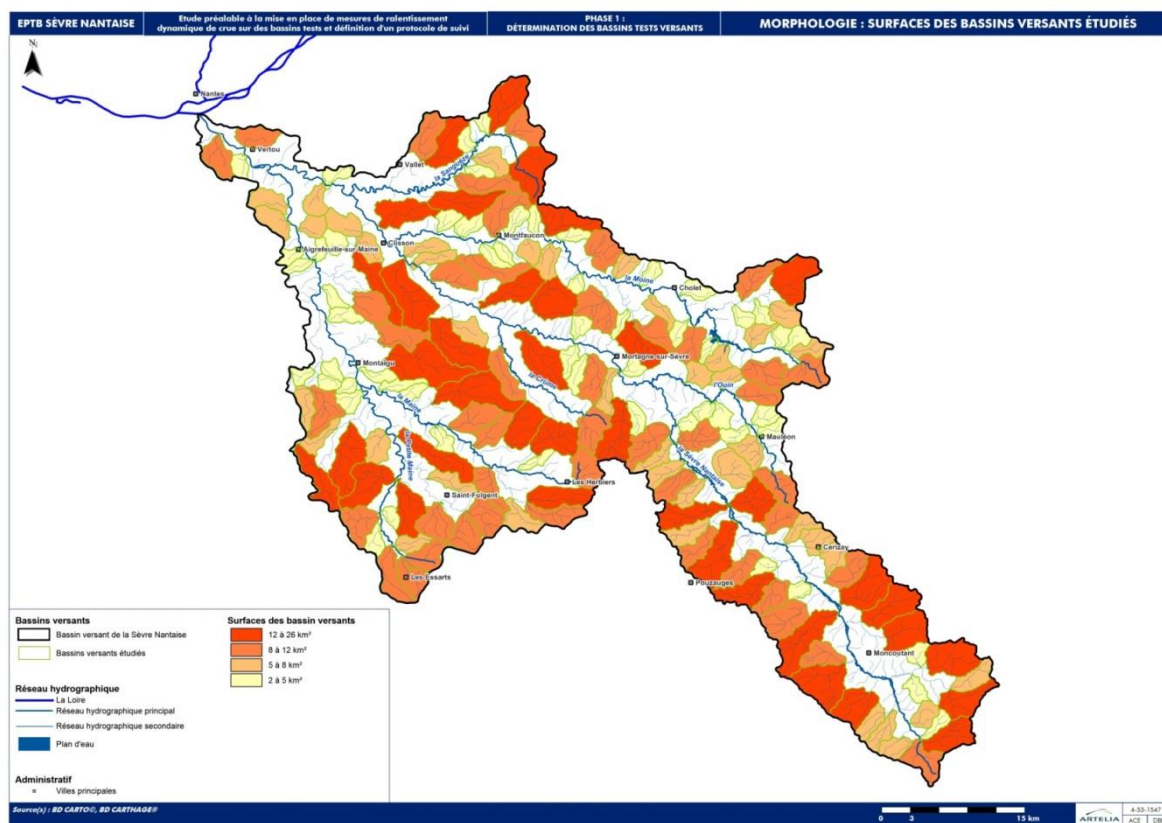


Figure 7: Analyse de la superficie des 181 sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France

Les bassins de superficie supérieure à 10km² et présentant des caractéristiques satisfaisantes seront au besoin redécoupés.

Intervalles	Superficie en km ²			
	inférieure à 5 km ²	de 5 à 10km ²	de 10 à 15 km ²	Supérieure à 15 km ²
Nombre de bassins	57	60	44	20

Tableau 5: Répartition des sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise en fonction de leur superficie, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France

2.2.2 Etude des pentes

Deux pentes ont été calculées, celle du talweg et celle du bassin versant (cf. annexe 2 pour le détail des calculs). Le calcul des pentes des bassins via MapInfo reste relativement peu précis et ne permet pas de juger de la présence de versants abrupts ou non. Les pentes des talwegs sont plus pertinentes, les cours d'eau à forte pente favorisent l'accélération des écoulements dans le lit.

Là encore est observée une certaine hétérogénéité (cf. tableau 6), les pentes des talwegs sont comprises entre 0,04 et 4% et celles des bassins entre 0,01 et 4,05%.

	Pente moyenne des talwegs (%)					
	<0.25%	0.25% à 0.5%	0.5% à 0.75%	0.75% à 1%	1% à 1.5%	>1.5%
Nombre de bassins	1	16	38	40	45	41

Tableau 6: Répartition des sous bassins-versants en fonction de la pente de leur talweg, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France

Globalement, les talwegs les plus en pente se situent dans la zone de transition entre l'amont du bassin de la Sèvre-Nantaise à une altitude d'environ 110mIGN et l'aval du bassin, de type plaine, à l'altitude maximale de 80mIGN (cf. figure 4 pour le rappel de la topographie).

2.2.3 L'indice de Gravelius

Le coefficient de Gravelius est un indice de compacité du bassin-versant permettant de caractériser sa forme. Cette morphologie a une influence directe sur le temps de concentration Tc (cf. annexe 2 pour les calculs). Ci-dessous, les trois exemples de sous bassins illustrent la notion de l'indice de Gravelius (cf. figure 8).

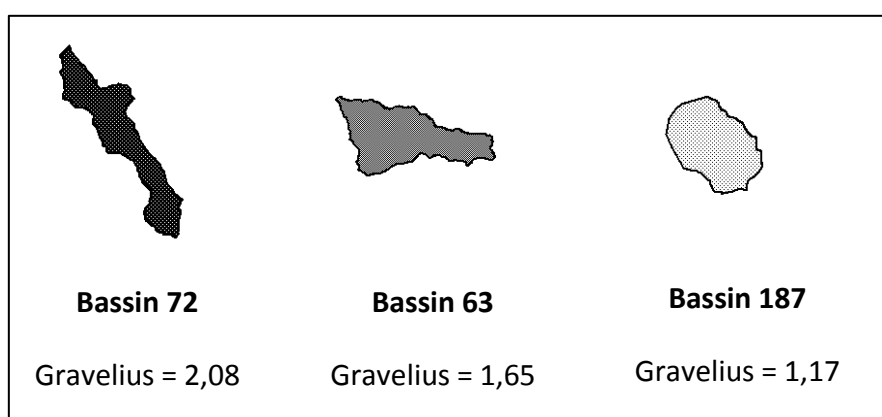


Figure 8: Illustration de l'indice de Gravelius avec trois bassins de la Sèvre-Nantaise

L'indice de Gravelius des bassins varie sur une échelle allant de 1,17 à 2,08. La forme des bassins est donc très variable.

2.2.4 Longueur de talweg

La longueur du talweg correspond à la longueur du chemin hydraulique le plus long (cf. annexe 2 pour les calculs). Elle est comprise entre 370 m et 10,6 km sur l'ensemble des bassins. De manière globale, un talweg court traduit le fait que le bassin versant est très peu étendu. Les bassins dotés d'un talweg trop court ne seront pas sélectionnés pour l'étude puisque le talweg correspond à un des objets principaux de l'étude.

2.2.5 Le linéaire de cours d'eau

Cet indice a pour but l'estimation d'une densité de cours d'eau ou de bras dans un bassin. Il correspond au ratio de la longueur de réseau hydrographique sur la surface du bassin et s'exprime en km/km^2 (cf. annexe 2 pour les calculs). Cet indice varie entre 0,3 et 1,7 km/km^2 . Là encore, les densités trop faibles ne sont pas intéressantes à traiter dans le cadre d'une étude hydrologique et hydraulique. Au contraire, une densité trop élevée peut s'avérer pénalisante en compliquant l'étude et en imposant des contraintes trop importantes pour des aménagements « doux ».

2.2.6 Temps de concentration

Les calculs de temps de concentration étant relativement imprécis, deux formules ont été testées de manière à obtenir un intervalle de valeurs et diminuer le risque d'erreur. Les formules retenues sont celles de Giandotti et de Sogreah car leurs conditions de validité ne sont pas limitantes et qu'elles conviennent aux bassins ruraux (cf. annexe 2 pour les calculs). Les formules de Kirpich et de Passini sont plutôt adaptées respectivement aux petits bassins-versants pentus et aux grandes plaines de plus de 40km^2 (Artelia).

Le tableau (cf. tableau 7) ci-après synthétise les temps de concentration calculés selon les classes de superficie des bassins-versants.

	Superficie (km ²)			
	inférieure à 5 km ²	de 5 à 10km ²	de 10 à 15 km ²	Supérieure à 15 km ²
Temps de concentration (min)	137	186	234	296
Temps de concentration	2h20	3h05	3h55	4h55

Tableau 7: Temps de concentration en fonction de la superficie des bassins de la Sèvre-Nantaise

Conclusion de l'étude des paramètres morphologiques

Il apparaît une grande hétérogénéité des caractéristiques morphologiques entre les 181 bassins-versants malgré leur appartenance au même ensemble de la Sèvre-Nantaise. Il apparaît difficile de mener une comparaison entre les bassins et d'en tirer des conclusions supplémentaires. L'intérêt principal est de localiser les bassins aux caractéristiques extrêmes de manière à ne pas s'y attarder au cours de l'étude.

2.3 Etude du ruissellement

La sensibilité au ruissellement est une notion clé de l'étude sur le ralentissement dynamique. L'évaluation de la sensibilité des bassins au ruissellement permet de pointer précisément les zones vulnérables et ainsi de déterminer les bassins particulièrement bien adaptés à notre problématique.

Les données de bases sont issues d'une étude sur le ruissellement de la Sèvre-Nantaise réalisée en 2009 (Binjamin F., 2009) et fournie par l'EPTB de la Sèvre-Nantaise. La carte ci-dessous (cf. figure 9 et atlas en annexe1-carte7) correspond aux données fournies.

Le type de ruissellement étudié est uniquement diffus et inclut le ruissellement Hortonien et le ruissellement à surface saturée.

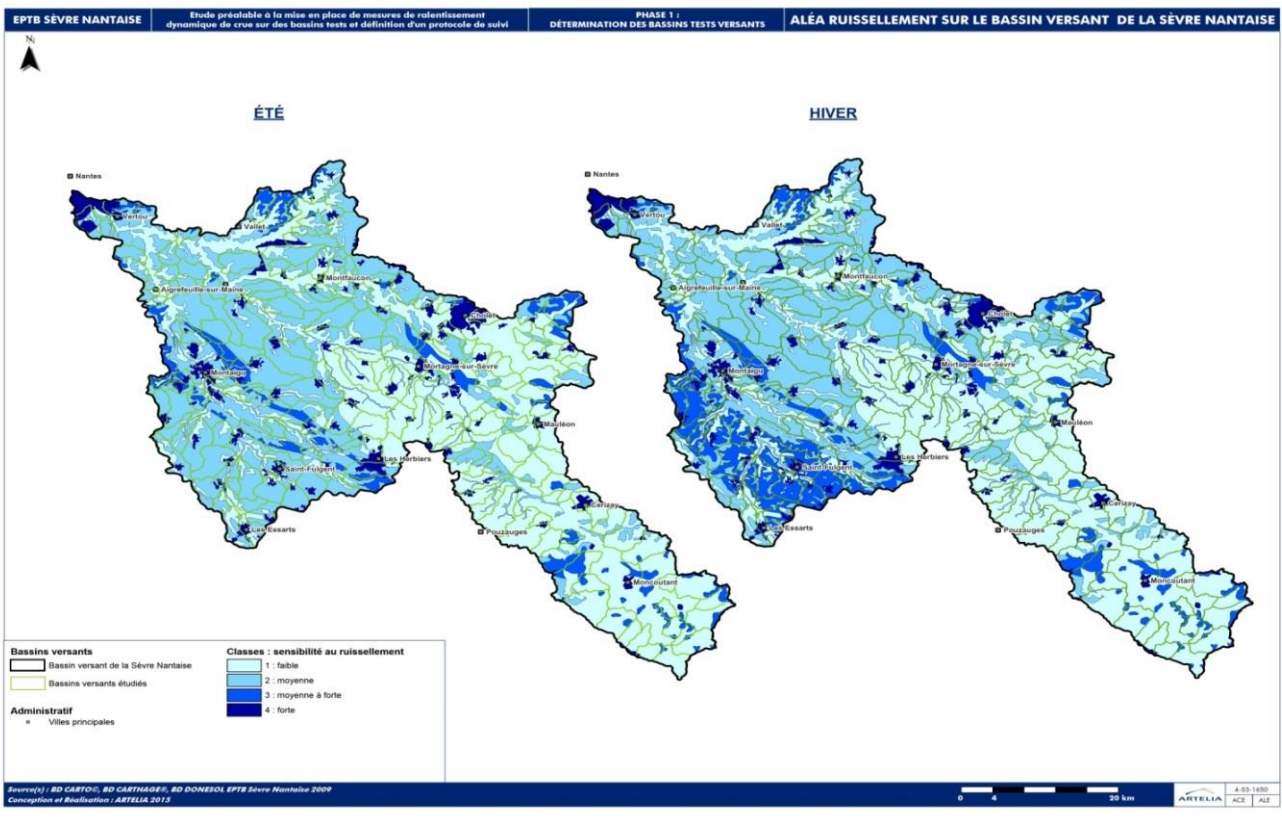


Figure 9: Sensibilité du bassin de la Sèvre-Nantaise au ruissellement, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France, 2009.
Source : Benjamin, 2009

Les tables SIG fournies avec l'étude précédente ont été redécoupées selon le patron des 181 bassins versants. Pour chaque bassin, un pourcentage de surface de classes 1, 2, 3 et 4 a été calculé. Le schéma ci-dessous (cf. figure 10) illustre la méthode utilisée :

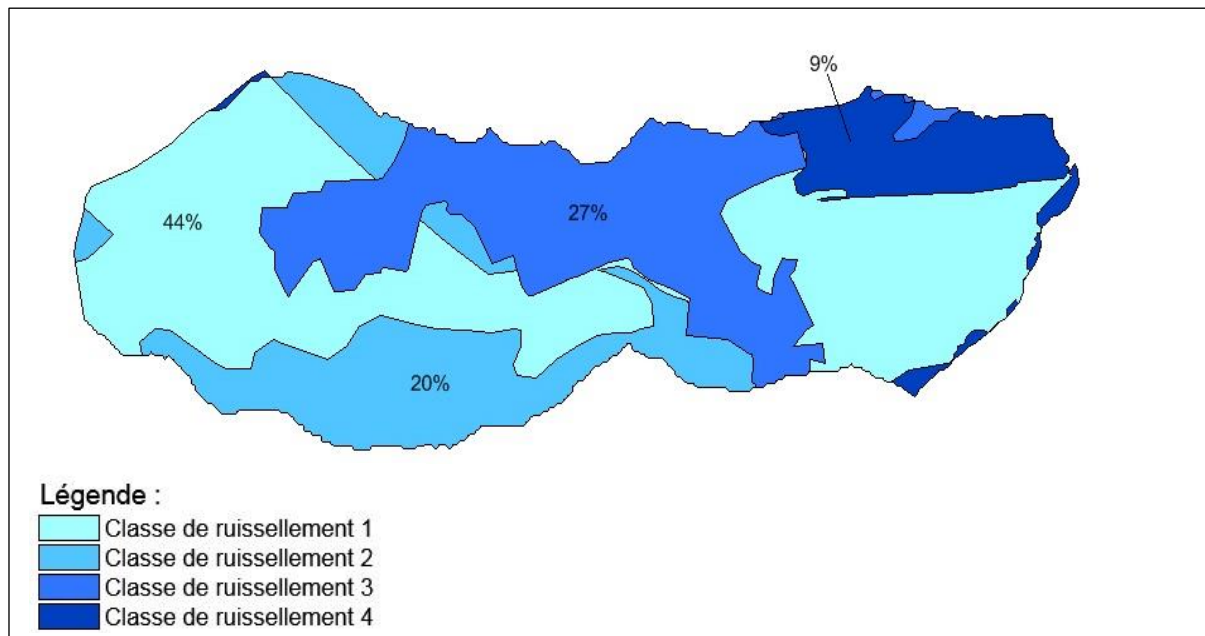


Figure 10: Illustration du résultat obtenu après traitement SIG de l'information de ruissellement.

Les bassins les plus intéressants pour l'étude correspondent à ceux caractérisés par une surface de ruissellement de classes 3 et 4 importante soit un pourcentage de classes 3 et 4 élevé. En effet, le ruissellement joue un rôle important dans le déclenchement des inondations et est donc considéré comme un des paramètres phares de l'étude .

Il est alors possible d'établir un classement des bassins par pourcentage de classes de ruissellement 1, 2, 3 et 4. Les cartes résultats permettent de rapidement localiser les zones du bassin de la Sèvre fortement sensibles au ruissellement, ce point sera repris en détail lors du prochain chapitre sur l'analyse dimensionnelle (cf. chapitre 3.1.81).

Conclusion de l'étude sur le ruissellement

Le bassin de la Sèvre-Nantaise présente une grande hétérogénéité de sensibilité au ruissellement. Certaines zones comme le bassin du Longeron sont peu sensibles à cette problématique. Les territoires fortement touchés par le ruissellement se concentrent dans le bassin de la Maine et au nord des bassins de la Sanguèze et de la Moine. L'ensemble des zones urbanisées sont caractérisées par un ruissellement très fort ce qui est logique au vu de leur taux élevé d'imperméabilisation.

2.4 Analyse du paysage

Cette analyse inclut l'occupation du sol, la densité de haies (soit le caractère bocager), la localisation de zones humides et le repérage des ouvrages hydrauliques majeurs.

2.4.1 L'occupation du sol

L'état de l'art sur le ruissellement et le ralentissement dynamique souligne bien l'importance de l'occupation du sol et son influence sur la genèse des écoulements (cf. chapitre 1.2.2). Les bassins vulnérables et donc sources d'intérêt pour notre étude sont caractérisés par une importante activité agricole et une raréfaction des zones végétalisées type forêts et prairies.

Les données sont issues de la banque nationale de données Corine Land Cover. Les 44 classes d'occupation ont été simplifiées et divisées en 5 classes soit :

- Les zones urbaines
- Les zones agricoles
- Les zones forestières
- Les zones de prairie
- Les zones de plans d'eau

La méthode d'analyse suit la même logique que celle pour le ruissellement. Chaque bassin-versant est caractérisé par la surface et le pourcentage de chacune des 5 classes d'occupation (cf. figure 11 et atlas en annexe1-carte8).

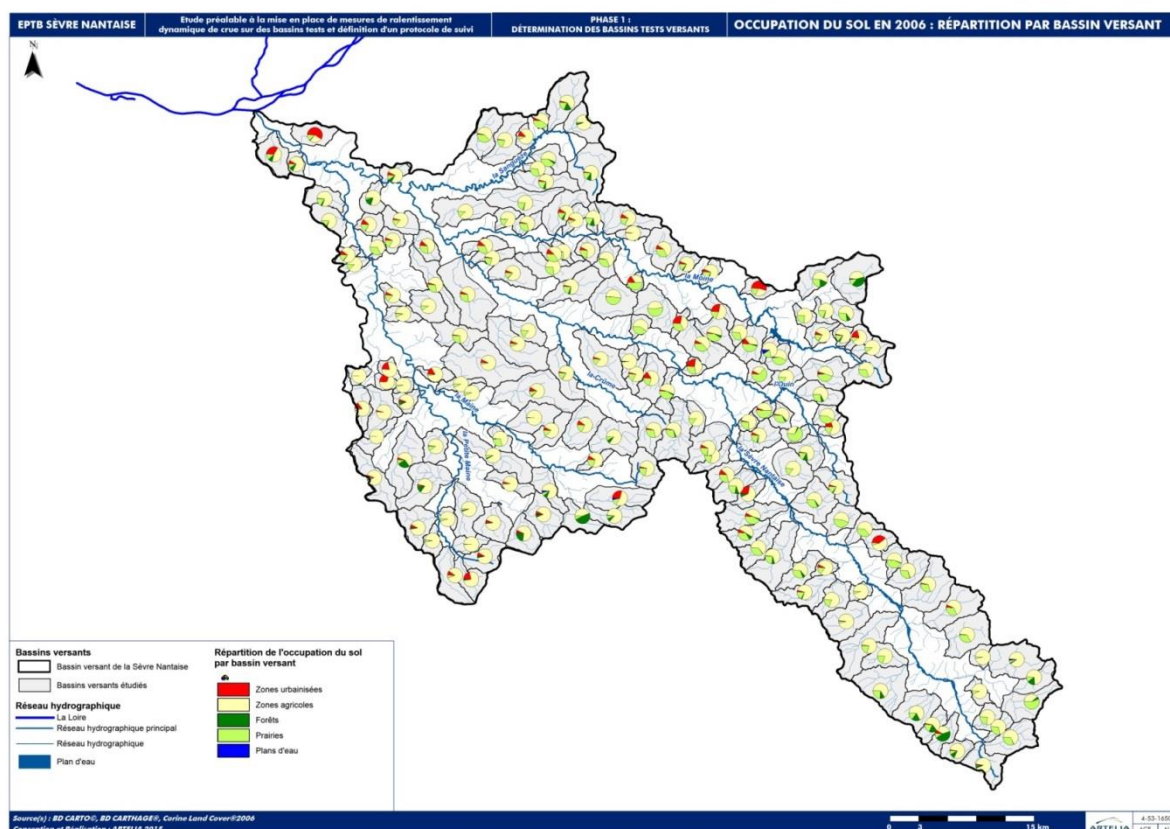


Figure 11: Occupation du sol par sous bassin-versant de la Sèvre-Nantaise en 2006, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France

Il est constaté que l'ensemble des bassins est majoritairement couvert par des surfaces agricoles puisque seuls 15 d'entre eux possèdent moins de 50% de champs.

Les zones forestières sont éparées et peu représentées en raison notamment de la déforestation nécessaire à l'expansion des champs. 146 bassins ont entre 0 et 5% de forêt sur l'ensemble de leur superficie.

Les prairies sont un peu plus épargnées, 4 bassins atteignent même une superficie enherbée supérieure à 50%.

Les zones urbaines sont globalement peu représentées sur le bassin de la Sèvre-Nantaise. Seuls 2 bassins sont à dominante urbaine, notamment en périphérie de la métropole de Nantes et de la commune de Cholet. L'urbanisation est comprise entre 0 et 5% pour 115 bassins.

L'activité agricole caractérise donc fortement le bassin de la Sèvre-Nantaise et induit une problématique ruissellement importante pour la majorité des bassins.

2.4.2 Les paysages atypiques : bocages et zones humides

L'état de l'art sur le ruissellement et le ralentissement dynamique évoque très fréquemment le rôle du bocage sur les écoulements (cf. chapitre 1.2.2). Bien que son efficacité soit remise en question par certaines études (Viel et al., 2014; Poulard et al., 2008), les haies demeurent

un aspect important du paysage dans la dynamique des écoulements. Globalement, il peut être considéré qu'un bassin avec une forte proportion de zones humides constitue un territoire plus préservé notamment vis-à-vis du risque inondation. De plus, ces zones ne permettent pas la mise en place d'actions supplémentaires de ralentissement dynamique.

La méthode d'analyse n'est pas la même pour le bocage et les zones humides. Le bocage a été appréhendé en calculant un ratio de longueur de haies par surface, les résultats ont pour unité le km/km². L'analyse des zones humides suit la même méthode que les analyses du ruissellement et de l'occupation du sol, à savoir, la détermination d'un pourcentage de zones humides par bassin en termes de surface. La carte ci-dessous (cf. figure 12 et atlas en annexe1-carte9) présente les résultats.

Il apparaît que les zones humides sont relativement peu conservées au sein des bassins puisqu'elles représentent moins de 10% de la surface pour 175 bassins. Cette caractéristique paysagère ne sera donc pas approfondie au cours de l'étude.

La densité de haie est importante et homogène sur l'ensemble du bassin ce qui limite la possibilité d'actions et d'aménagements en terme de « rebocagisation ».

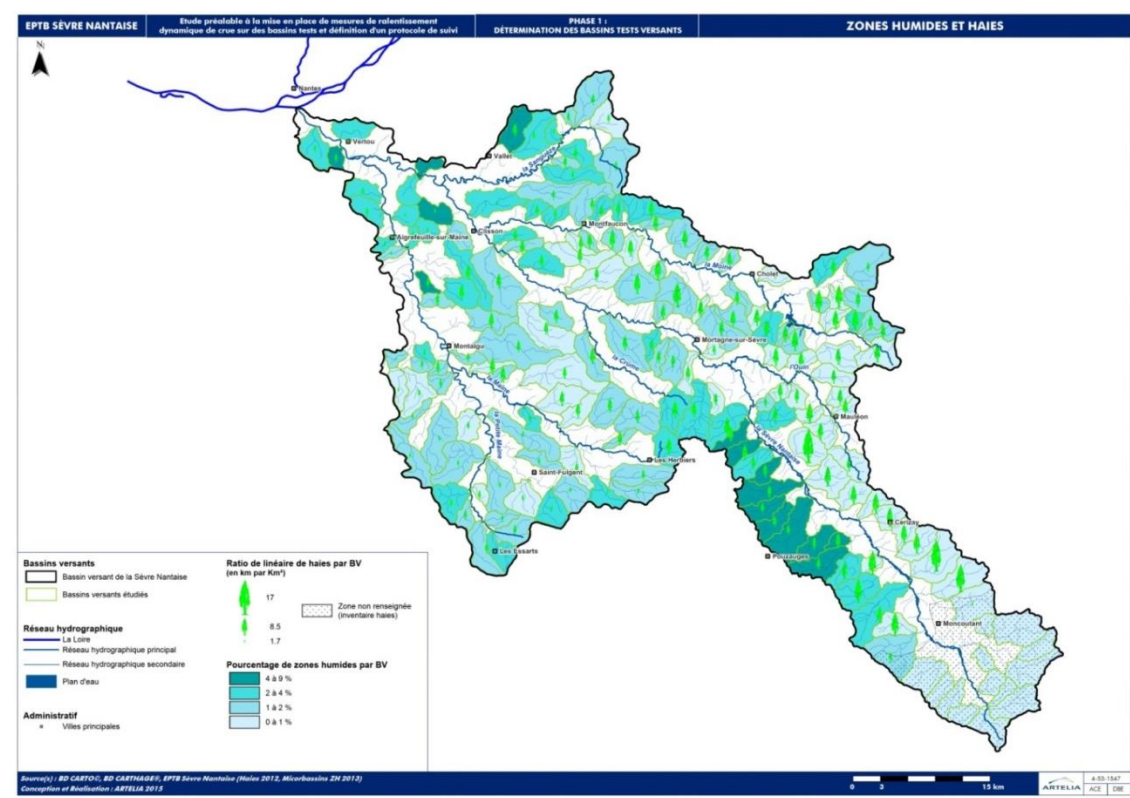


Figure 12: Répartition du bocage et des zones humides au sein des sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise en 2012, Pays de la Loire, France.

2.4.3 Les ouvrages hydrauliques majeurs

La présence d'ouvrage a été évoquée lors de la présentation du réseau hydrographique du bassin de la Sèvre-Nantaise. Ils sont au nombre de quatre :

- Les barrages du Ribou et du Verdon sont présents sur la Moine

- La Bultinière est situé sur la Maine
- Le barrage des Trois-Rivières, implanté sur la Sèvre Nantaise, détermine l'aire d'alimentation en eau potable du Longeron.

La localisation de ces ouvrages est importante puisqu'ils permettent d'éliminer directement de la liste de choix les bassins-versants où ils sont implantés. En effet, les barrages impliquent la création d'une retenue d'eau en amont ce qui peut influencer la réponse du bassin à une inondation.

Conclusion sur l'occupation des sols et du paysage

La majorité des 181 bassins est caractérisée par une intense activité agricole dans le cadre d'un paysage bocager bien conservé. Les zones urbaines sont ponctuelles et ne concernent qu'une minorité de bassins. L'ensemble du bassin de la Sèvre-Nantaise souffre d'un manque de végétalisation tant au niveau des forêts que des prairies et zones enherbées. La majorité des bassins sont particulièrement vulnérables au risque ruissellement. Cette conclusion appuie la démarche de mise en place de mesures de ralentissement dynamique au sein du bassin de la Sèvre-Nantaise.

2.5 Etude de l'aléa inondation

Les bassins versants à retenir doivent être caractérisés par des aléas inondations remarquables. Pour ce faire, une analyse a été réalisée pour chacun des bassins versants définis.

Les données aléas se présentent sous trois types d'information :

- Les atlas de zones inondables AZI de la Sèvre-Nantaise, la Moine, la Maine, la Sanguèze et l'Ouin pour des périodes de retour de 5, 10, 20, 50 et 100ans (2006). Il résulte que 33 bassins sont ainsi considérés en zone inondable (cf. figure 13 et atlas en annexe1-carte10).
Ces données ne s'avèrent pas être capitales puisque l'essentiel des zones inondables est induit par le débordement de cours d'eau et non par un phénomène de ruissellement ou d'écoulement depuis les versants.
- La base Gaspar fournit un nombre d'arrêtés de catastrophes naturelles par communes (cf. figure 13 et atlas en annexe1-carte10). Chaque commune est assimilée à un nombre d'inondations recensées, donnant ainsi une idée d'une fréquence relative du risque encouru. Les communes comptant le plus d'arrêtés sont Cholet, les Herbiers et les communes longeant la Sèvre-Nantaise. La couche SIG date de 2010. Le problème est d'interpréter les informations de la vase GASPAS en séparant bien les inondations issues de crues violentes et celles issues du ruissellement.

- Une enquête auprès des communes sur l'occurrence des inondations réalisée en 2014(cf. figure 13 et atlas en annexe1-carte10). Cette information semble peu fiable puisque d'une part, le nombre de réponses au questionnaire est limité et d'autre part, certaines réponses sont en contradiction avec la base GASPARD. De plus, cette information donne plutôt des indications sur les débordements de cours d'eau. Nous ne prenons finalement pas du tout en compte cette information.

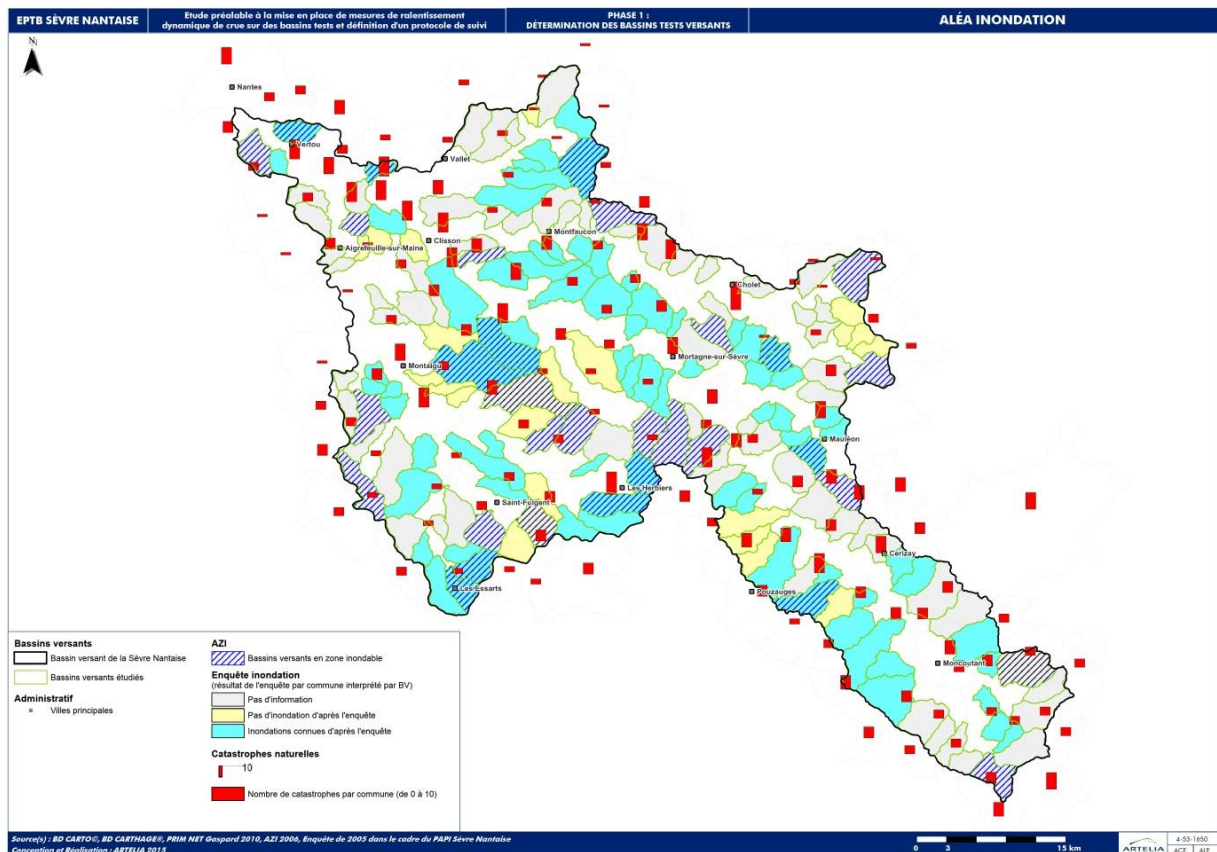


Figure 13: Répartition des aléas inondations au sein du bassin de la Sèvre-Nantaise, zones inondables (2006), nombre de catastrophes naturelles (2010) et enquête inondations (2014) Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.

Seule la base Gaspar est incorporée à l'analyse pour le choix des bassins tests mais les données seront prudemment analysées.

Conclusion sur les aléas

Les données de base ne sont pas réellement axées sur la problématique ruissellement et les conclusions tirées de cette analyse restent à nuancer. Néanmoins, le rôle joué par le ruissellement dans le déclenchement des inondations n'est pas précisément connu et toute information s'avère non négligeable. De manière à avoir une vision exhaustive du risque inondation, il apparaît nécessaire de visualiser les zones particulièrement propices aux débordements, c'est une information supplémentaire à ne pas ignorer.

2.6 Analyse des enjeux

Les enjeux correspondent à l'inventaire du nombre d'habitats, d'infrastructures, d'entreprises et d'équipements publics dégradés par les inondations précédentes.

Deux sources de données ont été croisées, un inventaire établi par Sogreah dans le cadre de l'élaboration du SAGE de la Sèvre Nantaise et un inventaire établi par l'ETPB. Le premier inventaire concerne l'ensemble du bassin de la Sèvre Nantaise tandis que le second détaille les enjeux à l'échelle des micros bassins-versants. Néanmoins, ces données se recoupent bien et sont cohérentes comme l'illustre la carte ci-dessous (cf. figure 14 et atlas en annexe1-carte11).

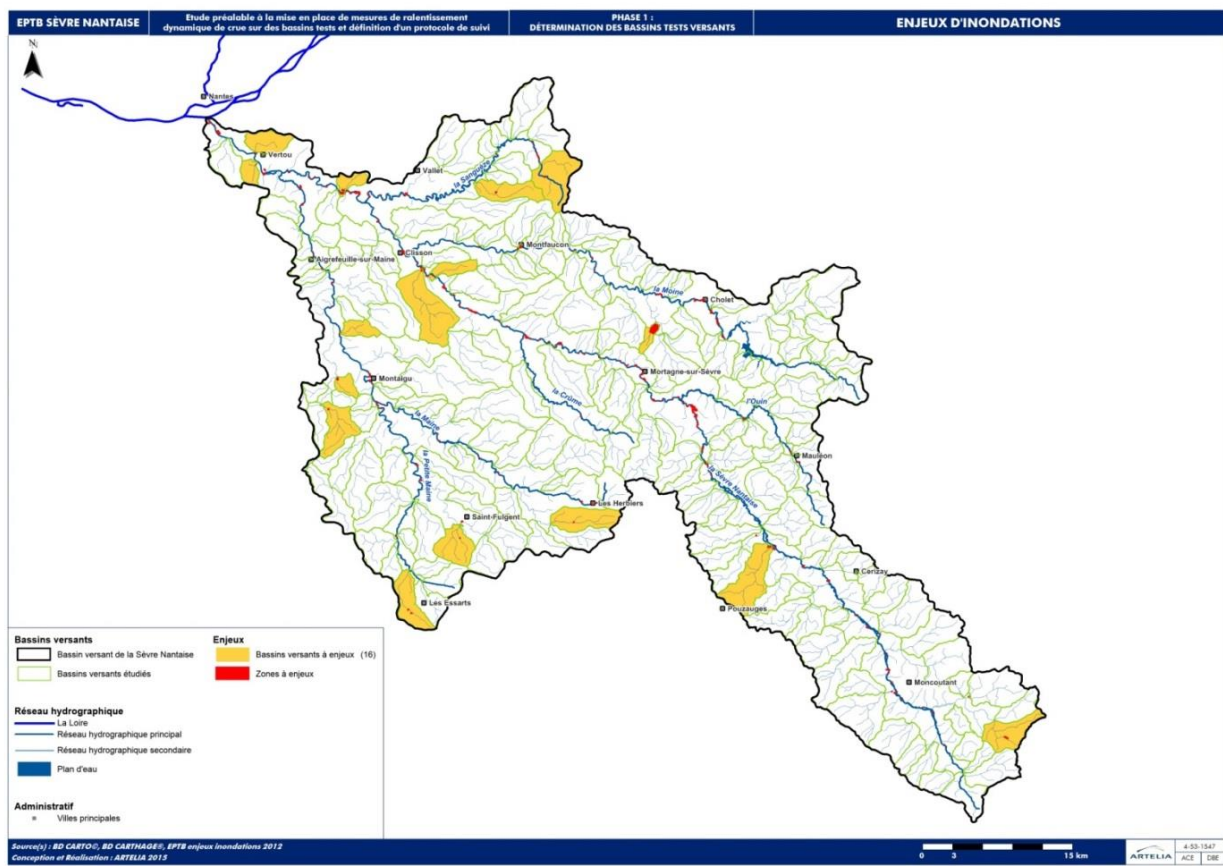


Figure 14: Localisation des enjeux au sein du bassin de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, 2006.

L'inventaire des enjeux est une information plus ou moins précise et qui se rapporte généralement à des zones en périphérie directe de cours d'eau. Une grande partie des enjeux ne concernent donc pas les bassins-versants étudiés car ceux-ci sont situés majoritairement en tête de bassin.

Conclusion sur les enjeux

Au total, 15 bassins sur 181 sont touchés par des enjeux. Le nombre d'enjeux total maximal déterminé au sein d'un bassin s'élève à 5. Ce chiffre reste faible, néanmoins, une attention particulière est portée aux bassins concernés.

2.7 Analyse multidimensionnelle et choix final des bassins-versants tests

Sur la base des éléments présentés précédemment, une analyse multicritère a été réalisée dans le but de déterminer un panel de bassins-versants aptes à faire l'objet de l'étude de ralentissement dynamique.

Les critères de choix des bassins versants sont :

- Une superficie de l'ordre de **10 km²**. Cette superficie relativement réduite permet une étude exhaustive des phénomènes de ruissellement et une meilleure évaluation de l'efficacité des aménagements proposés ;
- Des contextes d'occupation des sols différenciés, à savoir un bassin à majorité urbain et un autre à majorité rural ;
- Des problématiques d'inondation par ruissellement avéré ;
- Des enjeux touchés par ces problématiques ;
- Les bassins sélectionnés doivent présenter des caractéristiques en cohérence avec l'aménagement de solutions de ralentissement dynamique et être suffisamment sensibles aux inondations pour que ces aménagements présentent un véritable intérêt.

2.7.1 Méthodologie de l'analyse

L'analyse menée consiste à hiérarchiser les micros bassins-versants en fonction des éléments déterminés durant la phase de caractérisation des bassins-versants.

Pour rappel, la caractérisation des bassins-versants s'articule autour des éléments suivants :

- Paramètres morphologiques
- Occupation des sols et paysages
- Existence et importance de l'aléa inondation par ruissellement
- Présence d'enjeux

Le client souhaite obtenir un choix relativement large de bassins, l'objectif est de fournir une liste d'une vingtaine de bassins environ.

Cette analyse n'est pas basée sur un système de pondération et de notes distribuées à chaque bassin. Le principe consiste à passer les 181 bassins à travers plusieurs « filtres » correspondant à des conditions posées sur les paramètres de sélection.

L'analyse repose sur :

- Un ensemble de paramètres classés du plus pertinent au moins important ce qui revient à réaliser une pondération implicite
- Le choix de seuils supérieurs ou inférieurs à respecter pour chaque paramètre

Le schéma ci-dessous (cf. figure 15) illustre le principe de l'analyse :

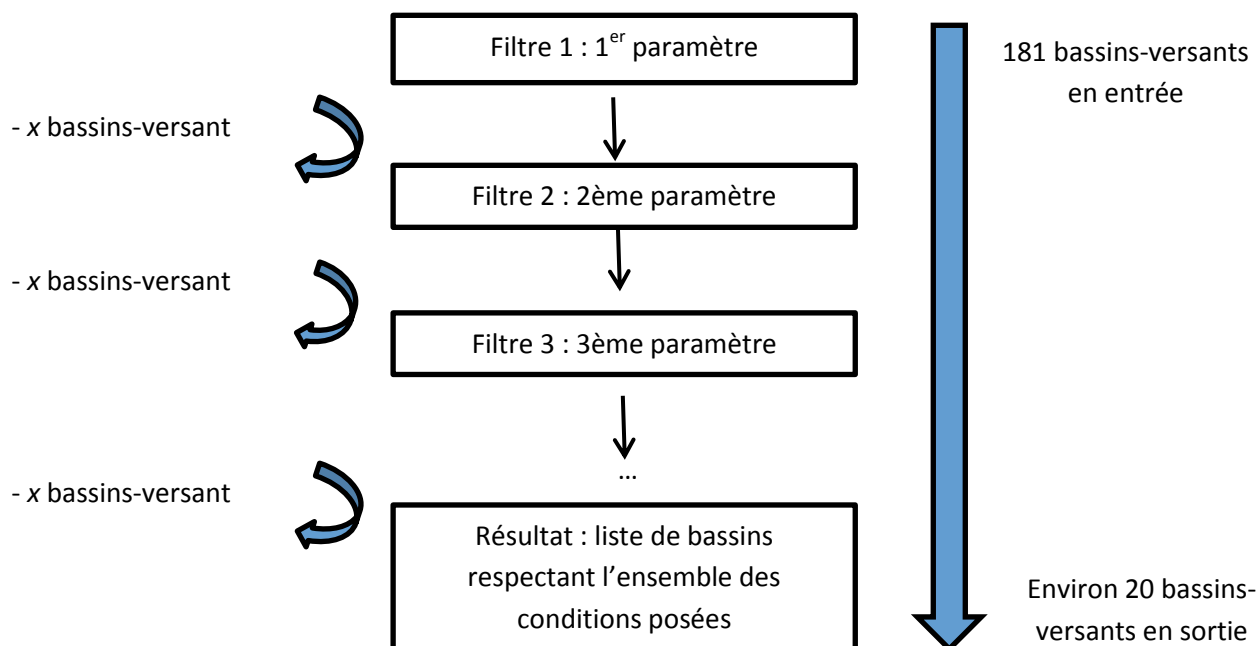


Figure 15: Illustration de la méthode utilisée pour l'analyse multidimensionnelle.

Trois paramètres apparaissant comme pertinents dans le cadre de la problématique du ralentissement dynamique ont été pris en compte, par ordre d'importance :

- La classe de sensibilité au ruissellement
- Les catastrophes naturelles recensées par la base GASPARE
- La surface du bassin

Chaque étape de l'analyse est présentée en détail dans les chapitres suivants.

2.7.2 Filtre 1 : la sensibilité au ruissellement

Ce paramètre apparaît comme étant, de loin, le plus pertinent puisque le ruissellement est une notion fondamentale du ralentissement dynamique. Pour mieux visualiser les bassins particulièrement sensibles, nous avons décidé de prendre en compte les classes 3 et 4 et d'additionner leur pourcentage. La classe 3 est en effet déjà révélatrice d'une certaine vulnérabilité. Plusieurs seuils de pourcentage de classe (3+4) ont été testés. Le nombre de bassins conservés varie sensiblement selon ce choix comme l'indique le tableau ci-dessous (cf. tableau 8).

Seuils minimums de classe (3+4)	Nombre de bassins restants sur 181
40%	35
50%	26
60%	16
70%	10

Tableau 8: Nombre de sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise en fonction du seuil de sensibilité au ruissellement.

La localisation des bassins selon le seuil de ruissellement est indiquée sur la carte ci-dessous (cf. figure 16 et annexe1-carte12).

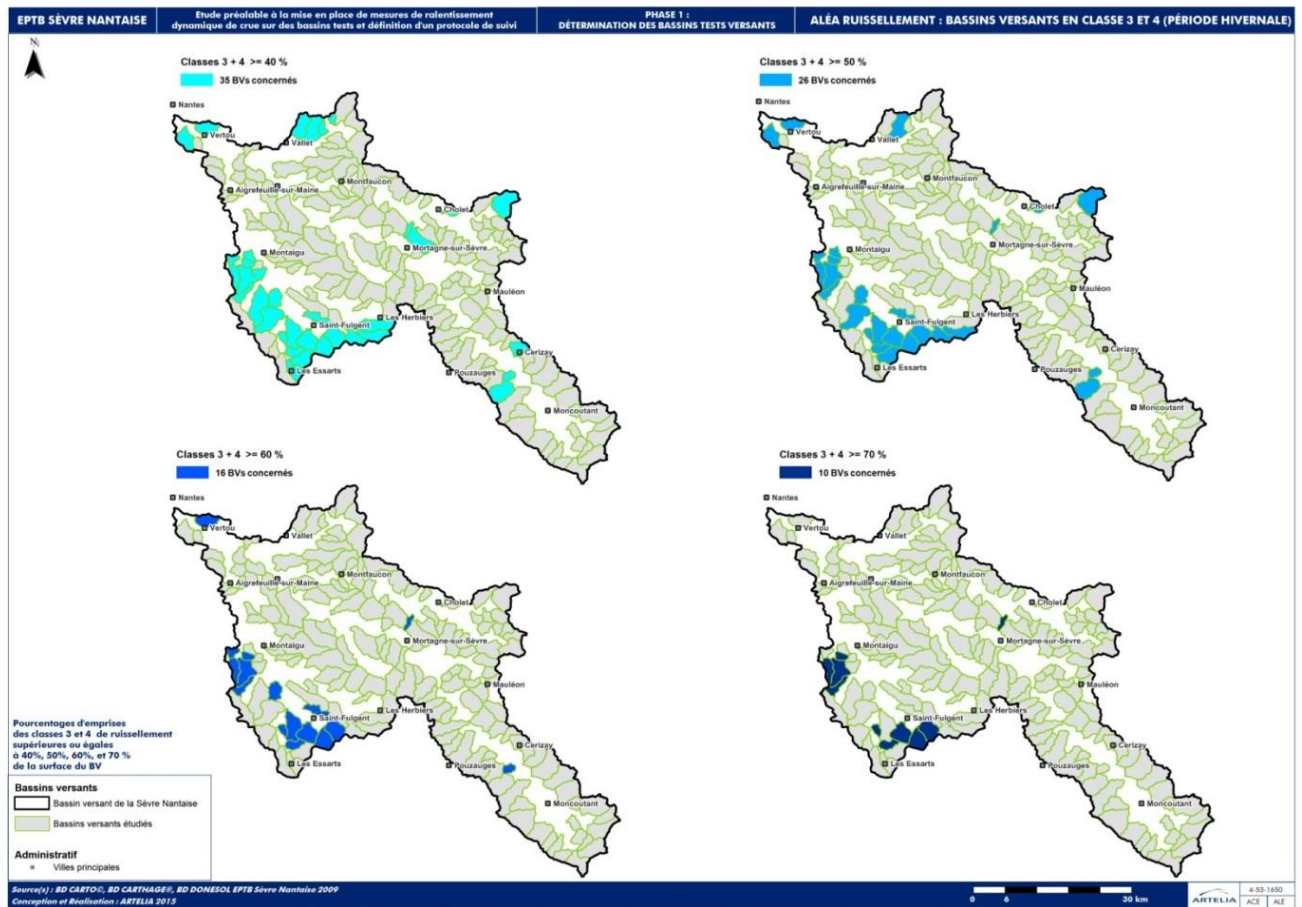


Figure 16: Localisation des sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise en fonction du seuil de sensibilité au ruissellement.

Nous constatons que la vulnérabilité au ruissellement induit un tri important des bassins. Les seuils à 60 et 70% apparaissent comme trop exigeants puisque le nombre de bassins restants est trop faible. Le seuil de 50% est un bon compromis et traduit une sensibilité suffisante pour l'étude.

2.7.3 Filtre 2 : Les arrêtés inondations de la base GASPARD

Malgré la faible corrélation entre les arrêtés inondations et la problématique du projet, il semblait important de prendre un minimum en compte les événements passés qui fournissent une information réelle sur la vulnérabilité des bassins aux inondations. L'information a été traitée de manière particulière puisque notre attention ne s'est pas portée sur les bassins directement inondés (ce n'est pas l'enjeu de ce projet) mais vers les bassins en amont des zones d'inondation qui auraient pu jouer un rôle, via le ruissellement, dans la naissance de l'inondation. L'idée consiste à sélectionner des bassins supplémentaires, caractérisés par un ruissellement relativement remarquable, susceptibles d'avoir entraîné des inondations en aval.

Pour minimiser le risque de surpondérer ce paramètre, deux conditions ont été posées :

- Pour conserver la cohérence avec le seuil de ruissellement retenu précédemment, ces bassins d'ajout doivent respecter un seuil minimum de ruissellement de classe (3+4) de 40%. Ce seuil, qui reste élevé, garantit également que les bassins-versants sont susceptibles d'entraîner un surplus d'écoulements.
- Le seuil minimum d'arrêtés inondation est fixé à 6 sur une échelle de 0 à 10. Seuls les bassins-versants ayant impactés de manière répétitive les zones aval sont pris en compte.
- La sélection des bassins est réalisée au cas par cas en analysant la position de chaque bassin et les caractéristiques des zones aval. Ainsi, si un bassin présente plus de 6 arrêtés catastrophes naturelles mais qu'une rivière remarquable le traverse, il est probable que l'élément déclencheur des inondations soit uniquement la rivière et non le bassin en amont.

Au final, seuls 3 bassins-versants sont rajoutés à la liste (cf. figure 17 et atlas en annexe3-carte13).

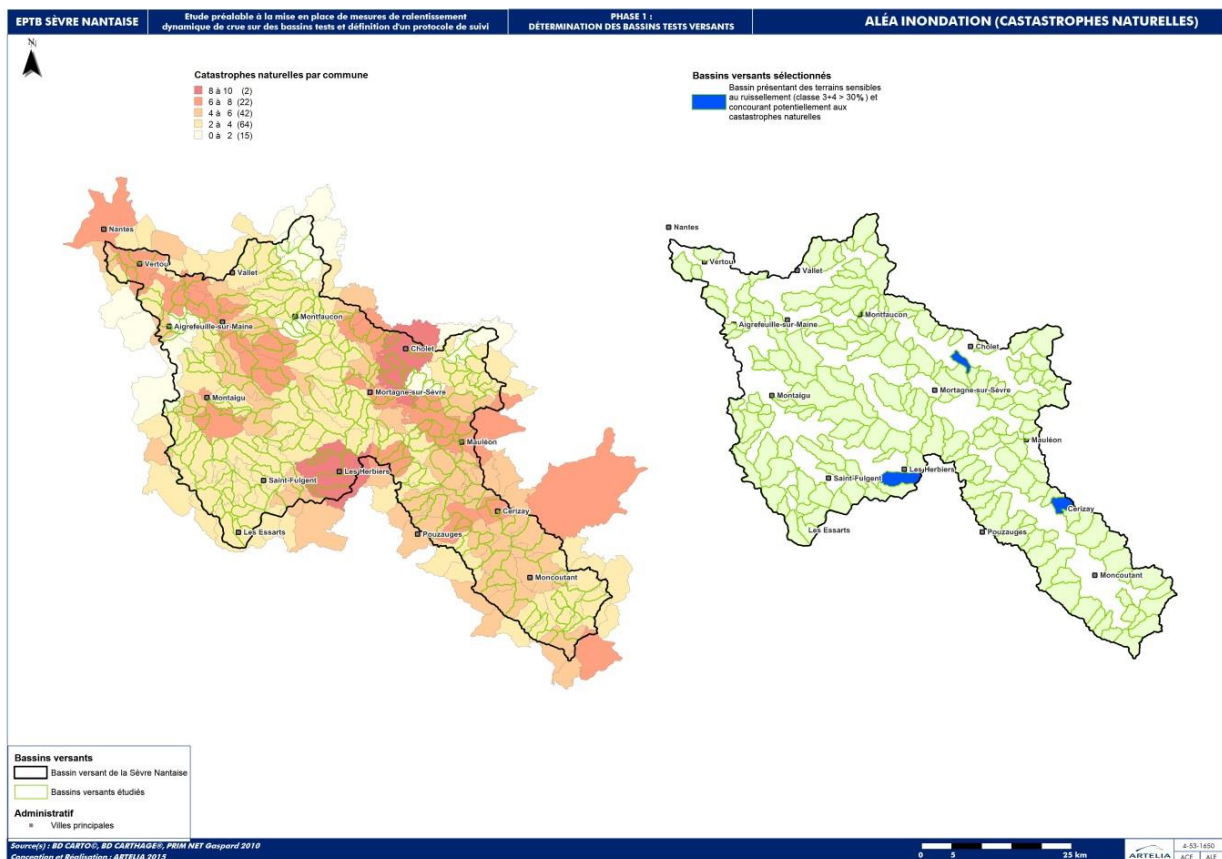


Figure 17: Localisation des sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise potentiellement responsables d'inondations en aval, 2010.

2.7.4 Filtre 3 : la surface des bassins

L'EPTB de la Sèvre-Nantaise a imposé, entre autres, de mener l'étude sur des bassins de surface réduite inférieure à 10km². La surface des bassins doit donc nécessairement être intégrée à l'analyse.

Deux seuils ont été testés, les résultats sont indiqués ci-dessous (cf. tableau 9).

Seuils maximums de la surface	Nombre de bassins restants sur 26
10 km ²	16
12 km ²	22

Tableau 9: Nombre de sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise en fonction du seuil maximum de superficie.

Le seuil à 12km² est retenu de manière à conserver une certaine marge de bassins. Si les bassins tests retenus ont une superficie supérieure à 10km², il sera toujours possible de diminuer leur surface.

2.7.5 Synthèse et corrélation des informations issues de l'analyse

L'outil cartographique facilite ce travail de comparaison et de synthèse. Deux cartes majeures permettent de visualiser les résultats principaux de l'analyse multidimensionnelle et de localiser les zones propices à l'étude sur le ralentissement dynamique.

La carte ci-dessous (cf. figure 18 et atlas en annexe1-carte14) offre une vision spatiale de la corrélation des deux paramètres clés.

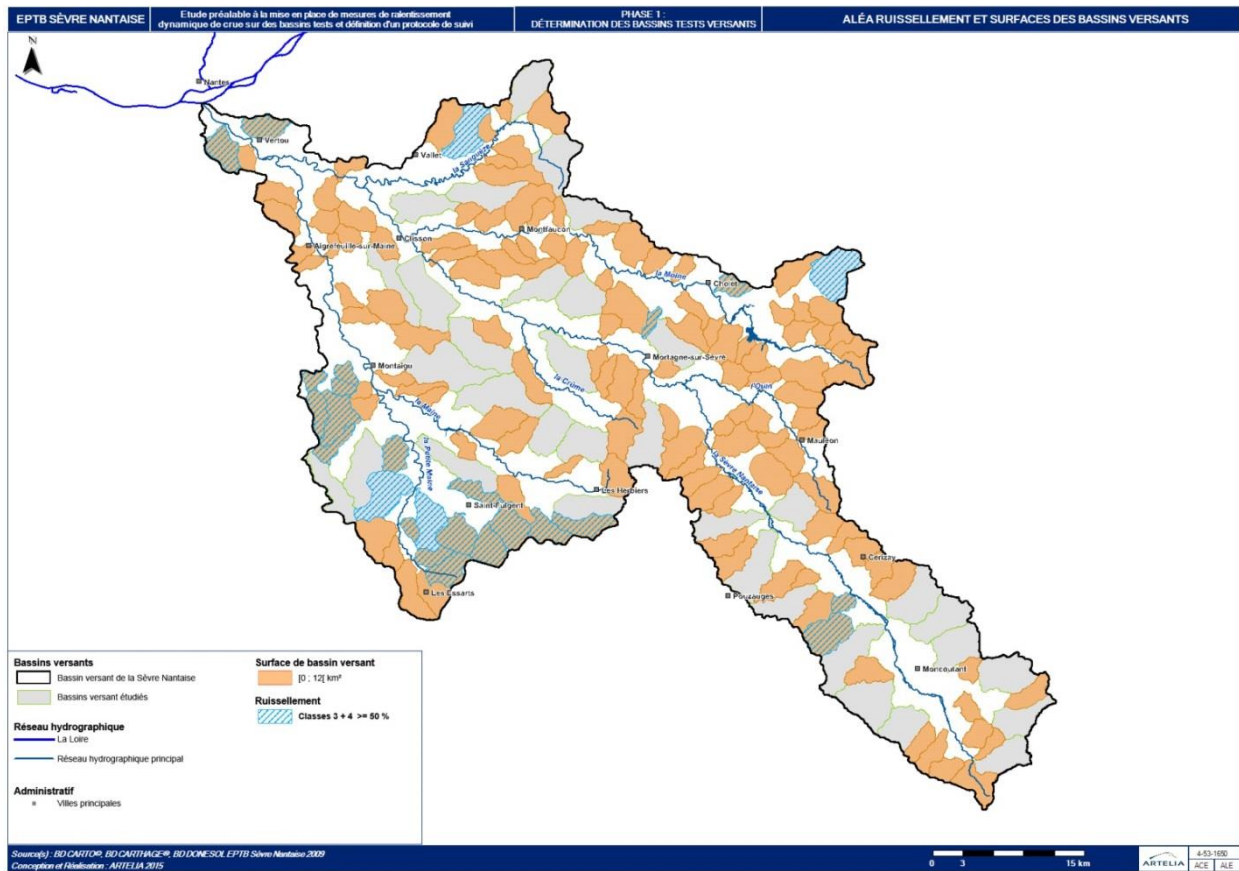


Figure 18: Corrélation entre les bassins de superficie inférieure à 10km² et de sensibilité au ruissellement de classe 3+4 supérieure à 50%.

A l'issue de cette analyse multidimensionnelle, 22 micros bassins-versants ont été retenus parmi 181. La carte ci-dessous les localise (cf. figure 19 et atlas en annexe1-carte15) et correspond à la déduction logique de la carte précédent (cf. figure 18).

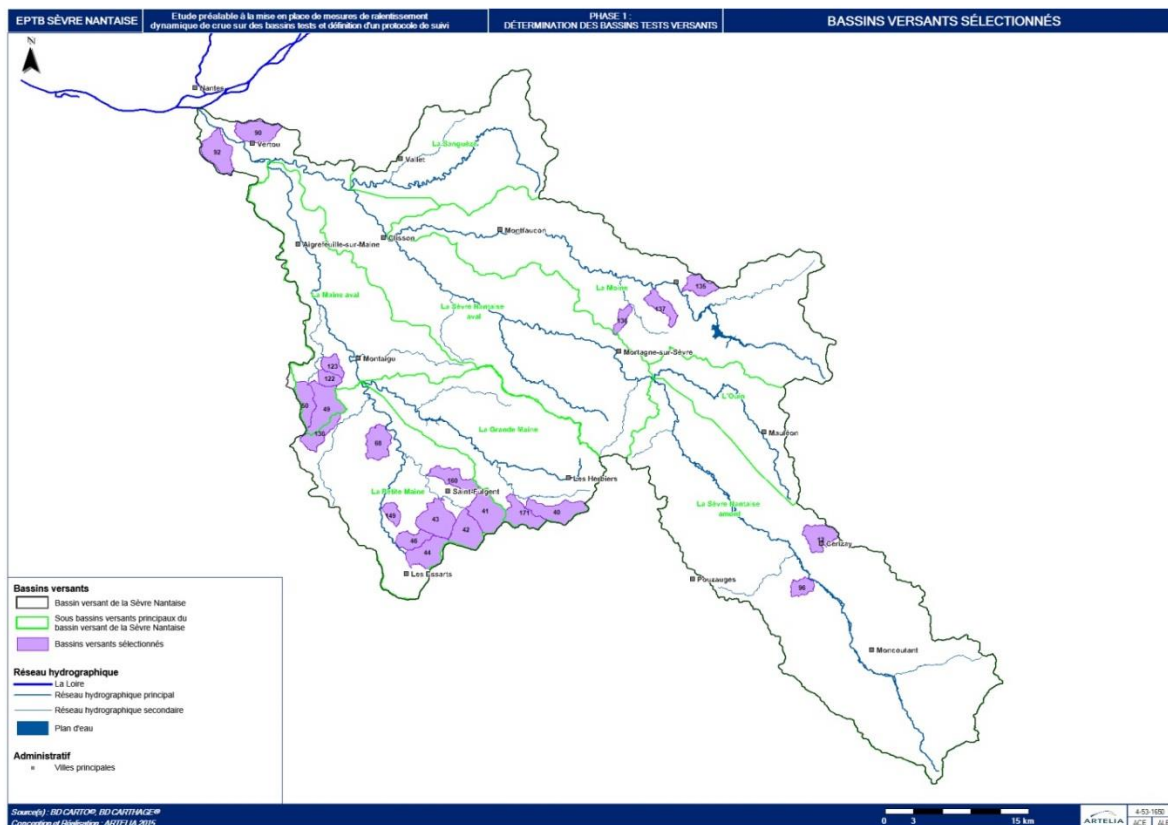


Figure 19: Localisation des 22 sous bassins-versants de la Sèvre-Nantaise sélectionnés à l'issue de l'analyse multidimensionnelle.

Le détail des caractéristiques des 22 bassins-versants est présenté en annexe (cf. annexe 3).

Conclusion de l'analyse multidimensionnelle

Cette analyse a permis de trier les micros bassins-versants selon un ensemble de critères et de seuils « numériques ». La liste finale s'élève à 22 bassins-versants. La précision du choix des deux bassins-versants, l'un de type rural et l'autre de type urbain, sera améliorée dans le chapitre suivant lors de l'étude hydrologique. La localisation des stations pluviométriques et débitmétriques sera le critère premier de manière à disposer de données hydrologiques fiables et suffisantes.

3 PHASE 2 : ETUDE HYDROLOGIQUE DES BASSINS TESTS

La seconde phase du projet débute avec une étude hydrologique des bassins-versants tests.

L'étude se concentre dans un premier temps sur le bassin de type rural, à priori plus facile à traiter que le bassin urbain fortement imperméabilisé, extrêmement sensible au ruissellement et plus difficilement aménageable.

Les objectifs de cette phase sont :

- De réaliser un état initial de la dynamique hydrologique du bassin-versant test en déterminant :
 - le comportement hydrologique des bassins-versants tests lors de différents scénarii hydrologiques déterminés ;
 - les volumes ruisselés mis en jeux lors de ces scénarii hydrologiques ;
- Dans un second temps, de tester les aménagements en les incorporant au modèle. Le comportement hydrologique ainsi que les volumes ruisselés seront de nouveaux déterminés. La comparaison avec la situation initiale rendra compte de l'efficacité des aménagements.

L'étude des bassins tests est réalisée via une modélisation hydrologique sur le logiciel **HEC-HMS**.

Pour obtenir une vision assez large de la réaction du bassin, plusieurs pluies sont envisagées :

- 2 typologies de pluie, l'une de type « hivernale » longue et modérée, la seconde de type « estivale » courte et intense ;
- 3 occurrences ou périodes de retour, semestriel, annuel et biannuel ;
- 2 ou 3 durées de pluie à déterminer ;

Au final, au moins 12 scénarii sont à modéliser pour obtenir une vision globale du comportement hydrologique du bassin selon plusieurs types d'évènements pluvieux de manière à anticiper un maximum les réactions possibles du bassin-versant test.

L'analyse hydrologique est divisée en étapes :

- Choix de la méthodologie employée ;
- Détermination du micro bassin-versant à modéliser ;
- Construction du modèle hydraulique et hydrologique ;
- Calage du modèle ;
- Sélection des évènements et des données pluviométriques à insérer dans le modèle pour les fréquences et la typologie de pluie souhaitées ;
- Lancement des modélisations avec les données pluviométriques et obtention des résultats sous forme d'hydrogramme ;

3.1 Choix des bassins-versants à modéliser

Parmi les 22 micros bassins-versants issus de l'analyse multidimensionnelle, seul un bassin doit être modélisé. Une modélisation hydrologique nécessitant des données de débits et de pluviométrie, le critère principal de sélection du micro bassin est la présence en périphérie d'une ou plusieurs stations hydrométriques. Il est donc nécessaire de choisir un bassin d'étude doté d'une station hydrométrique à son exutoire.

Or, aucun de nos micros bassins-versants n'est équipé de stations. La solution consiste à sélectionner deux bassins, le bassin-versant doté d'une station hydrométrique avec lequel est réalisée la modélisation et le micro bassin-versant véritable cible de l'étude du ralentissement dynamique.

Le bassin-versant à modéliser doit répondre à trois exigences :

- Le bassin doit être équipé d'une station hydrométrique symbolisant son exutoire. La station détermine l'emplacement et la superficie du bassin.
- De manière à ce que les données hydrométriques soient cohérentes avec les débits réels du micro bassin d'étude, celui-ci doit être un sous bassin-versant du bassin équipé de la station.
- Le bassin doit être à dominante rurale puisque nous nous sommes concentrés sur l'étude hydrologique du bassin test de type rural.

13 stations hydrométriques sont repérées sur l'ensemble du territoire du bassin de la Sèvre-Nantaise et leur localisation par rapport aux 22 micros bassins retenus est vérifiée (cf. figure 20 et atlas en annexe-carte16).

L'étude de cette carte permet de tirer plusieurs conclusions. Les 3 stations en amont de la Sèvre-Nantaise, *Absie*, *Breuil-Bernard* et *Saint-Mesmin*, se situent dans une zone peu sensible au ruissellement et donc non prioritaire. Les 5 stations au centre du bassin, *Tillières*, *Saint-Crespin-sur-Moine*, *Clisson*, *Remouillé* et *Tiffauges* sont trop éloignées des micros bassins-versants. Aucun des micros bassins-versants ne se situe en amont des 3 stations sur la Moine, *Mauléon*, *Maulévrier* et *Mazières-en-Mauges* ce qui les rend inutiles pour l'étude.

Seules les stations de Saint-Fulgent et de Cholet répondent aux exigences. Saint-Fulgent et Cholet mesurent le débit provenant de bassins renfermant respectivement 2 et 3 de nos micros bassins-versants (cf. figure 20 et atlas en annexe-carte16). Il s'avère que le bassin-versant de Cholet est caractérisé par un fort pourcentage de zone urbaine (dû notamment à la commune de Cholet). C'est donc le bassin de Saint-Fulgent qui est sélectionné du fait de son caractère rural. Les deux sous bassins-versants sont le 171 et le 40.

Les caractéristiques globales du bassin mis à l'étude sont explicitées ci-dessous (cf. tableau 10). La localisation des bassins-versants sélectionnés est indiquée sur la carte ci-dessous (cf. figure 20 et atlas en annexe-carte16).

Cours d'eau principal	La Grande Maine
Positionnement par rapport au cours d'eau	En amont, au niveau des sources
Longueur du talweg	22 km
Superficie	130 km²
Station hydrométrique correspondante	M7413010 basée à Saint-Fulgent
Micro bassins-versants disponibles	N°171 et N°40

Tableau 10: Caractéristiques globales de bassin-versant de Saint-Fulgent, bassin de la Sèvre-Nantaise, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France.

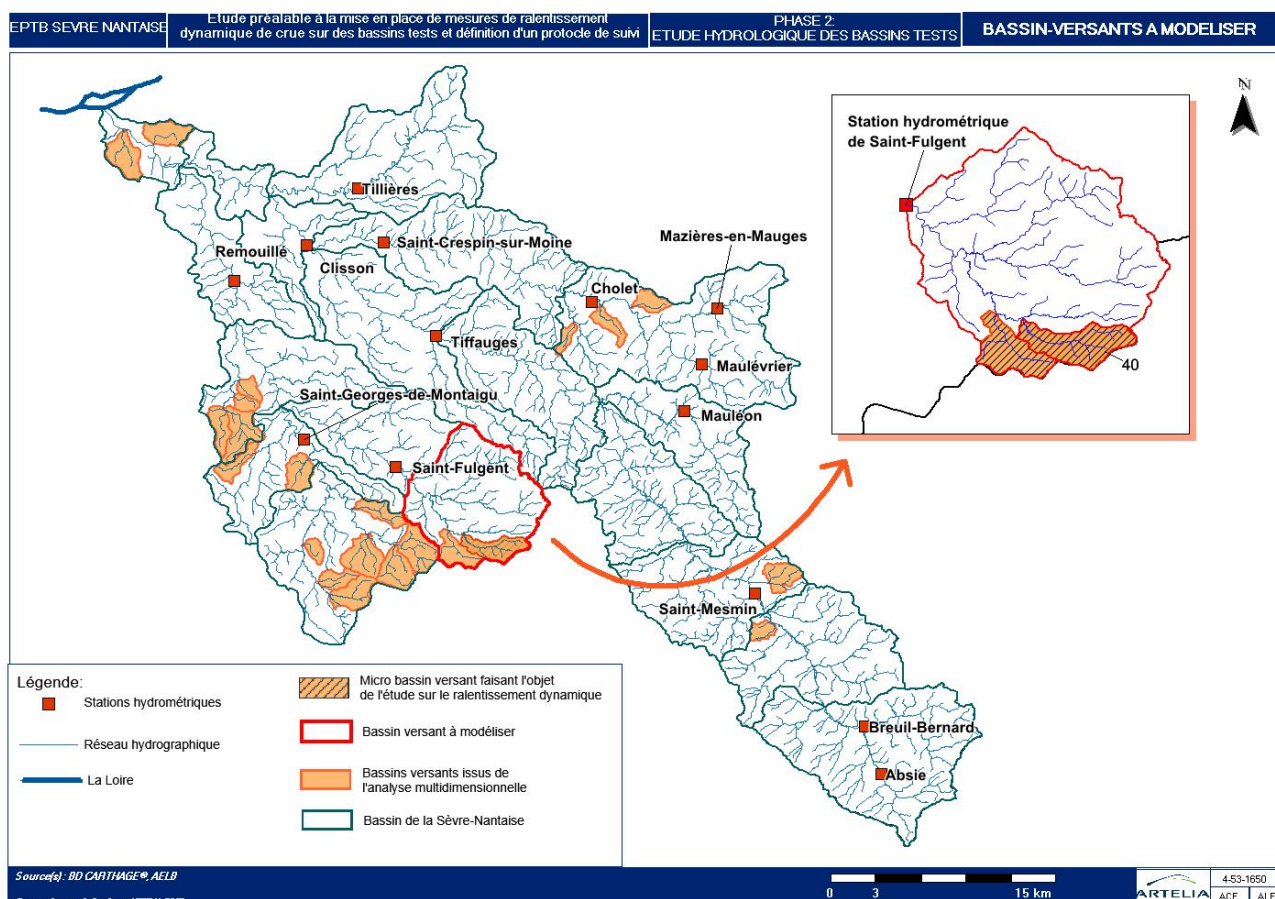


Figure 20: Localisation du bassin-versant de Saint-Fulgent et du sous bassin-versant test, Pays de la Loire, France.

3.2 Construction du modèle hydraulique

La modélisation est réalisée sur le logiciel HEC-HMS. Ce logiciel permet de simuler de manière complète la transformation de pluies en débits sur l'ensemble d'un réseau hydrographique. Ce logiciel fournit entre autre comme résultat les débits à l'exutoire et sur l'ensemble du réseau sous forme d'hydrogrammes et de tableaux. C'est précisément cette capacité qui est exploitée.

Les étapes de traitement sont les suivantes :

- Construction du modèle sur HEC-HMS, représentation du réseau hydrographique, des bassins-versants et de l'exutoire ;
- Paramétrage du modèle ;

- Construction du modèle météorologique ;
- Calage des pluies par comparaison avec les débits mesurés réels ;

3.2.1 Représentation des composants hydrauliques

Le réseau hydrographique du bassin versant de Saint-Fulgent (cf. zoom de la figure 20) doit être divisé en sous bassins-versants. Pour obtenir une précision correcte, il est nécessaire de découper le bassin en un nombre suffisant de sous unités correspondant chacune à un bras du réseau hydrographique.

Au final, le bassin de Saint Fulgent est découpé en 53 sous bassins comme l'illustre la carte ci-dessous (cf. figure 21 et atlas en annexe1-carte17) dont :

- 28 bassins modélisant des têtes de bassins ;
- 25 bassins modélisant les tronçons de cours d'eau ;

Les bras les plus petits et en tête extrême de bassin sont parfois regroupés en un seul sous bassin pour limiter la création de bassins trop petits en trop grand nombre.

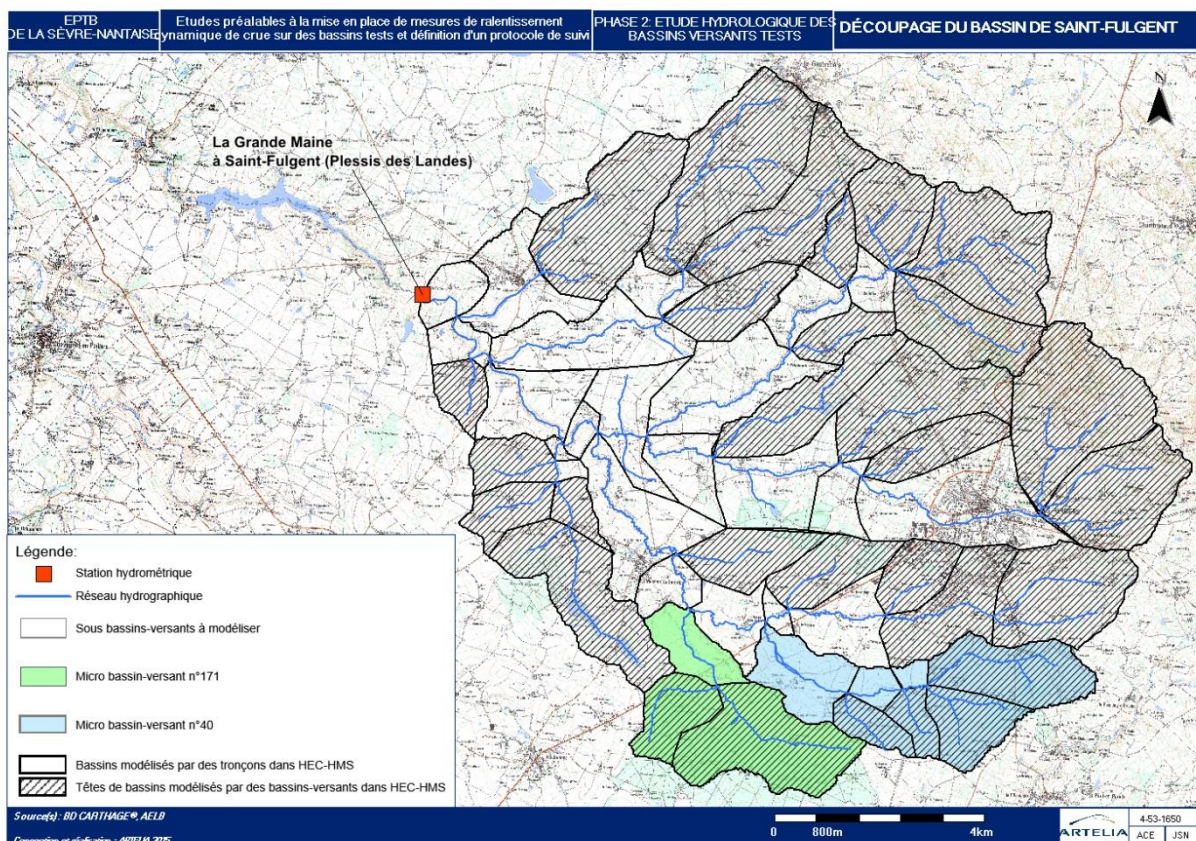


Figure 21: Découpage du bassin-versant de Saint-Fulgent en 28 têtes de bassins et 25 bassins intermédiaires pour la modélisation sur HEC-HMS.

Le réseau hydrographique est relativement simple à construire puisqu'il n'y a pas d'ouvrages tels que des réservoirs ou des barrages. Les composants du modèle utilisés se résument à :

- 28 sous bassins-versants où les pluies en entrée seront injectées ;

- 53 tronçons de cours d'eau ;
- 25 confluences ou jonctions reliant les différents bras hydrographiques ;
- 1 exutoire situé à la station hydrométrique à Saint-Fulgent ;

La figure ci-dessous représente le modèle sur HEC-HMS (cf. figure 22).

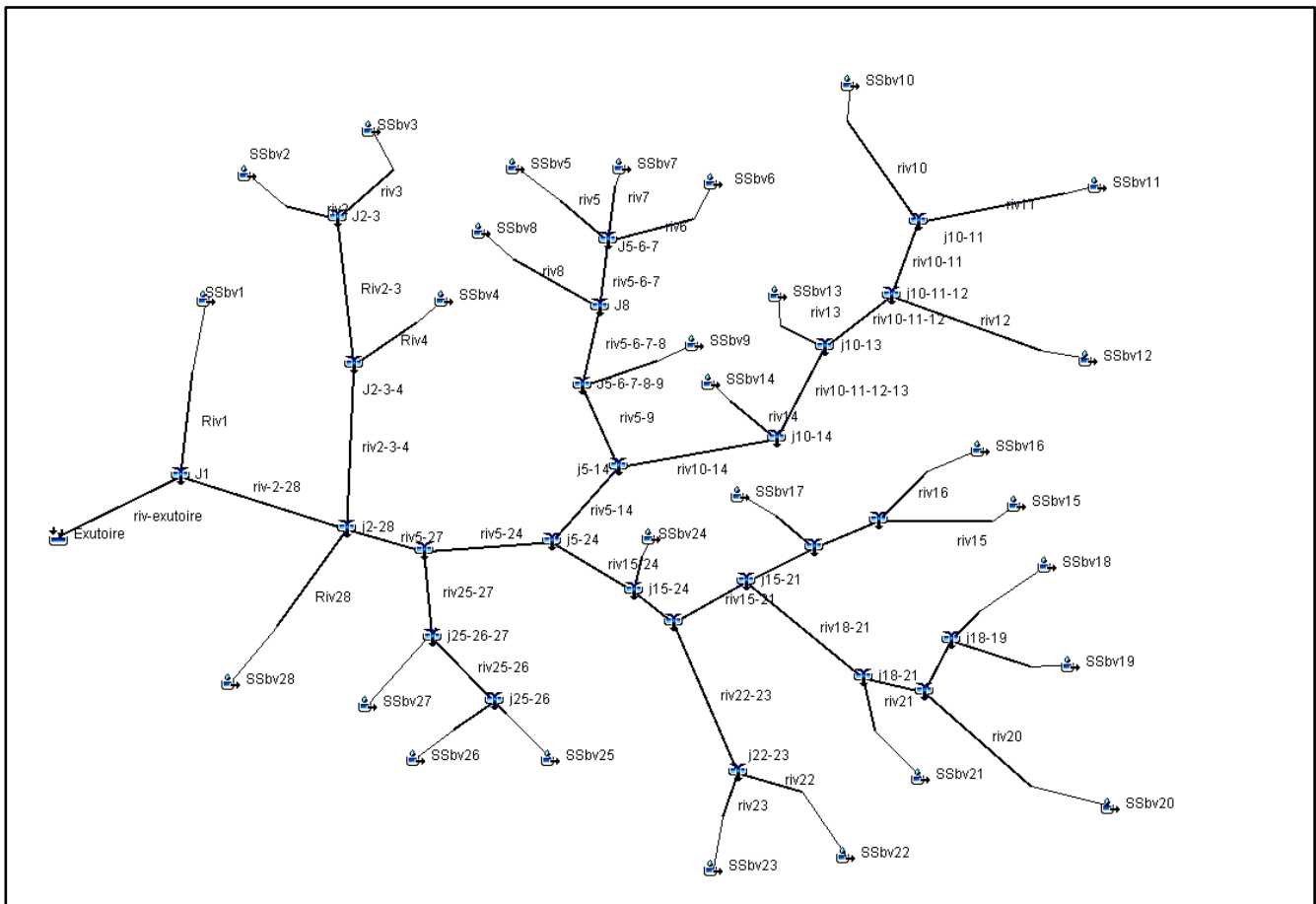


Figure 22: Bassin-versant de Saint-Fulgent modélisé sur HEC-HMS.

3.2.2 Choix des paramétrages des composants hydrauliques du modèle

La construction du modèle inclut plusieurs paramètres définissant la nature des bassins, du réseau et des écoulements. Chaque paramètre est calé grâce à une méthode de calcul, plusieurs méthodes plus ou moins élaborées selon le niveau de précision souhaité du modèle sont proposées. La méthode sélectionnée détermine les caractéristiques hydrauliques des bassins à fournir pour modéliser les différents paramètres qui sont (Sharffenberg, 2013):

- La couverture végétale ;
- La surface potentielle de stockage ;

- La conservation d'un débit de base (« baseflow ») minimum quel que soit les pluies en entrée. Ce paramètre est en lien direct avec la prise en compte des écoulements souterrains ;
- La percolation et le drainage ;
- La fonction de production qui assure la transformation de la pluie brute en entrée en pluie nette en soustrayant les écoulements stoppés par des obstacles (végétaux, rugosités du sol...), l'infiltration et l'évapotranspiration (Elmehdi et al., 2013) ;
- La fonction de transfert qui permet de construire l'hydrogramme à partir des pluies nettes (Elmehdi et al., 2013) ;
- La fonction de routage qui caractérise uniquement les tronçons et permet de calculer les hydrogrammes avals d'après les hydrogrammes amonts (Elmehdi et al., 2013). Cette fonction permet de modéliser l'écoulement proprement dit ;

Cette première modélisation n'a pour but que le calage du modèle et la détermination d'événements pluviométriques cohérents avec des épisodes réels. Il n'est donc pas nécessaire de travailler à un taux de précision élevé et certains paramètres ne seront pas pris en compte. De plus, l'intégration de certains paramètres nécessite des données précises dont nous ne disposons pas. Ainsi, la couverture végétale, la surface potentielle de stockage, les phénomènes de percolation/drainage et l'injection d'un débit de base sont mis de côté. L'analyse des autres paramètres et la justification des choix émis sont explicitées dans les paragraphes suivants.

3.2.2.1 La fonction de production

La méthode sélectionnée est celle du SCS, le « Soil Conservation Service ». En effet, elle nécessite uniquement le calcul du Curve Number, du pourcentage de surface imperméabilisée et de l'infiltration initiale. Ces informations sont disponibles grâce à la table d'occupation du sol Corinne Land Cover et des tables pédologiques fournies par l'EPTB de la Sèvre-Nantaise.

3.2.2.2 La fonction de transfert

Deux méthodes sont susceptibles de convenir à notre modèle, l'hydrogramme unitaire de Clark et la méthode du SCS. Néanmoins, la méthode de Clark est fréquemment utilisée pour des modélisations événementielles et est efficace pour des bassins caractérisés par une topographie et une occupation du sol variées (Sabot, 1988; Trambly, 2012; Elmehdi et al., 2013.). De plus, les phénomènes de stockage et la répartition de la pluie nette sur l'ensemble du territoire est pris en compte.

3.2.2.3 La fonction de routage

La méthode sélectionnée est celle de Muskingum. Elle est relativement simple à appliquer et ne demande pas de données trop précises et spécifiques. Deux coefficients sont à déterminer.

Le paramétrage du modèle, les méthodes de calculs et les caractéristiques des bassins à fournir au modèle sont répertoriés dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 11):

Paramètres	Méthodes retenues	Caractéristiques hydrauliques à renseigner
Fonction de production	SCS Curve Number	Le CN, le pourcentage de surface imperméabilisée et l'infiltration initiale
Fonction de transfert	Hydrogamme Unitaire de Clark	Temps de concentration et coefficient de stockage
Fonction de routage	Muskingum	Durée de propagation du pic de crue dans le chenal (K) et coefficient de pondération du stockage (X)

Tableau 11: Récapitulatif des méthodes de calculs retenues pour la modélisation sur HEC-HMS et des paramètres à renseigner.

La prochaine étape correspond à la détermination des caractéristiques de chaque sous bassin à modéliser, la caractérisation ne se limite pas au bassin-versant de Saint-Fulgent mais est réalisée à une échelle plus locale.

3.2.3 Détermination des caractéristiques hydrauliques des bassins nécessaires à la modélisation

3.2.3.1 Calcul des paramètres de la fonction de production

- Le Curve Number est déduit de la méthode du SCS à partir du croisement entre la pédologie et l'occupation du sol.

L'analyse pédologique a été réalisée grâce aux couches SIG fournies par l'EPTB. L'ensemble des bassins sont caractérisés par le même type de sol limoneux-sableux-argileux et oscillent donc entre les classes de types de sol B et C définies par le SCS (cf. annexe pour le tableau détaillé).

L'analyse de l'occupation du sol suit la même méthode que lors de notre phase 1 (cf. chapitre 2.4.1), la surface de zones urbaines, agricoles, forestières, de prairies et de plans d'eau ont été calculées pour les 28 bassins à modéliser via le logiciel MapInfo. Toutes les classes d'occupation sont prises en compte dans le calcul du Curve Number et non pas uniquement la classe la plus représentée (cf. annexe 4 pour les détails de calcul). Le CN va évoluer au cours du calage du modèle, aucune valeur définitive n'est donc présentée pour le moment.

- L'infiltration initiale est calculée à partir du Curve Number grâce à deux équations empiriques simples (cf. annexe 4). L'infiltration initiale, comme les CN, va évoluer au cours du calage du modèle, aucune valeur définitive n'est présentée pour le moment.
- Le calcul du pourcentage de surface imperméabilisée est déduit directement de la surface de zone urbaine déterminée précédemment grâce à la formule proportionnelle suivante :

$$\text{Pourcentage d'imperméabilisation} = \frac{\text{Surface urbaine} * 100}{\text{Surface totale du bassin}}$$

Cette caractéristique est invariante et ne sera pas modifiée durant le calage du modèle.

Le résultat des calculs est présenté dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 12).

N° de bassin-versant	Surface imperméable en %	N° de bassin-versant	Surface imperméable en %
1	0,0	15	30,7
2	11,0	16	82,4
3	7,0	17	0,0
4	4,7	18	3,2
5	0,0	19	0,0
6	0,0	20	0,0
7	0,0	21	0,0
8	0,0	22	0,0
9	0,0	23	0,0
10	0,0	24	0,0
11	34,6	25	0,0
12	15,7	26	0,0
13	7,1	27	0,0
14	9,7	28	0,0

Tableau 12: Pourcentage de surface imperméabilisée pour chaque sous bassins-versants de Saint-Fulgent, Pays de la Loire et Poitou-Charentes, France, 2006.

3.2.3.2 Calcul des paramètres de la fonction de transfert

Les temps de concentration ont été calculés grâce à la formule de Sogreah et de Giandotti. Le coefficient de stockage est calculé directement à partir du temps de concentration (cf. annexe 5 pour le détail des calculs). Le choix entre les deux formules est effectué durant le calage du modèle.

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau (cf. tableau 13) ci-dessous.

N° de bassin versant	Tc Sogreah En h	Coefficient de stockage de Sogreah En h	Tc Giandotti En h	Coefficient de stockage de Giandotti En h
1	2,3	3,8	4,0	6,5
2	2,0	3,3	3,1	5,1
3	1,5	2,5	1,9	3,1
4	1,5	2,5	2,6	4,3
5	1,0	1,7	1,7	2,7
6	1,2	2,0	1,6	2,6
7	1,4	2,3	1,9	3,2
8	0,9	1,4	1,3	2,2
9	1,1	1,7	1,7	2,8

10	1,5	2,4	1,6	2,6
11	1,3	2,0	1,7	2,8
12	1,1	1,8	1,9	3,1
13	1,3	2,1	2,1	3,5
14	1,8	2,9	3,2	5,2
15	1,8	3,0	3,3	5,3
16	1,5	2,4	2,4	3,9
17	1,6	2,7	2,6	4,2
18	2,2	3,6	4,0	6,5
19	1,4	2,3	2,2	3,6
20	1,1	1,8	2,0	3,3
21	1,3	2,1	2,1	3,4
22	2,7	4,4	4,8	7,9
23	1,6	2,7	2,9	4,8
24	1,8	2,9	2,6	4,3
25	2,3	3,7	5,0	8,2
26	1,4	2,2	2,0	3,2
27	1,2	1,9	1,7	2,8
28	0,9	1,4	1,5	2,4

Tableau 13: Temps de concentration de Giandotti et de Sogreah et coefficients de stockage respectifs pour chaque sous bassins-versants.

3.2.3.3 Calcul des paramètres de la fonction de routage

La fonction de routage ne concerne que les tronçons de cours d'eau. La méthode de Muskingum, très populaire, est basée sur le calcul du débit stocké au sein des tronçons dans le cas où le débit entrant est supérieur au débit sortant (Elbashir, 2011) (cf. annexe 6 pour le détail des calculs) .

Le coefficient X pondère le phénomène de stockage d'eau au sein du tronçon, c'est-à-dire le volume en surplus venant de l'amont et qui sera stocké au sein du chenal. Ce coefficient est compris entre 0 et 0,5. Ainsi, si $X=0$, cela signifie que les débits entrants non pas d'effet sur le stockage. Dans les chenaux naturels, X évolue généralement sur une échelle de 0 à 0,3 et est souvent estimé à 0,2 (Elbashir, 2011).

Nous prenons $X=0,2$ pour l'ensemble des tronçons modélisés.

Le coefficient de Muskingum K correspond au temps mis par le pic de crue pour se propager de l'amont à l'aval du tronçon (Boubakeur, 2011; Elbashir, 2011). Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (cf. tableau 14).

Talwegs au sein des bassins versants	K En min	Tronçons de jonctions entre bassins versants	K En min
riv1	9	riv5-8	7
riv2	8	riv10-11	17
riv3	6	riv10-11-12	10
riv4	6	riv10-13	25
riv5	3	riv10-14	10
riv6	5	riv15-16	10
riv7	5	riv15-16-17	6
riv8	2	riv22-23	10
riv9	5	riv18-19	4
riv10	5	riv18-19-20	7
riv11	5	riv18-21	11
riv12	5	riv25-26	3
riv13	5	riv25-26-27	5
riv14	7	riv5-9	15
riv15	7	riv2-3-4	14
riv16	6	riv15-23	10
riv17	7	riv15-21	27
riv18	10	riv15-24	25
riv19	5	riv2-3	9
riv20	5	riv5-27	12
riv21	5	riv5-24	13
riv22	12	riv5-14	40
riv23	6	riv2-28	4
riv24	7	riv5-6-7	5
riv25	10	exutoire	16
riv26	5		
riv27	5		
riv28	2		

Tableau 14: Coefficient K de Mukingum pour chaque tronçons du modèle HEC-HMS.

L'ensemble du modèle étant à présent paramétré, la prochaine étape consiste à créer le modèle météorologique.

3.3 Construction du modèle météorologique

La deuxième composante principale d'une modélisation hydrologique correspond à l'injection de données météorologiques en entrée des bassins-versants via la création d'un modèle météorologique. Ce modèle est injecté uniquement dans les unités des bassins-versants. Les tronçons de rivière et l'exutoire ne sont pas caractérisés par le modèle météorologique.

Comme pour la construction du réseau hydrographique, plusieurs paramètres caractérisant la météorologie du site peuvent être pris en compte :

- Les radiations solaires qui influencent l'évaporation ;
- L'évapotranspiration en lien avec le couvert végétal ;

- Les précipitations ;
- La fonte des neiges ;

Seules les précipitations sont renseignées dans notre modèle.

La méthode sélectionnée est celle du hyétogramme spécifique. En effet, nous souhaitons dans un premier temps caler le modèle à partir d'évènements pluvieux connus (cf. méthode chapitre 3.4.1). Les paramètres à fournir pour ce modèle sont les dates de l'évènement, le pas de temps et le hyétogramme. Tous les sous bassins-versants sont dotés du même hyétogramme.

3.4 Calage du modèle

3.4.1 Présentation de la méthodologie

Le calage du modèle est basé sur la comparaison de données réelles mesurées et des résultats modélisés. L'injection dans le modèle de pluies réelles mesurées pour des évènements précis devrait fournir en résultat un hydrogramme calculé correspondant à l'hydrogramme réel mesuré pour le même évènement. L'ajustement de l'hydrogramme calculé sur l'hydrogramme mesuré est réalisé grâce à la modification des paramètres du modèle ce qui correspond au calage. Pour un minimum de précision, la modélisation est réalisée à un pas de temps horaire.

Le schéma (cf. figure 23) ci-dessous illustre la démarche envisagée.

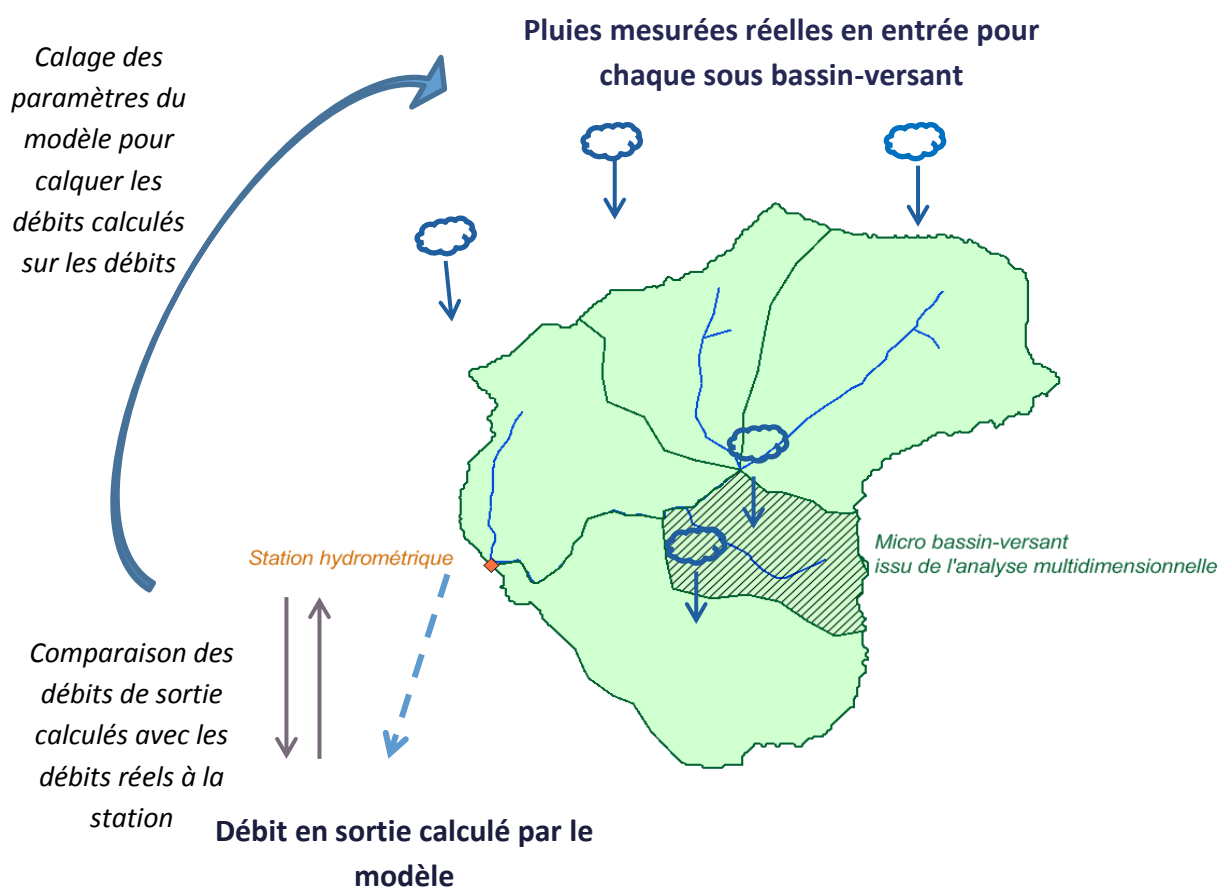


Figure 23: Illustration de la méthode de calage envisagée.

Les données mesurées utilisées sont issues des stations hydrométriques et pluviométriques proches de la zone d'étude.

- Le bassin de Saint-Fulgent a été choisi en raison de la station hydrométrique de Saint-Fulgent à son exutoire. Cette station fournit, via la Banque Hydro de MétéoFrance, des hydrogrammes de 1999 à 2015. Ces hydrogrammes réels mesurés serviront de référence pour le calage du modèle. Le tableau ci-dessous (cf. tableau 15) fournit les caractéristiques de la station.

N° de station	M7413010
Cours d'eau surveillé	La Grande Maine
Commune	Saint-Fulgent
Département	Vendée (85)
Période de mesure	1990-2015
Superficie du bassin surveillé	131 km ²

Tableau 15: Caractéristiques de la station hydrométrique de Saint-Fulgent et utilisée lors du calage du modèle HEC-HMS.

- Les stations pluviométriques du Pallet et de Landes-Guenusson ont mesuré des hauteurs de pluie à des pas de temps horaires. Le tableau ci-dessous (cf. tableau 16) fournit les caractéristiques de la station.

N° de station	44117002	85119001
Commune	Le Pallet	Landes-Guenusson
Département	Loire-Atlantique (44)	Vendée (85)
Période de mesure	1995 - 2015	1992 - 2015

Tableau 16: Caractéristiques des deux stations pluviométriques utilisées pour le calage du modèle HEC-HMS

Deux évènements pluvieux sont choisis pour caler le modèle. Les évènements sont sélectionnés selon les données disponibles. Les caractéristiques des évènements sont résumées dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 17).

	Evènement 1	Evènement 2
Saison	Eté	Hiver
Date	Du 10/06/2005 au 12/06/2005	Du 02/01/2003 au 03/01/2003
Station pluviométrique source	Le Pallet, n°44117002	Landes-Guenusson, n°85119001
Fréquence	Semestrielle sur 3h	Annuelle sur 24h et 6h

Tableau 17: Description des deux évènements pluvieux utilisés pour le calage du modèle HEC-HMS (fréquences issues de MétéoFrance à la station de Nantes-Bouguenais pour la période 1982-2008).

Les hyétogrammes des évènements sont présentés sur les graphes (cf. figures 24 et 25) ci-dessous.

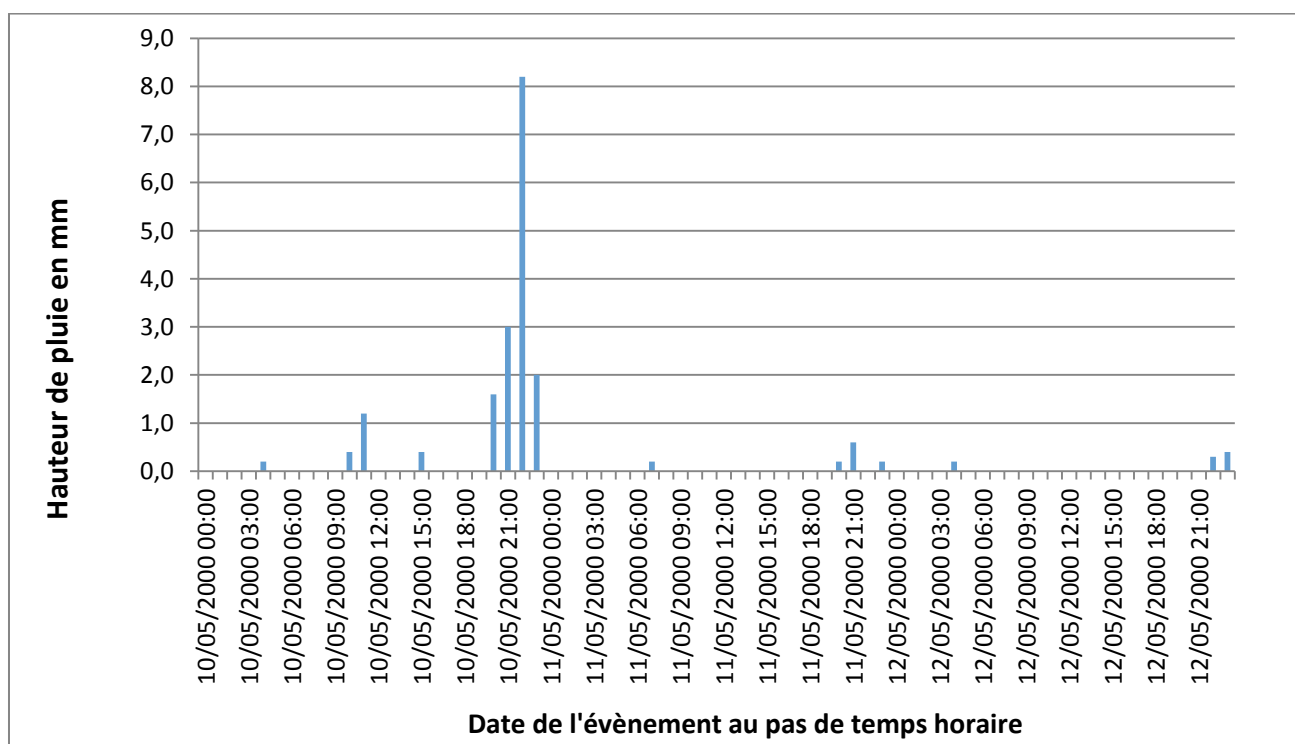


Figure 24: Hyétogramme de l'évènement pluvieux du 10/05/2005 au 12/05/2005 mesuré à la station du Pallet.

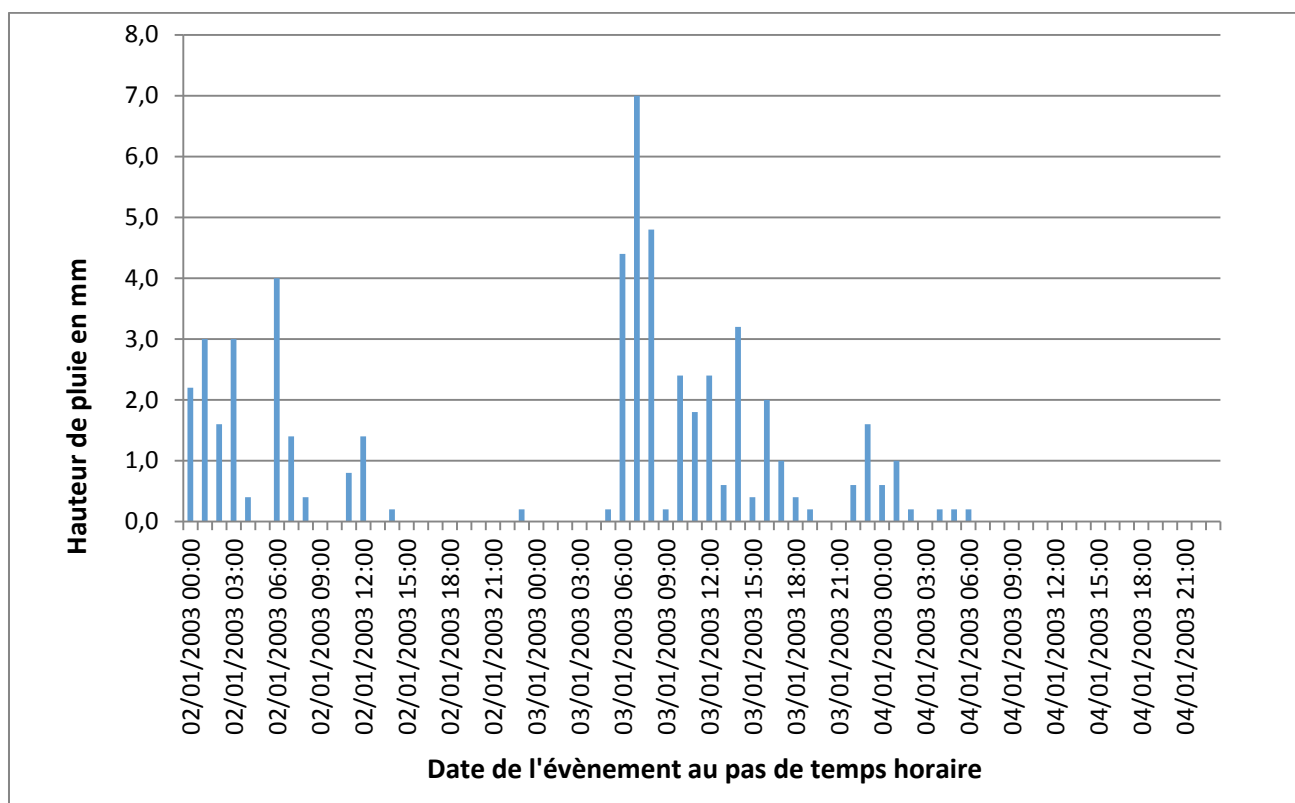


Figure 25: HyétoGramme de l'évènement pluvieux du 02/01/2003 au 04/01/2003 mesuré à la station de Landes-Guenusson.

Le tableau ci-dessous fait l'inventaire des paramètres du modèle pouvant être modifiés lors du calage (cf. tableau 18). L'intervalle de valeur sur lequel ils peuvent évoluer est indiqué.

Paramètres	Elément de calage	Variabilité
Tc et coefficient de stockage	oui	Tc de Giandotti ou Tc de Sogreah
Curve Number et l'infiltration initiale	oui	81 < CN agricole < 88 85 < CN urbain < 90 55 < CN forestier < 70
Pourcentage de surface imperméable	non	aucune
Coefficient de Muskingum K	non	aucune
Coefficient de Muskingum X	non	aucune
Autres paramètres	baseflow	Plusieurs m ³ /s

Tableau 18: Inventaire des paramètres de calage et de leur potentielle variabilité.

3.4.2 Premier calage avec l'évènement pluvieux d'été

Le calage a été réalisé en 4 grandes étapes correspondant au calage d'un paramètre. Plusieurs essais non présentés ont été néanmoins nécessaires. Le graphe ci-dessous illustre les résultats intermédiaires obtenus lors du calage de chaque paramètre (cf. figure 26).

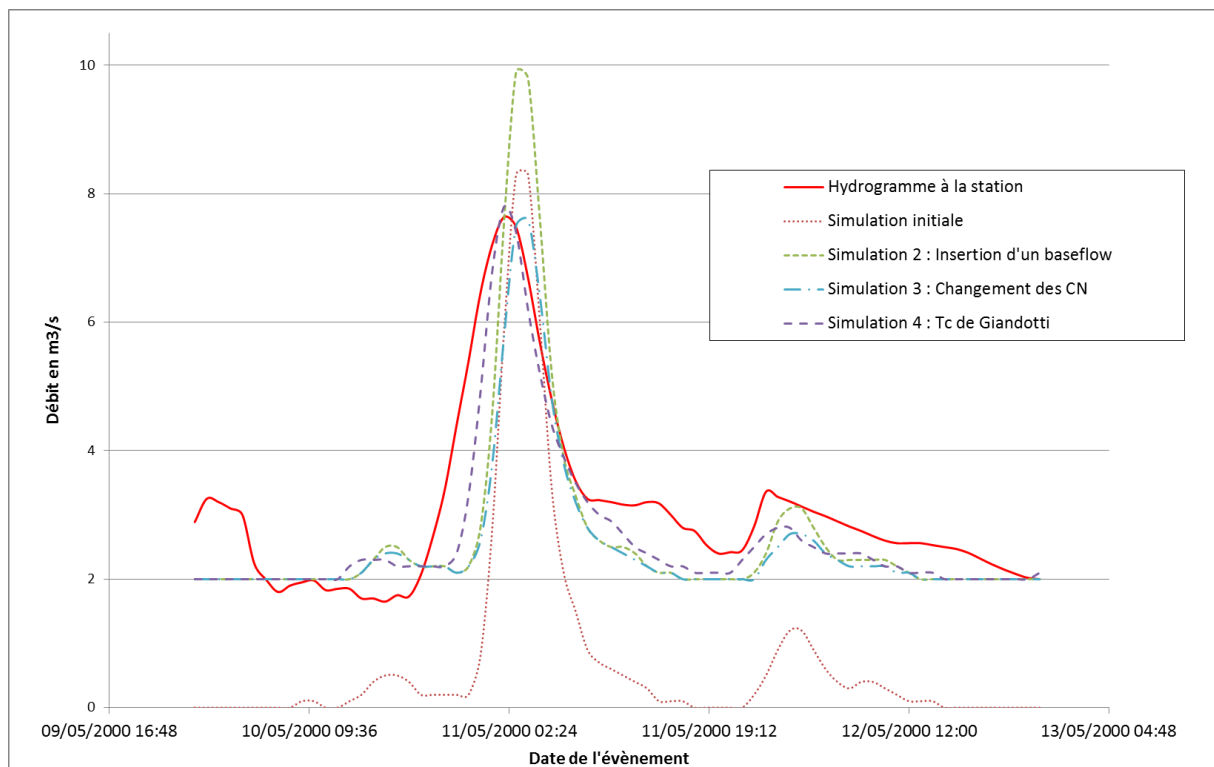


Figure 26: Evolution de l'hydrogramme calculé par HEC-HMS au cours du calage du modèle estival.

Les étapes successives sont les suivantes :

- Simulation initiale :

La première simulation est lancée avec comme paramètres de départ :

- Aucun baseflow
- Des valeurs de Tc issues de la formule de Sogreah (cf. tableau 14)
- Des CN globaux issus de CN maximum soit :
 - CN agricole= 88
 - CN urbain= 90
 - CN forestier = 70

- Simulation 2 : Insertion d'un débit de base

L'hydrogramme modélisé est caractérisé par un manque de débit d'environ $2\text{m}^3/\text{s}$ sur l'ensemble de l'événement. Il est nécessaire de rajouter un débit de base. En raison du manque de données mesurées, la méthode de calcul choisie est la plus simple. Le baseflow est considéré comme variant d'un mois à l'autre mais constant sur ce mois.

Ce rajout de débit est réparti équitablement entre les 28 sous bassins-versants ce qui revient à introduire un débit de base de **$0,07\text{m}^3/\text{s}/\text{bassins}$** .

En absence de données précises sur l'ensemble de l'année, cette valeur est imposée pour tous les mois.

- Simulation 3 : Modification des CN

Du fait de l'introduction d'un débit de base, nous constatons que le pic de crue est surestimé d'environ 2,5m³/s. Il est nécessaire de diminuer les CN pour diminuer le ruissellement et favoriser l'infiltration. Les CN sont fixés à :

- **CN agricole = 86**
- **CN forestier = 62**
- **CN urbain = 87**

Les CN et l'infiltration initiale des bassins sont présentés ci-dessous (cf. tableau 19).

N° de bassins-versants	CN global	l'infiltration initiale	N° de bassins-versants	CN global	l'infiltration initiale
1	86	8	15	86	8
2	86	8	16	87	8
3	86	8	17	80	13
4	86	8	18	84	10
5	86	8	19	81	12
6	78	14	20	86	8
7	86	8	21	86	8
8	86	8	22	72	20
9	86	8	23	72	19
10	86	8	24	84	10
11	86	8	25	81	12
12	86	8	26	86	8
13	85	9	27	86	8
14	86	8	28	86	8

Tableau 19: Valeurs des CN et de l'infiltration initiale de chaque sous bassins-versants pour le calage du modèle estival.

- Simulation 4 finale : Utilisation du Tc de Giandotti

Le pic de crue est correctement proportionné mais est en retard d'environ 2h par rapport à l'hydrogramme mesuré à la station et est moins étalé dans le temps. La formule de Giandotti fournit des Tc environ 2 fois plus grands que ceux de Sogreah (cf.tableau14) ce qui augmente la durée d'écoulement des débits de l'amont à l'exutoire. Le pic de crue est ainsi plus étalé dans le temps.

Le pic de crue reste moins étalé que l'hydrogramme mesuré néanmoins la précision du résultat est suffisante pour notre étude. Le modèle est globalement correctement calé.

3.4.3 Second calage avec l'évènement pluvieux d'hiver

Un des objectifs de ce second calage est de vérifier que le premier calage est satisfaisant pour d'autres évènements que celui du 10 juin 2005.

Le calage a été réalisé en deux grandes étapes. Plusieurs essais non présentés ont été néanmoins nécessaires. Le graphe ci-dessous illustre les résultats intermédiaires obtenus lors du calage de chaque paramètre (cf. figure 27).

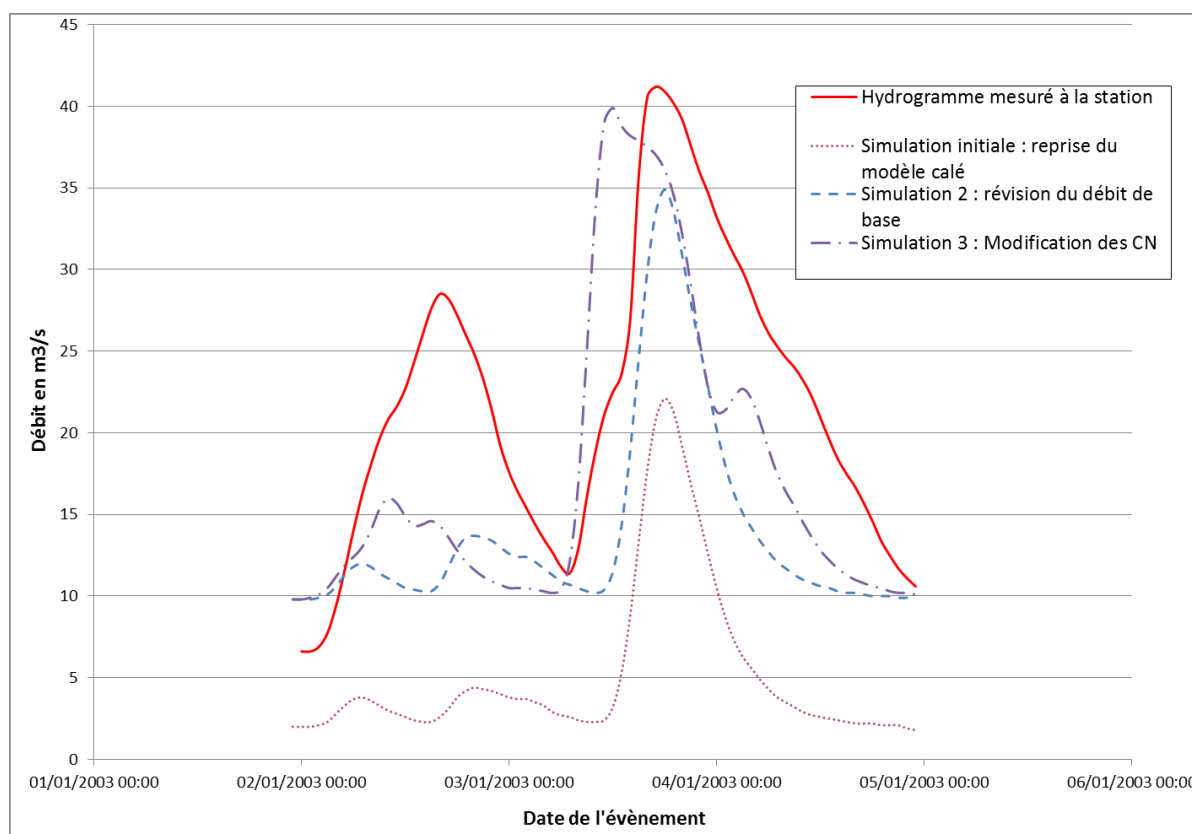


Figure 27: Evolution de l'hydrogramme calculé par HEC-HMS au cours du calage du modèle hivernal.

Les étapes successives sont les suivantes :

- Simulation initiale :

La première simulation est lancée avec le modèle calé sur l'évènement de juin 2005.

- Simulation 2 : Insertion d'un débit de base

L'hydrogramme modélisé est caractérisé par un manque de débit d'environ $10\text{m}^3/\text{s}$ sur l'ensemble l'évènement. Le débit de base déterminé précédemment n'est valable que pour la saison estivale du moins le mois de juin. Un baseflow de janvier, généralisé à la saison hivernale, est recalculé de la même manière que pour le débit estival.

Le baseflow hivernal est estimé à **$0,35\text{ m}^3/\text{s}/\text{bassins}$** .

- Simulation 3 : Adaptation des CN à l'hiver

Le débit de crue est trop faible par rapport à l'hydrogramme mesuré à la station, la différence est d'environ 5m³/s. Il est nécessaire d'augmenter les CN de manière à augmenter le ruissellement. Cette démarche est cohérente avec le changement de saison, en effet, les sols sont plus gorgés d'eau en hiver ce qui induit un ruissellement supplémentaire. Nous prenons :

- **CN agricole = 88**
- **CN forestier = 70**
- **CN urbain = 90**

Les CN et l'infiltration initiale des bassins sont présentés ci-dessous (cf. tableau 20).

N° de bassins-versants	CN global	l'infiltration initiale	N° de bassins-versants	CN global	l'infiltration initiale
1	88	35	15	89	33
2	88	34	16	90	29
3	88	34	17	84	50
4	88	34	18	86	40
5	88	35	19	84	47
6	82	55	20	88	35
7	88	35	21	88	35
8	88	35	22	77	75
9	88	35	23	78	73
10	88	35	24	86	40
11	89	32	25	85	46
12	88	34	26	88	35
13	87	37	27	88	35
14	88	34	28	88	35

Tableau 20: Valeurs des CN et de l'infiltration initiale de chaque sous bassins-versants pour le calage du modèle hivernal.

Le second calage s'arrête à cet hydrogramme final.

Le calage est moins précis que pour la saison estivale mais toute tentative d'amélioration est restée sans résultat. Il est ici nécessaire de préciser que le premier pic mesuré au cours de la journée du 02 janvier 2003 provient d'un évènement pluvieux survenu le 1^{er} janvier 2003. En l'absence des données pluviométriques au pas de temps horaire, quelques tentatives ont été réalisées pour compléter arbitrairement le hétérogramme. Les résultats n'étant pas particulièrement meilleurs il a été décidé de retenir cet hydrogramme comme résultat final et d'éviter toute modification arbitraire des données pluviométriques.

3.4.4 Résultats finaux du calage du modèle HEC-HMS

Le modèle calé présente des spécificités saisonnières hivernales et estivales. A noter que la saison hivernale correspond aux mois d'octobre à mars et la saison estivale des mois d'avril à septembre. Pour améliorer la précision du modèle, il serait intéressant de réaliser un calage par mois de manière à obtenir des paramètres non plus semestriels (ou saisonniers) mais mensuels.

Les paramètres du modèle calé sont caractérisés par les valeurs suivantes présentées dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 21).

Fonction	Paramètres	En saison hivernale	En saison estivale
-	Débit de base	0,35 m ³ /s par bassin	0,07 m ³ /s par bassin
Fonction de production	Curve Number	CN agricole = 88 CN urbain = 90 CN forestier = 70 Cf. tableau 21	CN agricole = 86 CN urbain = 87 CN forestier = 62 Cf. tableau 20
	Infiltration initiale	hivernale Cf. tableau 21	estivale Cf. tableau 20
	Surface imperméabilisé	Surface imperméabilisée initiale Cf. tableau 13	Surface imperméabilisée initiale Cf. tableau 13
Fonction de transfert	Temps de concentration	Formule de Giandotti Cf. tableau 14	Formule de Giandotti Cf. tableau 14
	Coefficient de stockage St	St de Giandotti Cf. tableau 14	St de Giandotti Cf. tableau 14
Fonction de routage	Coefficient K de Muskingum	K initiale Cf. tableau 15	K initiale Cf. tableau 15
	Coefficient X de Muskingum	0,2	0,2

Tableau 21: Valeurs finales des paramètres après le calage du modèle.

Le modèle HEC-HMS est calé et peut être utilisé pour l'étude hydrologique du micro bassin-versant n°40 ou n°171.

4 Conclusion

Ma collaboration au projet s'arrête à cette étape. Ce projet est un travail à long terme qui doit s'étaler sur au moins 2ans. Ce rapport ne présente donc que la première partie de l'étude.

La phase 1 du projet est terminée et a abouti à une liste de 22 bassins-versants potentiellement aptes à servir d'objets d'étude pour le projet de ralentissement dynamique. La nécessité de disposer, pour l'analyse multidimensionnelle, de données géographiques hydrologiques et hydrauliques spécifiques à chaque sous bassin-versant a permis de développer les connaissances des acteurs locaux sur le territoire de la Sèvre-Nantaise. L'atlas cartographique, illustrant les analyses diverses menées sur le territoire, offre une vision d'ensemble des caractéristiques du bassin de la Sèvre et regroupe un panel d'information qui seront utiles pour les projets futurs de gestion du territoire. L'étude hydrologique, nécessitant une station hydrométrique, a permis d'affiner la liste de choix du micro bassin rural test, en mettant en lumière les deux bassins n°40 et n°171, ce qui correspond à un des objectifs du projet. Le second bassin, de type urbain, reste à déterminer selon la même méthode. Cette liste des 22 bassins pourra être conservée dans le cas où de nouveaux projets de ralentissement dynamique sont envisagés avec l'EPTB de la Sèvre-Nantaise. Enfin, la phase de modélisation hydrologique, bien qu'inachevée, a permis la création d'un des deux modèles des bassins tests.

L'étude se poursuivra dans les prochains mois après la réunion de comité technique de la phase 1 avec l'EPTB de la Sèvre-Nantaise.

La phase de modélisation hydrologique devrait se poursuivre comme suit:

- Réalisation et calage du modèle du bassin-versant de type urbain ;
- Obtention des données pluviométriques nécessaires à un pas de temps 6min pour trois fréquences et deux typologies de pluie chez MétéoFrance ;
- Insertion de ces pluies dans les modèles préparés ;
- Analyse des résultats pour caractériser la réaction des deux bassins tests aux pluies et calculer les volumes ruisselés ;

Les grandes phases suivantes sont résumées ainsi :

- Etude hydraulique du modèle pour déterminer les principaux axes de ruissellement, les zones vulnérables, les vitesses d'écoulement, l'influence des coefficients de rugosité sur les volumes ruisselés, les capacités d'évacuation des talwegs ;
- Proposer des aménagements de type doux et correspondant aux principes de ralentissement dynamique sur les deux bassins-versants tests ;
- Tester l'efficacité de ces aménagements en les intégrant aux modélisations hydrologiques et hydrauliques ;
- Proposer un protocole de suivi des ruissellements et des inondations via un réseau d'appareils de mesures et de démarches sur le terrain ;

Ce projet est ambitieux et mène des analyses exhaustives et complètes. Ils rassemblent des acteurs diversifiés, à la fois des entreprises privées, des organismes de recherches, des syndicats de gestion de bassins et lors de la phase aménagement des particuliers. Cette diversité d'acteurs favorise la dynamique des idées et des propositions. Ce projet est

également pilote dans le thème du ralentissement dynamique et s'inscrit dans une remise en question globale du système de gestion des inondations.

Les questions d'environnement, de sauvegarde paysagère, d'optimisation de l'organisation du territoire et des activités humaines sont au cœur du projet. Ce projet fait référence à des enjeux scientifiques, techniques, environnementaux, sociaux et politiques.

Bibliographie

BINJAMIN Frank. **Cartographie des risques de ruissellement sur le Bassin de la Sèvre Nantaise**. Thèse de master 2. Cartographie et Gestion de l'Environnement. Université de Nantes, 2009. 64p.

BOCHER Erwan. **Impacts des activités humaines sur le parcours des écoulements de surface dans un bassin versant bocager: essai de modélisation spatiale**. [En ligne]. Thèse de doctorat. Géographie. Université Rennes 2, 2005. 321p. Disponible sur : < <https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01093074/> > (consulté le 31 mars 2015)

BOUBAKEUR Mekherbeche. **Simulation de La Propagation Des Ondes de Crues Dans Les Canaux Naturels**. [En ligne]. Thèse de Magistère. Hydraulique. Université El Hadj Lakhdar de Batna, 2011, 127p. Disponible sur < http://theses.univ-batna.dz/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=2265&Itemid=4 >, (consulté le 30 mai 2015).

CHOCAT Bernard. **Urbanisation et inondation, phénomènes de ruissellement, causes naturelles et facteurs d'aggravation**. [En ligne]. Aménagement et nature, 1989, n°95, p13 à 15. Disponible sur : < <http://hdl.handle.net/2042/49632> > (consulté le 1 avril 2015)

CRONSHEY Roger. **Urban Hydrology for Small Watersheds**. US Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Engineering Division. 1986.

ELBASHIR Safa. **Flood routing in natural channels using Muskingum methods**. 2011. 128p. Disponible sur : < <http://arrow.dit.ie/engschcivoth/12/> > (consulté le 28 mai 2015)

AHBARI Abdellatif, **Le bassin versant de Rhéraya : modélisation pluie-débit et prédiction du comportement hydrologique**. [En ligne]. Thèse de master 2. Hydraulique et environnement. Université de Guéliz-Marrakech. 2013. 101p. Disponible sur : < <http://www.saidi.ma/ahbari2013.pdf> > (consulté le 28 mai 2015)

EPTB de la Sèvre-Nantaise, [En ligne] : < <http://www.sevre-nantaise.com/bassin-versant/presentation#> > (consulté le 2 avril 2015)

HILLEL D. et BERLINER P. **Waterproofing surface-zone soil aggregates for water conservation**. *Soil Science*, 1974, n° 2, p131-35.

JOANNON Alexandre. **Spatial coordination of cropping systems to control ecological processes. Case study of runoff in agricultural catchment basins of the Pays de Caux**,

France. [En ligne]. Thèse de doctorat. Agronomie. Institut National Agronomique Paris-Grignon, 2004. 394p. [En ligne]. [s.l.] : INAPG (AgroParisTech), 2004. Disponible sur : < <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001257> > (consulté le 1 avril 2015)

MARC Philippe. Les cours et le droit, Editions Johanet, France, 2006. 292p.

MONTGOMERY David R. **Road surface drainage, channel initiation, and slope instability.** [En ligne]. Water Resources Research. 1994., n°6, p. 1925–1932. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1029/94WR00538> > (consulté le 08 juin 2015)

MOUSSA Roger, VOLTZ Marc, ANDRIEUX Patrick. **Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events.** [En ligne]. Hydrological processes. 2002. Vol. 16, n°2, p. 393–412. Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.333> > (consulté le 02 avril 2015)

MUSY André, et HIGY Christophe. **Hydrologie appliquée.** [En ligne]. Edition H* G* A, 1998. 368p. ISBN : 973-985308-0. - 978-973-985308-8

POULARD Christine, CHASTAN Bernard, ROYET Paul, DEGOUTTE Gérard, GRELOT Frédéric, ERDLLENBRUCH Katrin, NÉDÉLEC Yves. **Prévention des inondations par ralentissement dynamique: principe et recommandations.** Ingénieries–EAT, spécial, La prévention des inondations. Aspects techniques et économiques des aménagements de ralentissement dynamique des crues. 2008. p. 5–24. ISBN-13 978-2-85362-677-4

POULARD Christine et LE HENAFF Guy, **Compte-rendu thématique sur les liens entre bocage, ruissellement et inondations, Conférence départementale de l'environnement : Quel avenir pour le bocage en Finistère ? 2014**

PUSTELNIK, Guy. **Les Établissements Publics Territoriaux de Bassin, Pivots de L'action Territoriale Pour Une Gestion Équilibrée de L'eau et Des Milieux Aquatiques À L'échelle Des Bassins Versants: Premiers Retours D'expérience.** [En ligne]. Revue Des Sciences de l'eau: Journal of Water Science. Vol21, n°2, 2008, p199–218. ISSN : 0992-7158 (imprimé) 1718-8598 (numérique)
Disponible sur < <http://dx.doi.org/10.7202/018466ar> > (consulté le 22 avril 2014)

REGAZZONI Cyrielle, PAYRAUDEAU Sylvain et GREGOIRE Caroline. **Evaluation du potentiel de rétention et de remédiation des flux de produits phytosanitaires dans les eaux de surface des ouvrages de rétention et de remédiation. PROJET ENRHY. Livrable1: Synthèse bibliographique des outils d'évaluation du ruissellement.** 2010. 22p.

SABOL George V. **Clark unit hydrograph and R-parameter estimation.** [En ligne]. *Journal of Hydraulic Engineering.* 1988. Vol. 114, n°1, p. 103–111. Disponible sur: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1988\)114:1\(103\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1988)114:1(103)) > (consulté le 28 mai 2015)

Safer Flandres Artois. **61 ha libérés à l'amiable pour créer une zone d'expansion de crue.** [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.flandres-artois.safer.fr/Creation-d-une-zone-d-expansion-de-crue.aspx#>> (consulté le 1er avril 2015)

SEBBAB Hassane. **Application des SIG [Systèmes d'information géographique] à l'étude de l'impact de la voirie et des structures linéaires sur l'écoulement et l'érosion hydrique des sols viticoles de Champagne.** [En ligne]. Thèse de doctorat. Géographie.

Université Rennes 2, 2000. Disponible sur : < <http://www.theses.fr/2000REN20004> > (consulté le 2 avril 2015)

SCHÜLER Gebhard, **Precautionary Land-use – Sufficient for flood (damage) mitigation?** 2007. 2p.

SHARFFENBERG William A., **Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's manual**, 2013, US Army Corps of Engineer, 442p.

SOGREAH, **Etude de définition d'un schéma directeur et d'un programme de prévention des inondations sur le bassin de la Sèvre-Nantaise**, 2006, 65p.

SUN Ge, MCNULTY Steven G. **Modeling soil erosion and transport on forest landscape** . 1998. [En ligne]. Winning solutions for risky problems: Proceedings of conference 29; 1998 February 16-20; Reno, NV. Steamboat Springs, CO: International Erosion Control Association: p189-198. Disponible sur : < <http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/902> > (consulté le 2 avril 2015)

TRAMBLAY Yves. **Modélisation des crues dans le bassin du barrage Makhazine, Maroc** [En ligne]. Institut de Recherche pour le Développement Hydrosociétés-Montpellier, France, 2012, 34p. Disponible sur : < <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010057516> > (consulté le 28 mai 2015)

VIEL Vincent, DELAHAYE Daniel, REULIER Romain. **Impact de l'organisation des structures paysagères sur les dynamiques de ruissellement de surface en domaine bocager. Etude comparée de 3 petits bassins versants bas-normands**. Géomorphologie. 2014. Vol. 2, n°2, p. 175–188. ISBN : 9782913282643

WEMPLE Beverley. C., JONES Julia. A. **Runoff production on forest roads in a steep, mountain catchment**. [En ligne]. Water Resources Research 2003. Vol. 39, n°8, 17p Disponible sur : < <http://dx.doi.org/10.1029/2002WR001744>> (consulté le 2 avril 2015)

ANNEXES

Annexe 1 : Atlas cartographique du bassin de la Sèvre-Nantaise.....	p73
Annexe 2 : Calculs pour l'analyse morphologique.....	p90
Annexe 3 : Caractéristiques des 22 bassins-versants sélectionnés par l'analyse multidimensionnelle.....	p91
Annexe 4 : Calcul des Curve Number et de l'infiltration initiale,	p92
Annexe 5 : Calcul des temps de concentration de Sogreah et Giandotti et du coefficient de stockage.....	p95
Annexe 6 : Calcul du coefficient de Muskingum K.....	p97

Annexe 1. Atlas cartographique du bassin de la Sèvre-Nantaise

Carte1 : Localisation du bassin de la Sèvre-Nantaise dans le bassin Loire-Bretagne, p73

Carte2 : Présentation du réseau hydrographique principal du bassin de la Sèvre-Nantaise, p74

Carte3: Topographie du bassin-versant de la Sèvre-Nantaise, p75

Carte4 : Carte de l'occupation du sol du bassin de la Sèvre-Nantaise, p76

Carte5 : Présentation des 181 micros bassins-versants d'étude, p77

Carte 6 : Superficie des 181 micros bassins-versants de la Sèvre-Nantaise, p78

Carte 7: Sensibilité du bassin de la Sèvre-Nantaise au ruissellement, p79

Carte 8 : Occupation des sols par micros bassins-versants, p80

Carte 9 : Répartition du bocage et des zones humides sur le bassin de la Sèvre-Nantaise, p81

Carte 10 : Présentation des aléas inondations sur le bassin de la Sèvre-Nantaise, p82

Carte 11: Présentation des enjeux remarquables du bassin de la Sèvre-Nantaise, p83

Carte 12 : Localisation des micros bassins-versants en fonction du seuil de sensibilité au ruissellement, p84

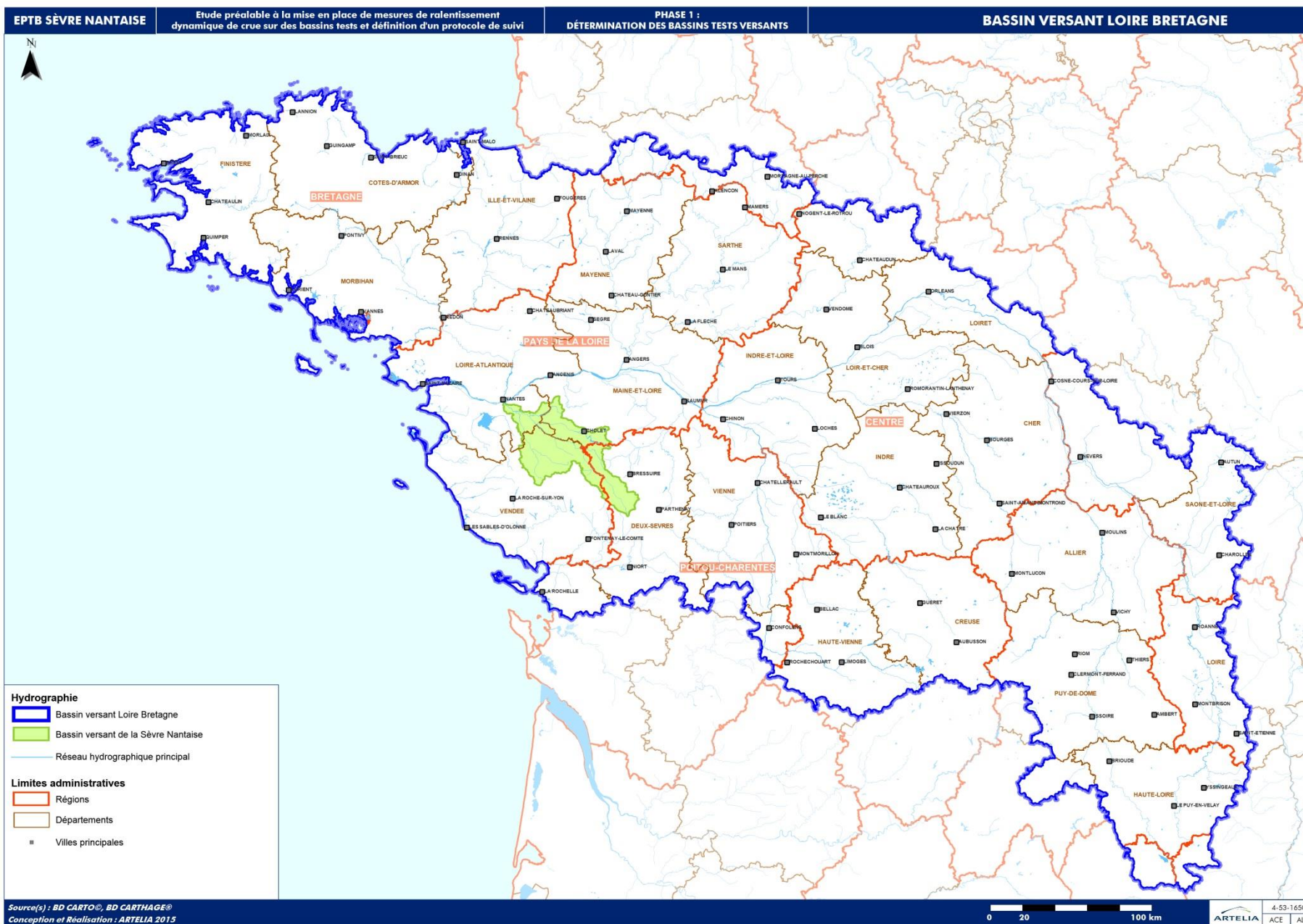
Carte 13 : Micros bassins-versants potentiellement responsables d'inondations en aval, p85

Carte 14 : Corrélation des informations de ruissellements et de surface de l'analyse multidimensionnelle, p86

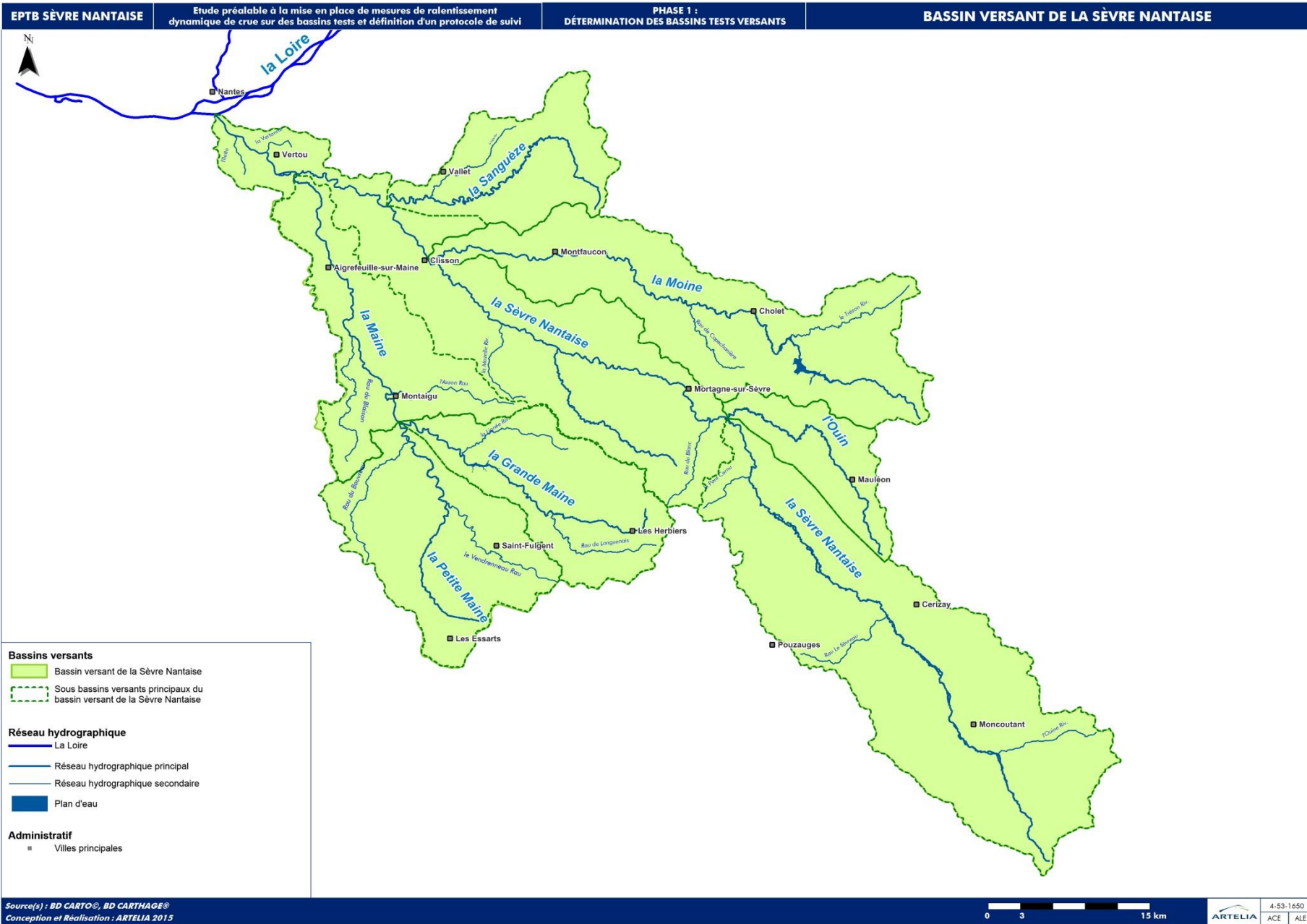
Carte 15: Localisation des 22 micros bassins-versants sélectionnés lors de l'analyse multidimensionnelle, p87

Carte 16 : Localisation des stations hydrométriques disponibles sur le bassin de la Sèvre-Nantaise et choix des bassins-versants à modéliser sur HEC-HMS, p88

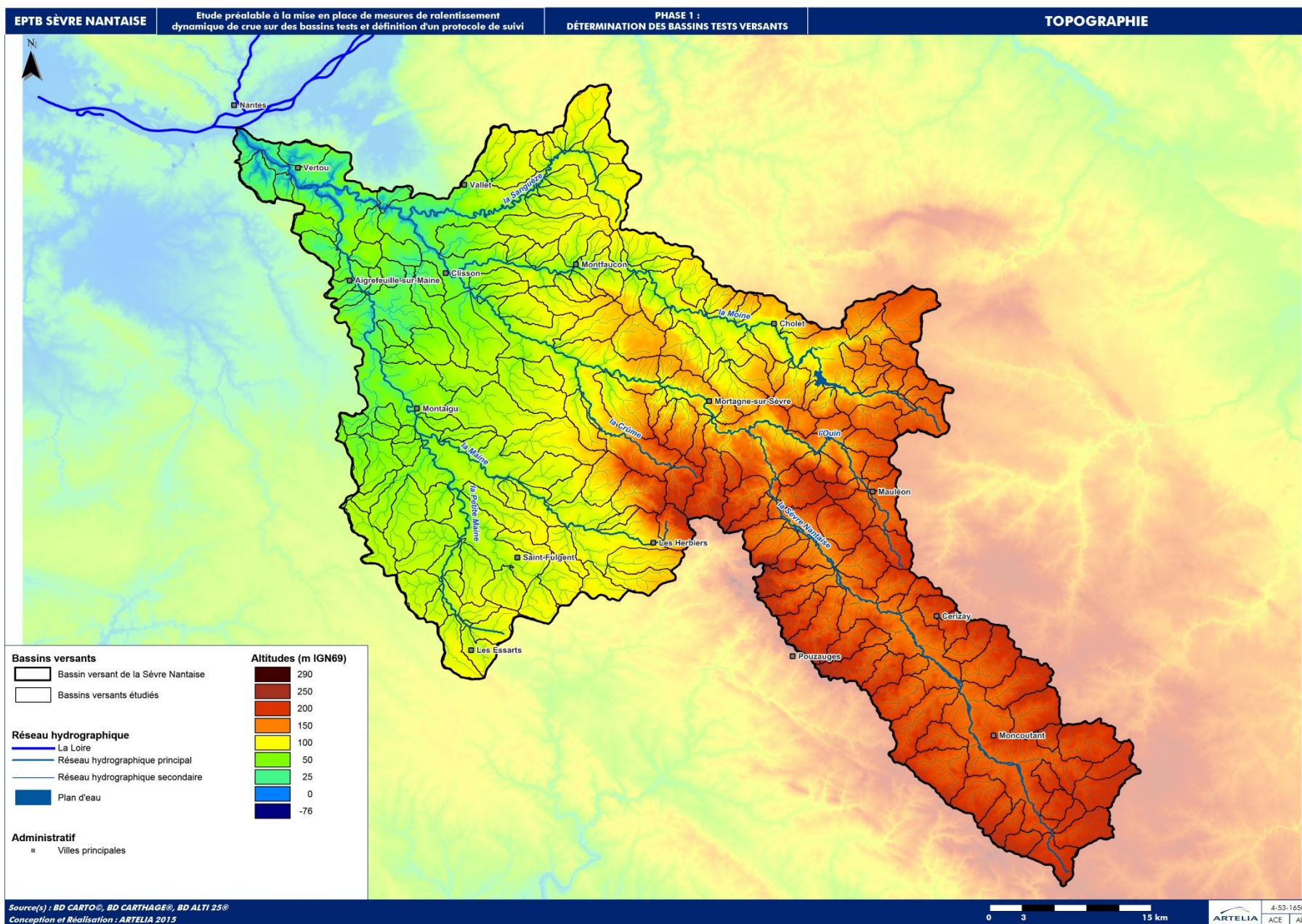
Carte 17 : Découpage du bassin de Saint-Fulgent en sous bassins-versants, p89



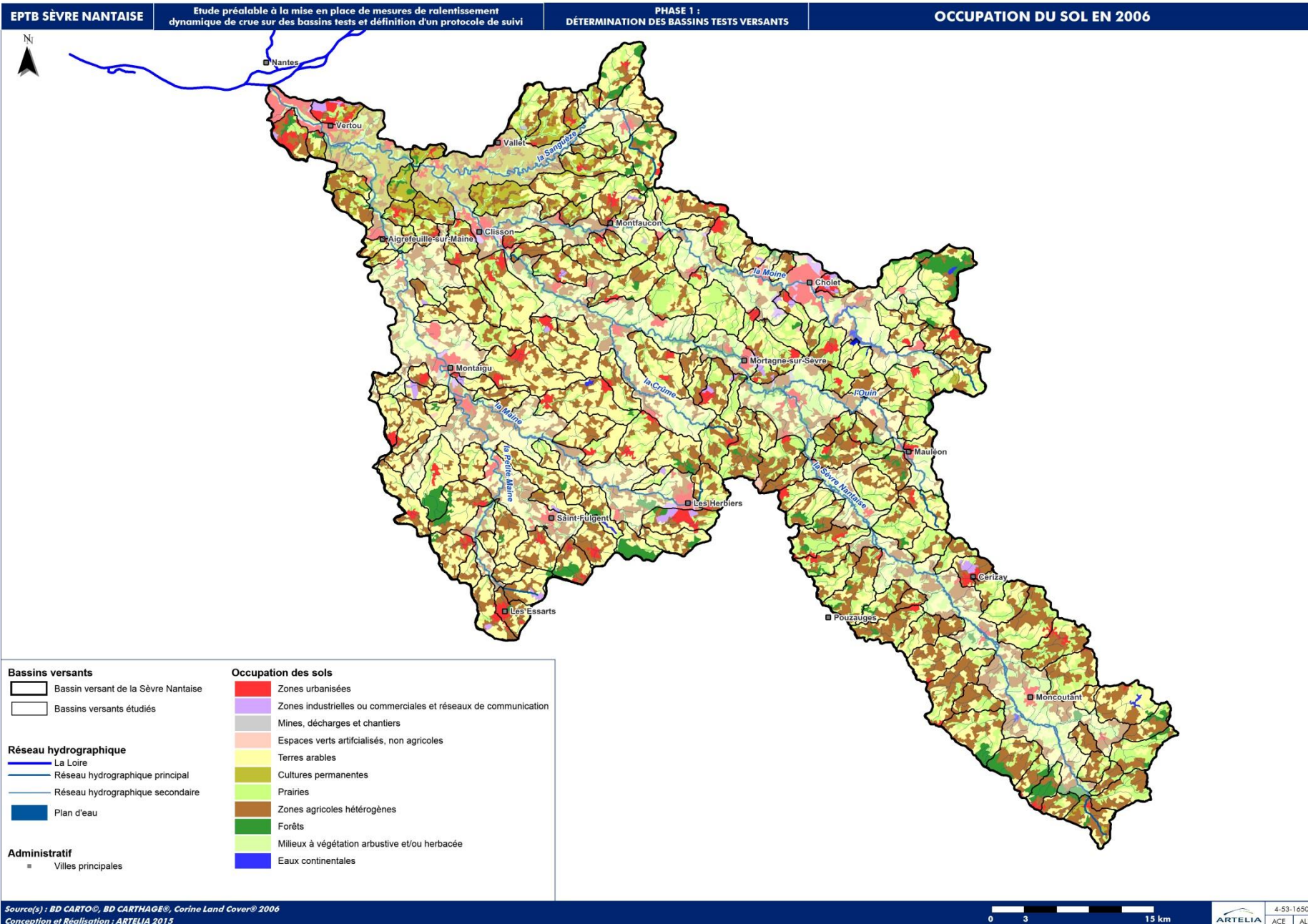
Carte 1



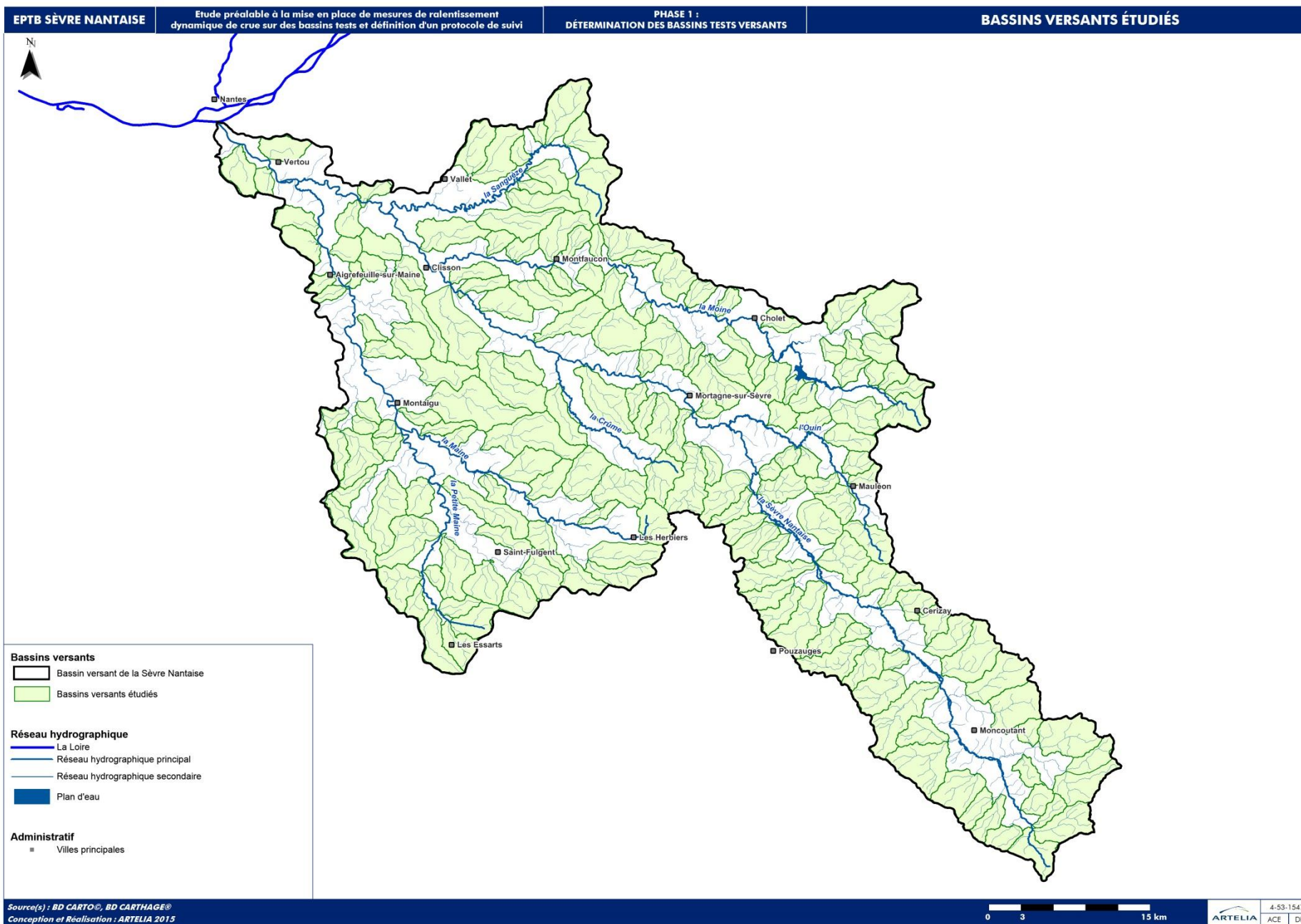
Carte 2



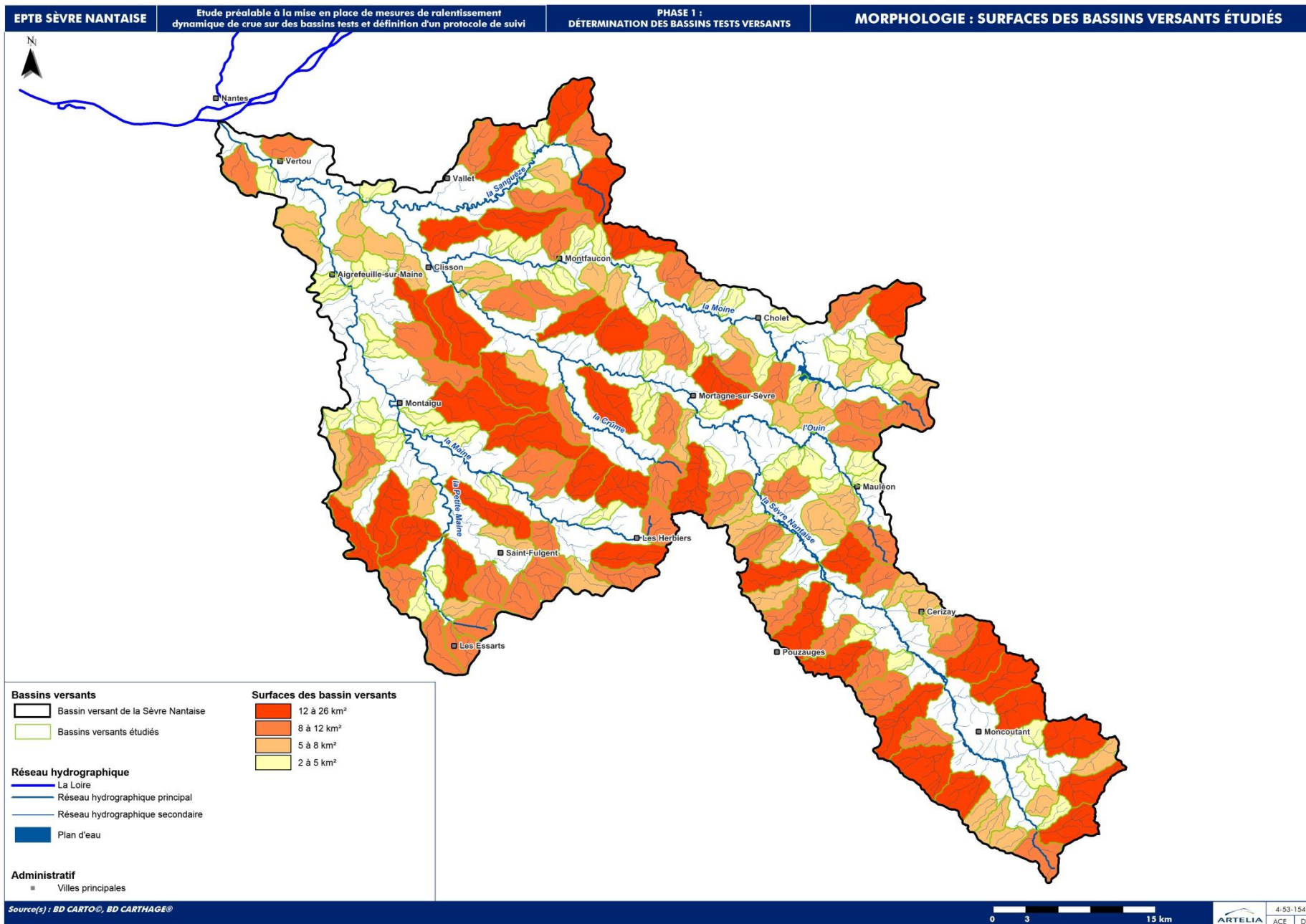
Carte 3



Carte 4

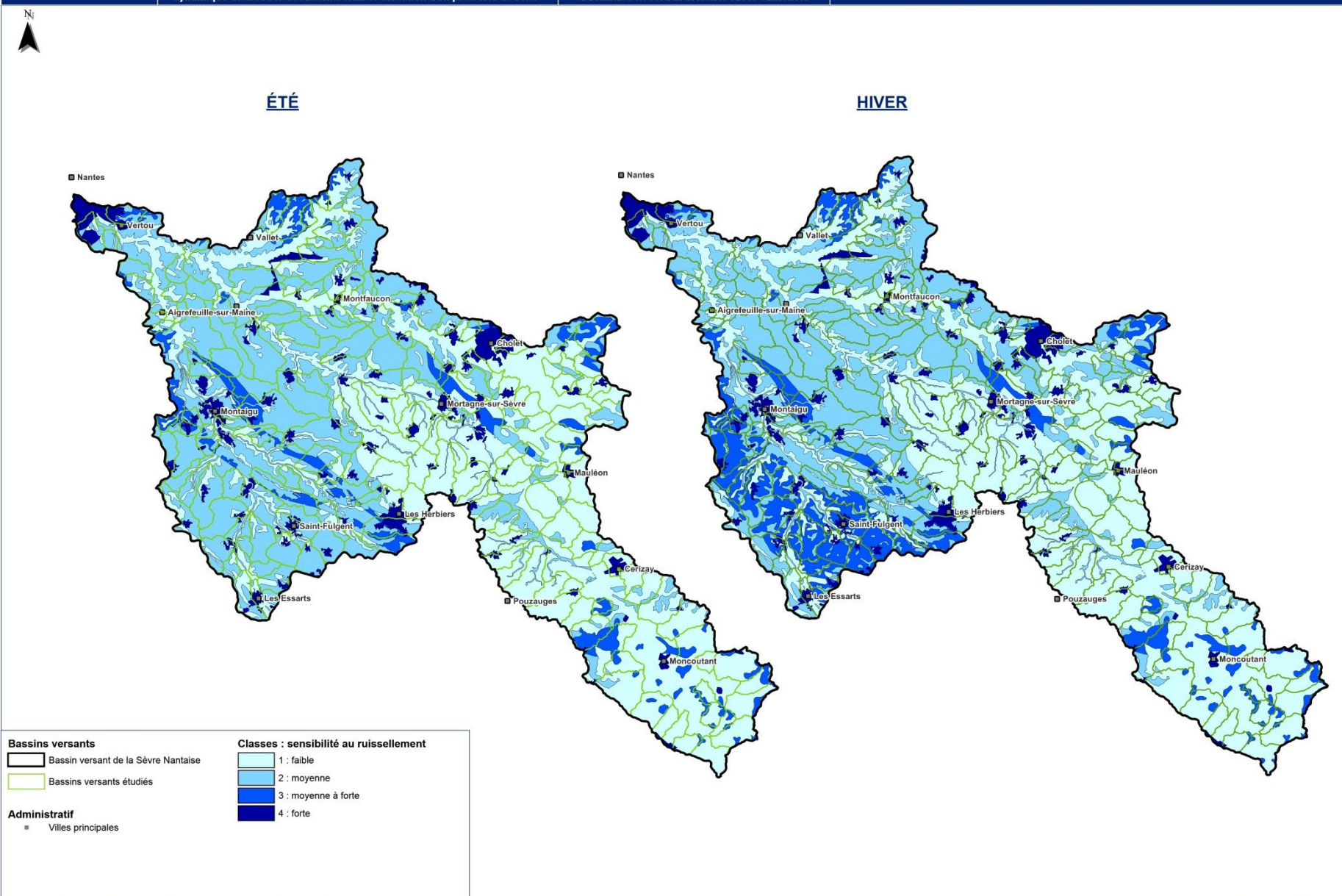


Carte 5

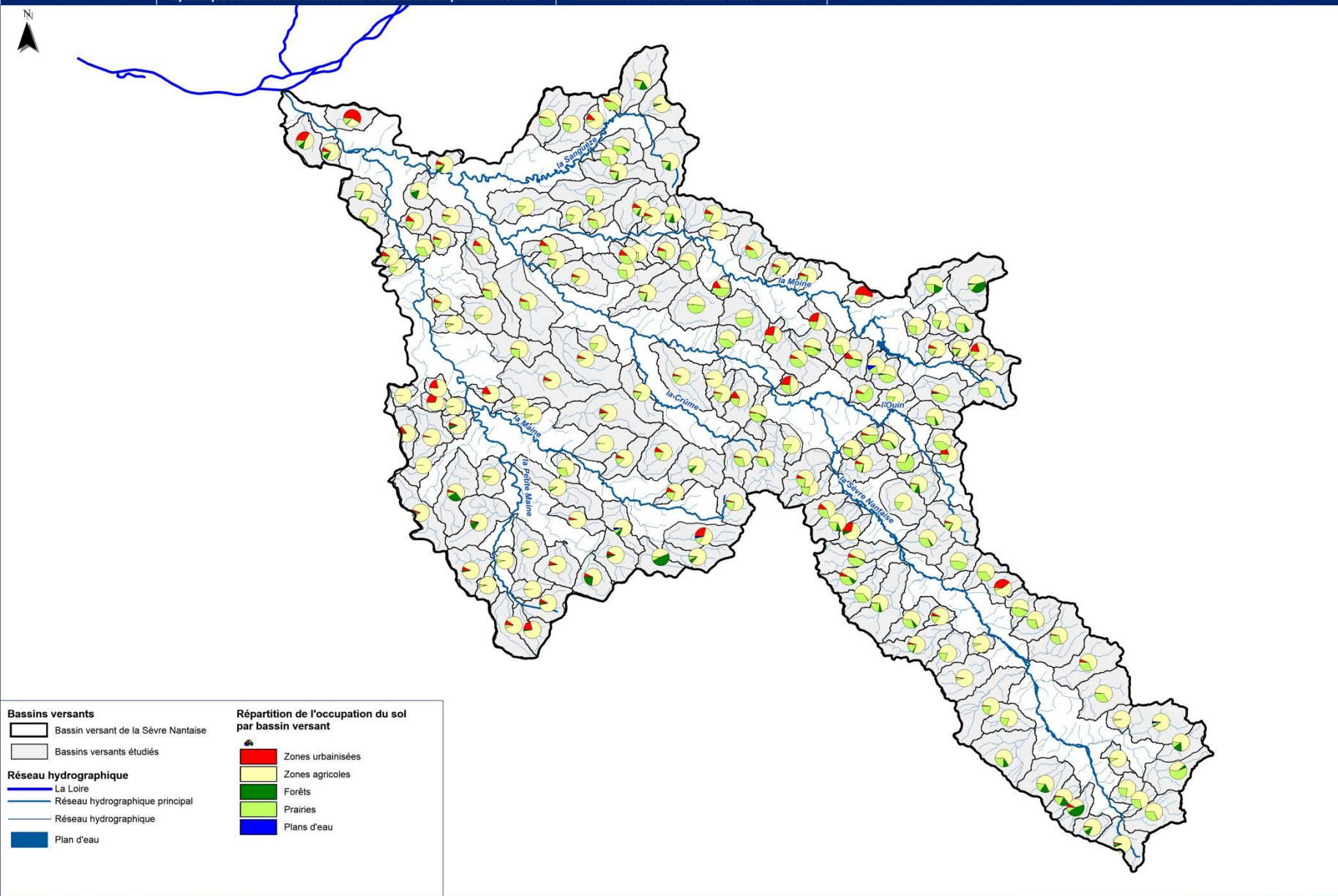


Carte 6

Carte 7



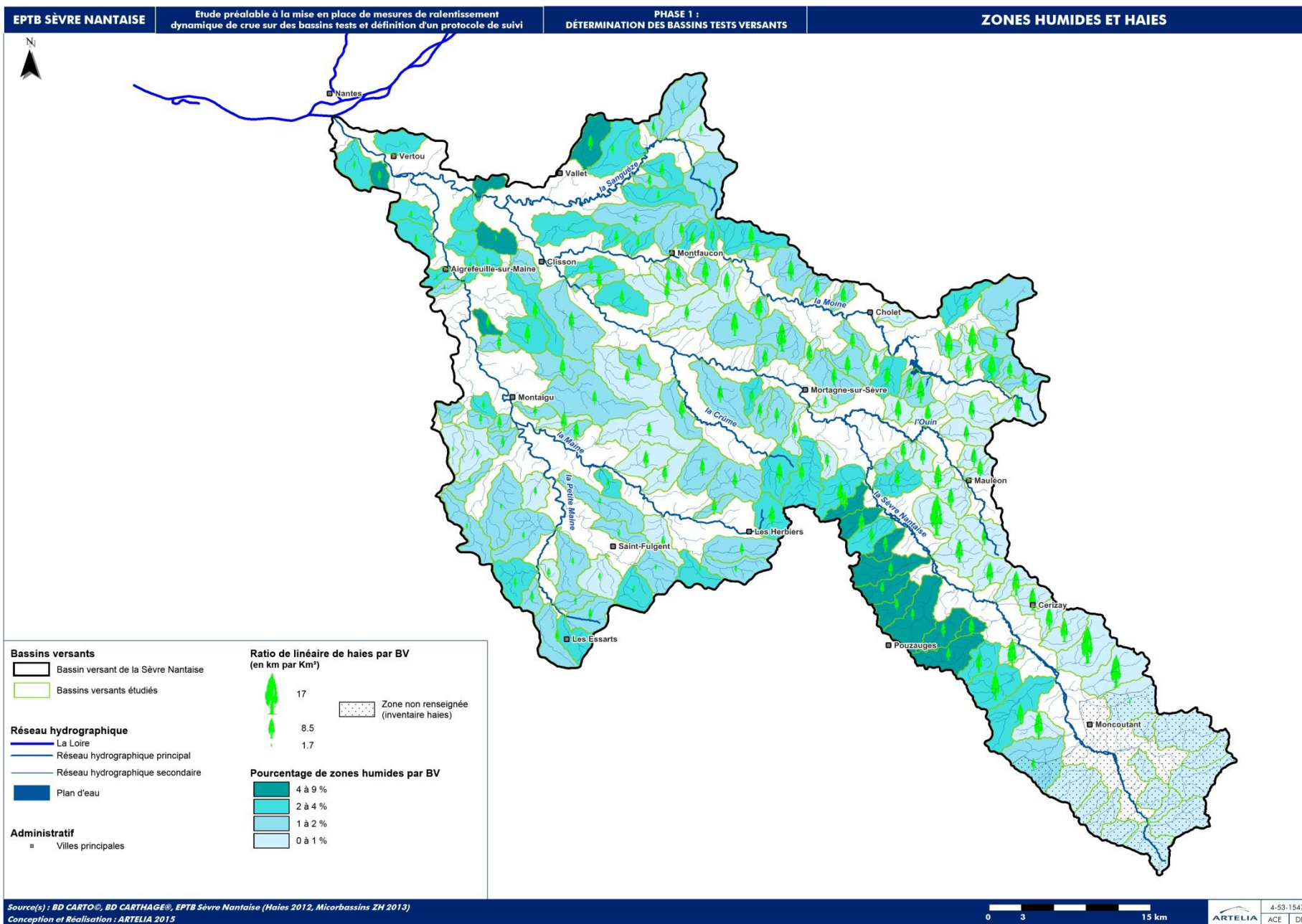
EPTB SEVRE NANTAISE Etude préalable à la mise en place de mesures de ralentissement dynamique de crue sur des bassins tests et définition d'un protocole de suivi PHASE 1 : DÉTERMINATION DES BASSINS TESTS VERSANTS OCCUPATION DU SOL EN 2006 : RÉPARTITION PAR BASSIN VERSANT



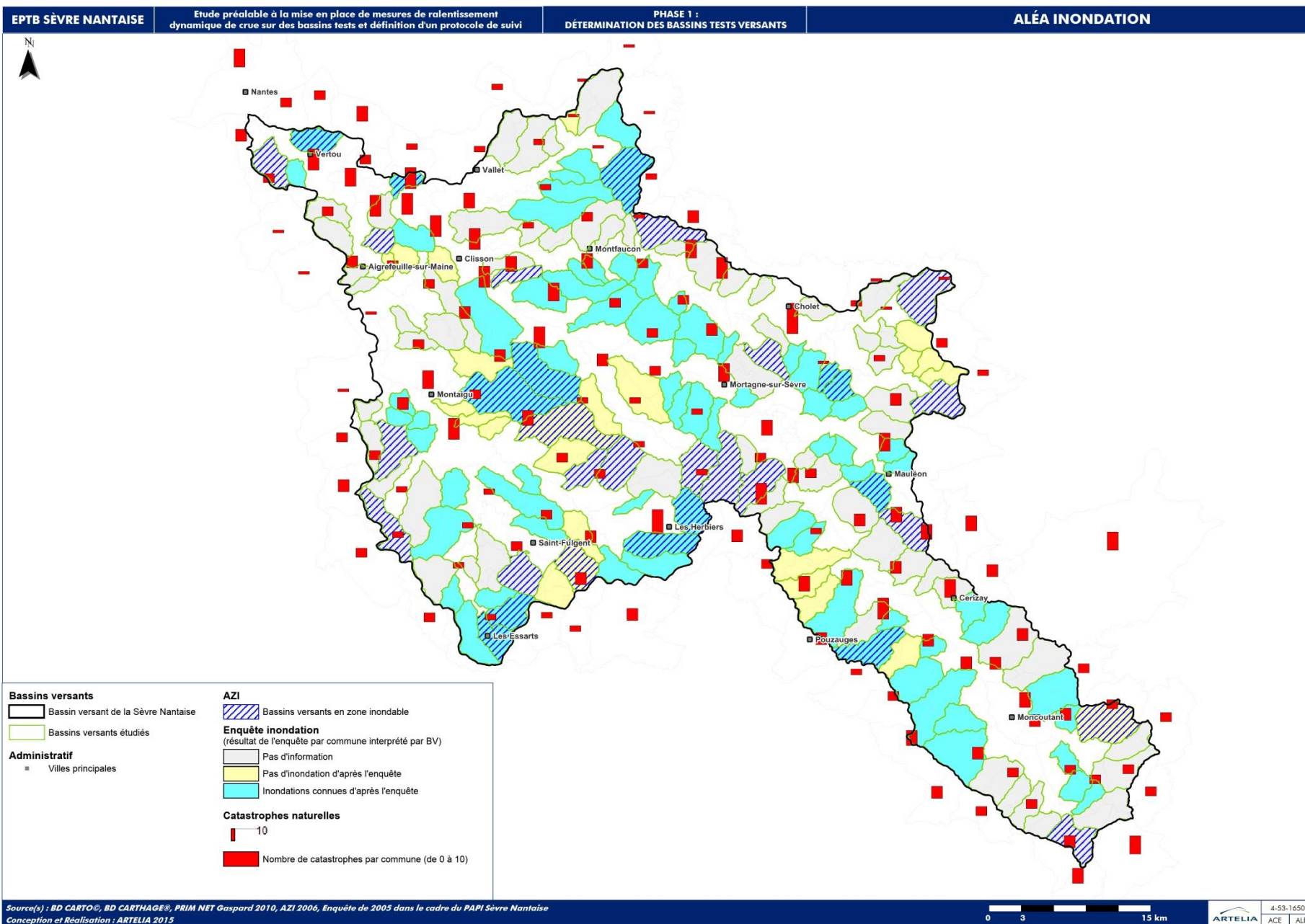
Carte 8

Bassins versants		Répartition de l'occupation du sol par bassin versant	
	Bassin versant de la Sèvre Nantaise		Zones urbanisées
	Bassins versants étudiés		Zones agricoles
Réseau hydrographique			Forêts
	La Loire		Prairies
	Réseau hydrographique principal		Plans d'eau
	Réseau hydrographique		
	Plan d'eau		

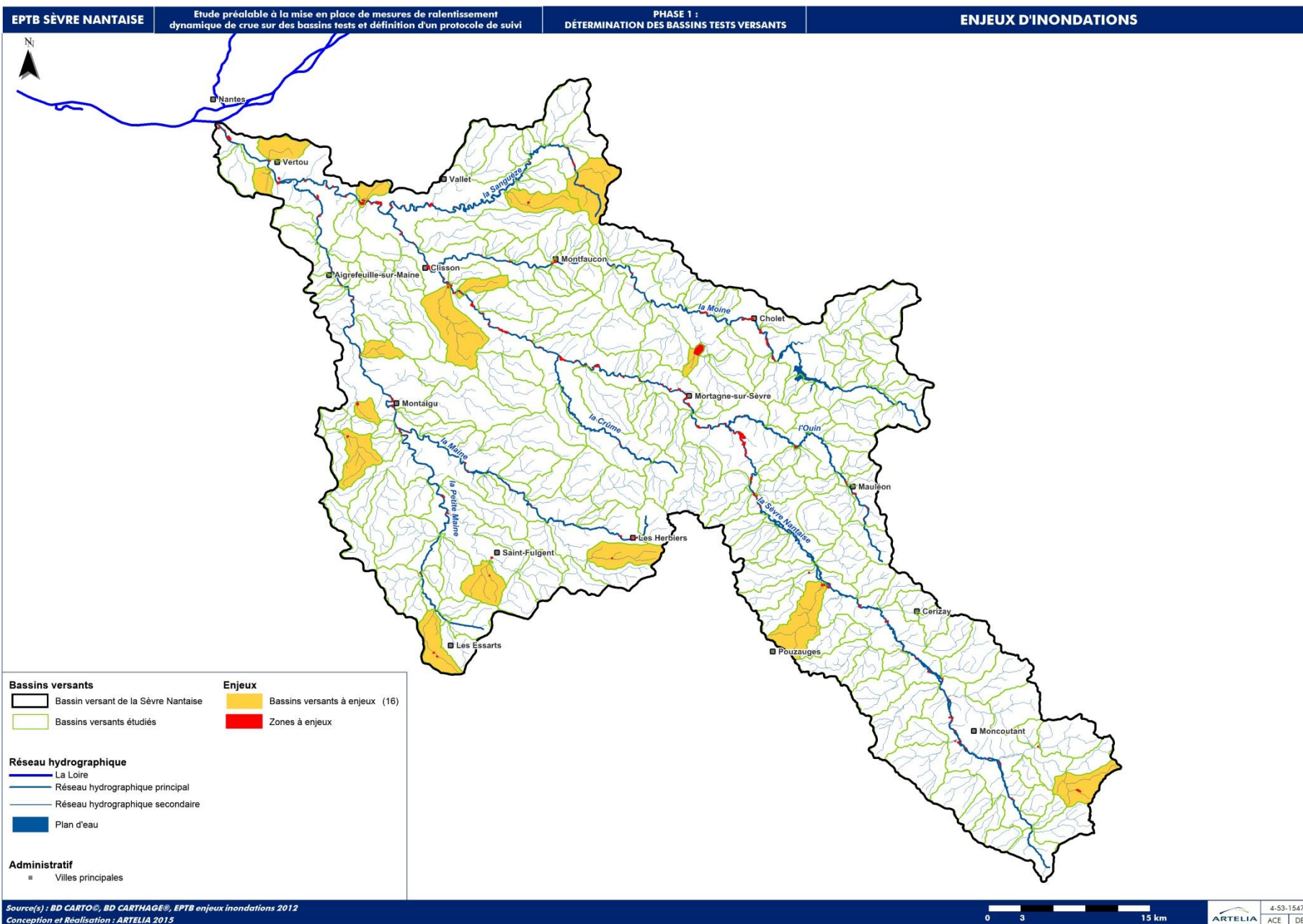
Source(s) : BD CARTO®, BD CARTHAGE®, Corine Land Cover®2006
Conception et Réalisation : ARTELIA 2015



Carte 9

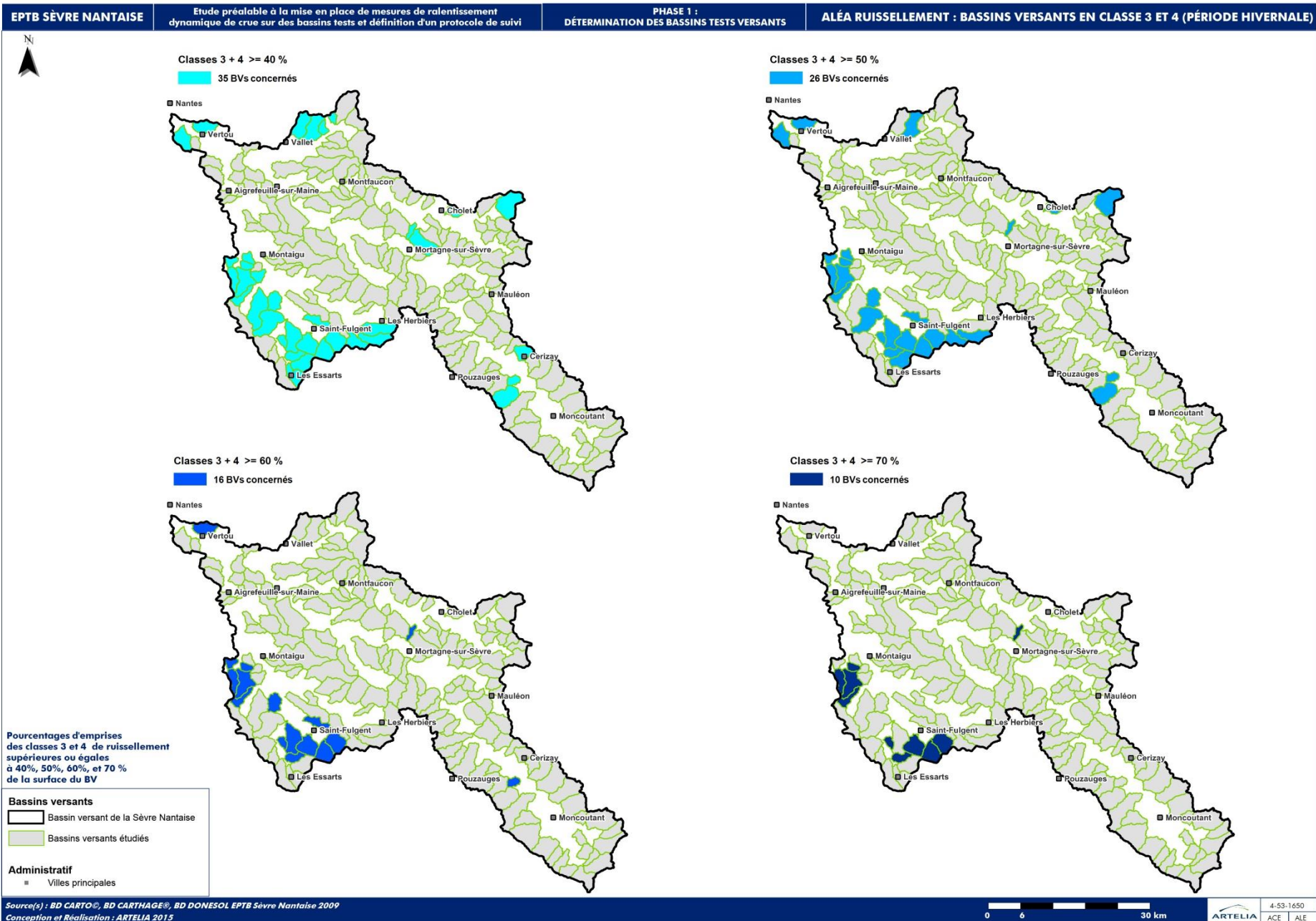


Carte 10

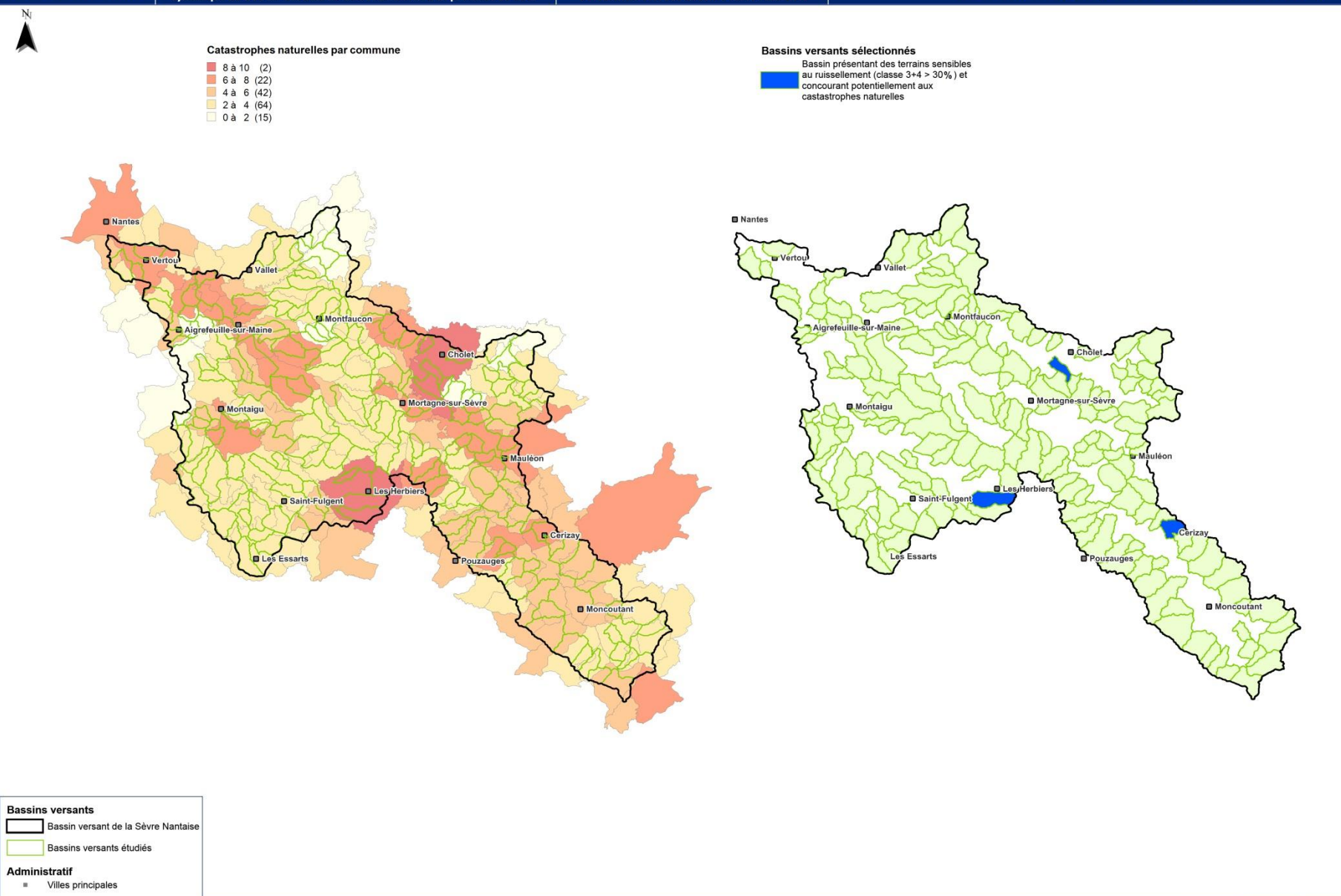


Carte 11

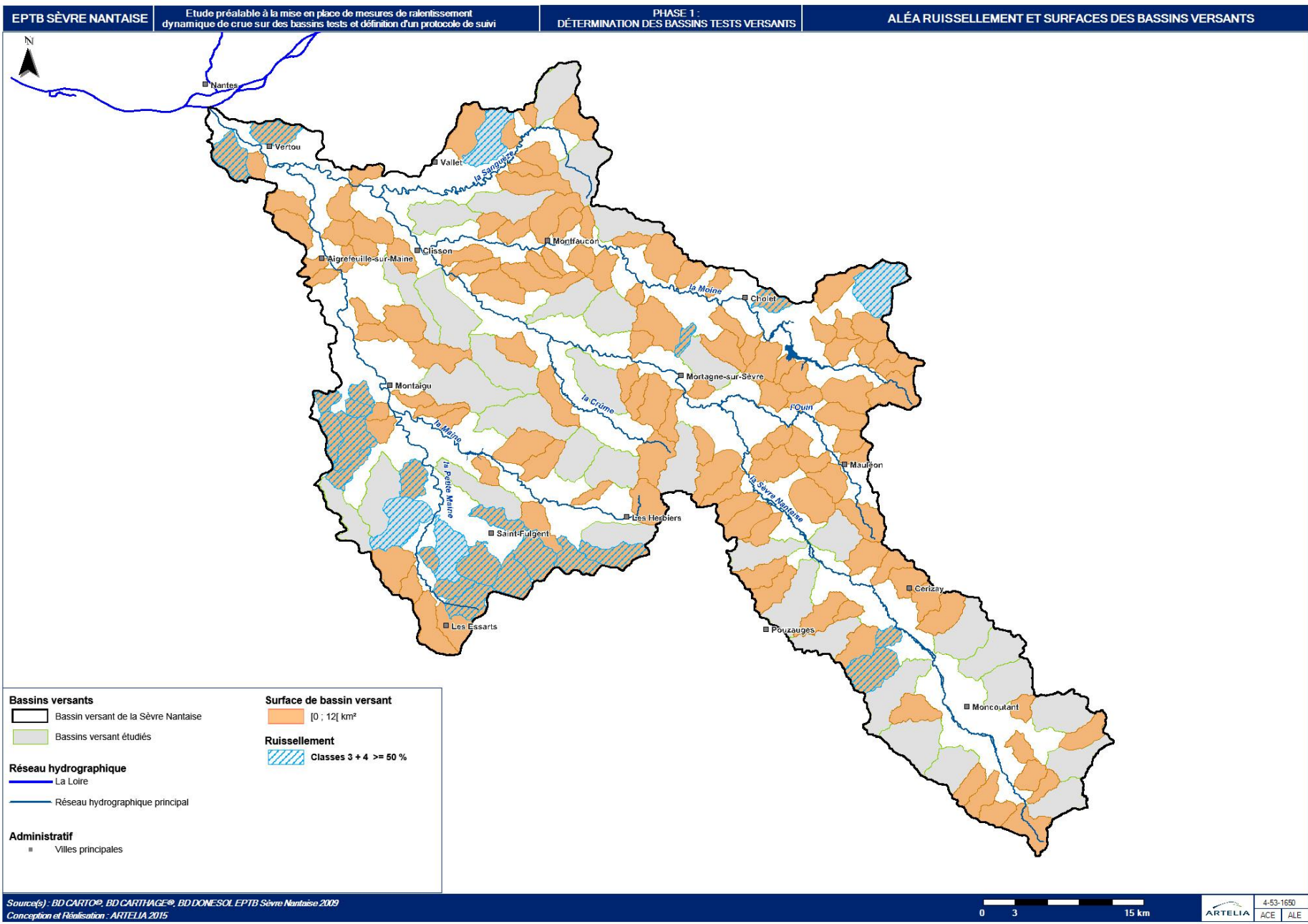
Carte 12



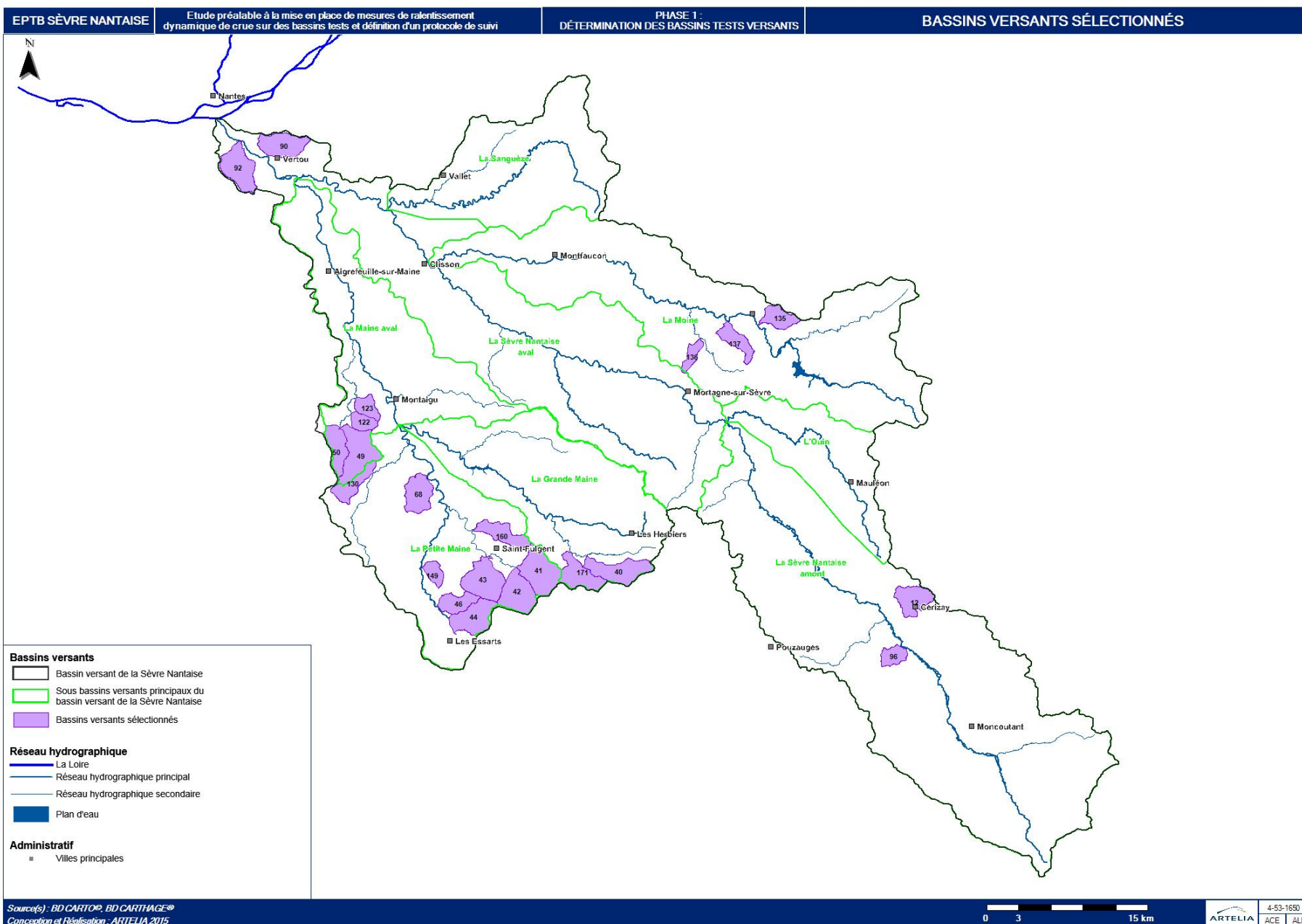
EPTB SÈVRE NANTAISE Etude préalable à la mise en place de mesures de ralentissement dynamique de crue sur des bassins tests et définition d'un protocole de suivi PHASE 1 : DÉTERMINATION DES BASSINS TESTS VERSANTS ALÉA INONDATION (CASTASTOPHES NATURELLES)



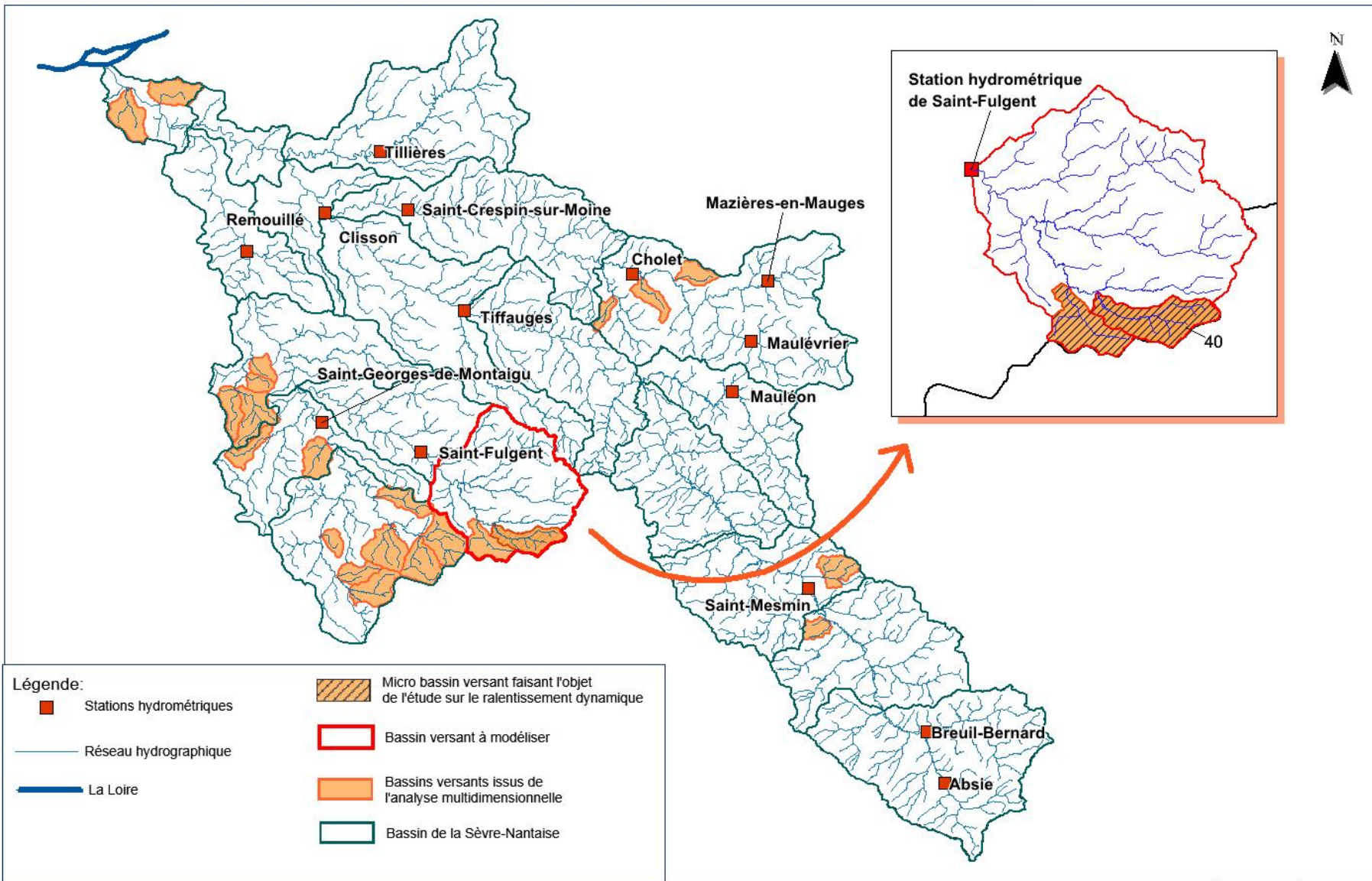
Carte 13



Carte 14



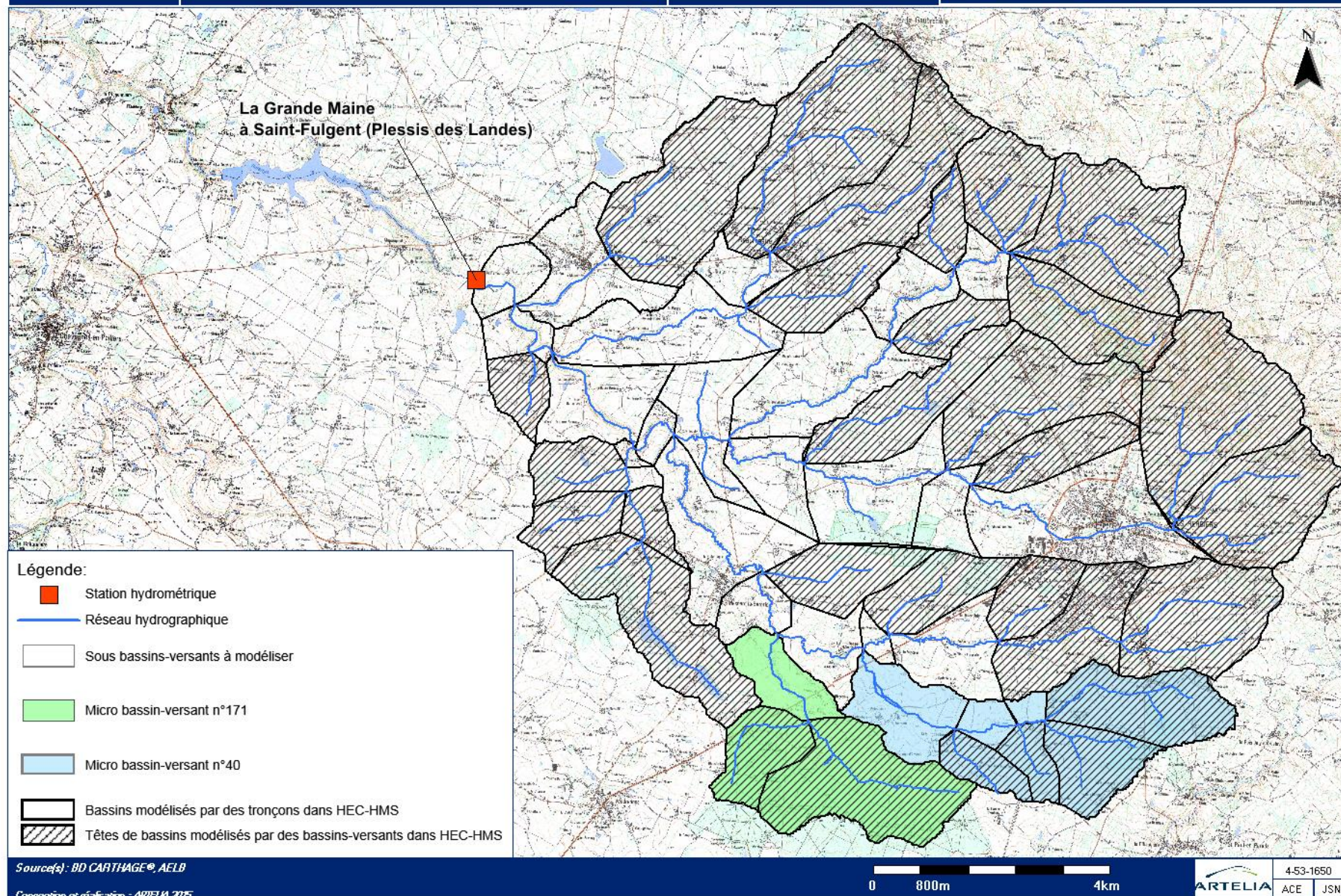
Carte 15



Carte 16

Légende:

- Stations hydrométriques
- Réseau hydrographique
- La Loire
- Bassin versant à modéliser
- Bassins versants issus de l'analyse multidimensionnelle
- Bassin de la Sèvre-Nantaise
- Micro bassin versant faisant l'objet de l'étude sur le ralentissement dynamique



Carte17 :

Annexe 2. Equations des calculs de caractérisation de la morphologie des bassins

- La pente du talweg :

$$P = \frac{(\textit{Altitude max} - \textit{Altitude min})}{L}$$

- La pente du bassin versant ;

$$P = \frac{(\textit{Altitude max} - \textit{Altitude min})}{l}$$

- Le coefficient de Gravelius :

$$Gr = \frac{Pe}{2\sqrt{\pi S}}$$

- Formule de Giandotti :

$$Tc = 60 \frac{0.4\sqrt{S} + 0.0015L}{0.8\sqrt{P L}}$$

- Formule de Sogreah :

$$Tc = 2.60 S^{0.35} P^{-0.4}$$

- Le linéaire de cours d'eau :

$$\textit{Linéaire} = \frac{L_{\textit{hydrographie}}}{S}$$

Avec :

_L la longueur du bassin-versant en m

_Pe le périmètre du bassin-versant en m

_S la surface du bassin-versant en hectare pour le Tc de Giandotti et en km² pour le Gravelius

_ P la pente en %

_L la longueur du talweg en m

_Lhydrographie la longueur totale du réseau hydrographique du bassin-versant en km

_Altitude max et min en mIGN 69

_Gr le coefficient de Gravelius S.U

_Tc le temps de concentration en min

_Linéaire le linéaire de cours d'eau en km/km²

Annexe 3. Caractéristiques des 22 sous bassins-versants sélectionnés par l'analyse multicritère

FEUILLE A3

Annexe 4. Présentation de la méthode de calcul du Curve Number élaborée par le Soil Conservation Service

La méthode du CN a été élaborée par le SCS dans les années 1950 (Regazzoni et al. 2010). Elle a pour objectif d'évaluer, de manière empirique, le volume ruisselé à l'exutoire d'un bassin-versant et n'est basée que sur des données pédologiques et d'occupation du sol, ce qui lui confère une certaine facilité d'utilisation. Le SCS a élaboré cette méthode à partir de l'observation et des mesures de ruissellement et de débits sur une centaine de bassins-versants au Etat-Unis (Regazzoni et al. 2010). Il est donc important de noter que cette méthode reste relativement spécifique aux types de bassins étudiés par le SCS et que sa pertinence peut être remise en cause pour certains bassins aux caractéristiques atypiques. La méthode du Curve Number est valide pour une superficie de bassin comprise entre 0,25 hectares et 100 km² (Regazzoni et al. 2010).

- L'analyse pédologique permet de classer les sols en quatre classes de A à D selon la capacité d'infiltration du sol comme l'illustre le tableau ci-dessous (cf. tableau 23). Avec I_0 et I_f les capacités d'infiltration initiale et finale.

Type de sol	Groupe	I_0 en mm/h	I_f en mm/h
Sable, Silt	A	250	12-8
Limon sableux	B	200	8-4
Limon argileux	C	130	4-1
Argiles, sols salins	D	75	1-0

Tableau 22: Désignation de la classe de sol du SCS en fonction de la pédologie. (Hillel 1974; Musy and Higy 1998; Elmejdi et al. 2013.)

D'après les données pédologiques de l'EPTB, l'ensemble des sols sur le bassin de Saint-Fulgent sont de type limoneux-sableux-argileux ou limoneux-argileux-sableux.

La délimitation des classes n'est donc pas précise, l'ensemble des sous bassins-versants oscillent entre les classes B et C.

- Le SCS a élaboré une table fournissant des Curve Number pour chaque type d'occupation du sol et suivant la classe de sol définie comme expliqué précédemment. La table est présentée ci-dessous (cf. tableau 23).

L'analyse de l'occupation des sols pour chacun des 28 sous bassins-versants a été réalisée sur MapInfo. Les types d'occupation présents sur le territoire sont urbains, agricoles et forestiers. Le calcul du Curve Number global (pour chaque sous bassin) à partir de la table du SCS (cf. tableau 23) suit la formule suivante :

$$CN_{global} = \frac{\sum S_i * CN_i}{\sum S_i}$$

Avec : S_i la surface de chaque type d'occupation du sol en km² ou hectare

CN_i le Curve Number de chaque type d'occupation S.U

_ CN global le Curve Number pour chaque sous bassin S.U

Description of Land Use	Hydrologic Soil Group			
	A	B	C	D
Paved parking lots, roofs, driveways	98	98	98	98
Streets and Roads:				
Paved with curbs and storm sewers	98	98	98	98
Gravel	76	85	89	91
Dirt	72	82	87	89
Cultivated (Agricultural Crop) Land*:				
Without conservation treatment (no terraces)	72	81	88	91
With conservation treatment (terraces, contours)	62	71	78	81
Pasture or Range Land:				
Poor (<50% ground cover or heavily grazed)	68	79	86	89
Good (50-75% ground cover; not heavily grazed)	39	61	74	80
Meadow (grass, no grazing, mowed for hay)	30	58	71	78
Brush (good, >75% ground cover)	30	48	65	73
Woods and Forests:				
Poor (small trees/brush destroyed by over-grazing or burning)	45	66	77	83
Fair (grazing but not burned; some brush)	36	60	73	79
Good (no grazing; brush covers ground)	30	55	70	77
Open Spaces (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.):				
Fair (grass covers 50-75% of area)	49	69	79	84
Good (grass covers >75% of area)	39	61	74	80
Commercial and Business Districts (85% impervious)	89	92	94	95
Industrial Districts (72% impervious)	81	88	91	93
Residential Areas:				
1/8 Acre lots, about 65% impervious	77	85	90	92
1/4 Acre lots, about 38% impervious	61	75	83	87
1/2 Acre lots, about 25% impervious	54	70	80	85
1 Acre lots, about 20% impervious	51	68	79	84

Tableau 23: Distribution des Curve Number en fonction de la classe de sol et de l'occupation du sol, méthode du SCS (Elmehdi et al. 2013.; Cronshey 1986)

Les valeurs de CN valables pour les bassins d'étude sont surlignées en jaune. Les CN varient ainsi entre deux extrêmes :

- 81 < CN Zone agricole < 88
- 85 < CN Zone urbaine < 90
- 55 < CN Zone forestière < 70

Ces CN risquent d'évoluer durant le calage du modèle, aucune valeur précise de CN n'est donnée.

L'infiltration initiale I_a est calculée à partir du CN grâce à l'équation suivante:

$$I_a = 0,2 * S$$

et

$$S = \frac{(25400 - 254 * CN_{global})}{CN_{global}}$$

Avec : S_0 la l'infiltration initiale S.U

S_{max} S le potentiel de rétention maximum S.U

L'infiltration évolue donc en fonction du CN et est un élément de calage du modèle.

Les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 25).

N° de bassins versants	Surface agricole En km ²	Surface forestière En km ²	Surface urbaine En km ²
1	5,2	0	0
2	5,7	0	0,7
3	4,0	0	0,3
4	2,0	0	0,1
5	2,4	0	0
6	2,1	1	0
7	5,0	0	0
8	1,1	0	0
9	1,2	0	0
10	5,9	0	0
11	2,6	0	1,4
12	1,6	0	0,3
13	3,7	0,2	0,3
14	2,8	0	0,3
15	2,9	0	1,3
16	0,3	0	1,3
17	1,5	0,5	0
18	2,7	0,3	0,1
19	1,5	0,4	0
20	0,8	0	0
21	1,0	0	0
22	1,9	2,8	0
23	0,8	1	0
24	1,9	0,2	0
25	3,4	0,8	0
26	1,4	0	0
27	1,4	0	0
28	1,1	0	0

Tableau 24: Surface agricole, urbaine et forestière pour chaque sous bassin-versant du bassin de Saint-Fulgent en 2006, Pays de la Loire, France

Annexe 5. Calculs détaillés des temps de concentration des bassins à modéliser sur HEC-HMS

Les temps de concentration ne sont nécessaires que pour les 28 sous bassins-versants. Deux formules ont été utilisées pour les calculs, respectivement celle de Sogreah et de Giandotti :

$$Tc = 2.6 * S^{0,35} * P^{-0,4}$$

$$Tc = 60 \frac{0,4\sqrt{S} + 0,0015L}{0,8\sqrt{P}L}$$

Avec : _ S la surface de chaque sous bassins en hectare

_ P la pente de chaque bassin en %

_ Tc en heure

_ Les surfaces et pentes des bassins ont été calculées grâce au logiciel MapInfo.

Le coefficient de stockage représente le temps mis par les gouttes stockées au sein du bassin pour s'écouler jusqu'à l'exutoire. Il est calculé directement à partir du temps de concentration grâce à l'équation suivante :

$$St = \text{coefficient de Clark} * Tc$$

Avec : _ Tc en heure

_ le coefficient de Clark = 1,6316 S.U

_ St le coefficient de stockage en heure

Le tableau ci-dessous présente les résultats pour les 28 bassins-versants. La différence entre les Tc est importante puisque Giandotti fournit un temps de concentration presque 2 fois plus élevé que celui de Sogreah (cf. tableau 25).

N° de bassin-versant	Surface En km ²	Pente globale En %	Tc SOGREAH En h	St le coefficient de stockage Sogreah en h	Tc Giandotti En h	St le coefficient de stockage Giandotti en h
1	5,2	1,1	2,3	3,8	4,0	6,5
2	6,4	1,9	2,0	3,3	3,1	5,1
3	4,3	2,7	1,5	2,5	1,9	3,1
4	2,1	1,4	1,5	2,5	2,6	4,3
5	2,4	4,6	1,0	1,7	1,7	2,7
6	3,1	3,8	1,2	2,0	1,6	2,6
7	5,0	3,7	1,4	2,3	1,9	3,2
8	1,1	3,3	0,9	1,4	1,3	2,2
9	1,2	2,2	1,1	1,7	1,7	2,8
10	5,9	4,0	1,5	2,4	1,6	2,6
11	4,0	4,2	1,3	2,0	1,7	2,8
12	1,9	3,2	1,1	1,8	1,9	3,1
13	4,2	4,1	1,3	2,1	2,1	3,5
14	3,1	1,4	1,8	2,9	3,2	5,2
15	4,2	1,7	1,8	3,0	3,3	5,3
16	1,6	1,3	1,5	2,4	2,4	3,9
17	2,0	1,2	1,6	2,7	2,6	4,2
18	3,1	0,8	2,2	3,6	4,0	6,5
19	1,9	1,6	1,4	2,3	2,2	3,6
20	0,8	1,4	1,1	1,8	2,0	3,3
21	1,0	1,2	1,3	2,1	2,1	3,4
22	4,7	0,7	2,7	4,4	4,8	7,9
23	1,8	1,0	1,6	2,7	2,9	4,8
24	2,1	1,0	1,8	2,9	2,6	4,3
25	4,6	1,1	2,3	3,7	5,0	8,2
26	1,4	1,4	1,4	2,2	2,0	3,2
27	1,4	1,9	1,2	1,9	1,7	2,8
28	1,1	3,2	0,9	1,4	1,5	2,4

Tableau 25: Paramètres nécessaires aux calculs des temps de concentration et des coefficients de stockage de Giandotti et Sogreah et résultats des calculs pour chaque sous bassin-versant, bassin versant de Saint-Fulgent, France.

Annexe 6. Détails de la méthode de calcul du coefficient K de Muskingum

Le coefficient K de Muskingum correspond au temps mis par le pic de crue pour s'écouler de l'amont vers l'aval d'un tronçon de cours d'eau. Ce calcul ne peut être réalisé directement dans notre cas puisqu'aucune donnée de débit n'est disponible sur le réseau hydrographique du bassin de Saint-Fulgent.

La méthode utilisée pour contourner ce problème consiste à lancer une première modélisation en utilisant la méthode du lag time pour la fonction de routage. Ce premier essai permet d'obtenir les hydrogrammes en amont et en aval de chaque tronçon. Il est alors possible de calculer la durée écoulée entre le pic de crue amont et aval et donc le coefficient K de Muskingum. Une deuxième modélisation peut alors être lancée en utilisant bien comme souhaité la méthode de Muskingum.

- Le calcul du lag time est réalisé avec les formules de Passini et Giandotti présentées ci-dessous :

$$\text{Lag time Passini} = 0,8 * 0,14 * \frac{(S * L)^{1/3}}{\sqrt{P}}$$

$$\text{Lag time Giandotti} = 0,8 * 60 * \frac{0,0015 * L + 0,4 * \sqrt{S}}{0,8 * \sqrt{P * L}}$$

Avec : _ S la surface en hectare

_ L la longueur du talweg en m

_ P la pente du talweg en %

Les résultats du lag time pour les 53 tronçons de cours d'eau sont présentés ci-dessous (cf. tableau 26) :

N° de tronçon	Surface En km ²	Longueur du talweg En km	Pente talweg en %	Lag time de Giandotti En min	Lag time de Passini En min	Moyenne des Lag time En min
riv1	5,2	2,10	0,71	19	14	16
riv2	6,4	4,60	1,02	15	16	15
riv3	4,3	3,80	2,16	9	9	9
riv4	2,1	2,40	0,83	13	10	11
riv5	2,4	1,60	2,69	8	5	6
riv6	3,1	3,20	2,63	8	7	7
riv7	5,0	3,40	2,41	9	9	9
riv8	1,1	2,00	2,25	6	4	5
riv9	1,2	1,50	1,60	8	5	7
riv10	5,9	2,30	4,65	8	6	7
riv11	4,0	2,50	3,00	8	6	7
riv12	1,9	1,40	1,79	9	5	7
riv13	4,2	2,50	1,96	10	8	9
riv14	3,1	3,60	0,67	15	14	15
riv15	4,2	2,10	0,90	16	11	13
riv16	1,6	1,10	1,09	12	6	9
riv17	2,0	1,50	1,00	12	7	10
riv18	3,1	2,90	0,45	19	16	18
riv19	1,9	2,00	1,20	10	7	9
riv20	0,8	1,10	1,00	10	5	7
riv21	1,0	1,40	0,93	10	6	8
riv22	4,7	3,20	0,38	23	21	22
riv23	1,8	2,10	0,62	14	10	12
riv24	2,1	1,90	0,89	13	9	11
riv25	4,6	3,20	0,34	24	22	23
riv26	1,4	1,70	1,24	10	6	8
riv27	1,4	1,20	1,83	8	5	6
riv28	1,1	1,10	2,18	7	4	5
Exutoire	1,10	1,20	0,17	25	14	20
riv10-11	5,09	3,60	0,47	21	20	20
riv10-11-12	1,17	0,50	0,60	18	6	12
riv10-13	3,01	2,50	0,16	32	25	29
riv10-14	1,67	1,40	0,43	18	11	14
riv15-16	2,12	1,80	0,61	15	10	13
riv15-16-17	0,32	0,60	0,50	11	4	8
riv15-21	1,54	1,45	0,07	43	26	34
riv15-23	1,04	1,00	0,40	17	8	13
riv15-24	3,47	2,70	0,15	35	28	31

riv18-19	0,28	0,44	1,14	7	2	5
riv18-19-20	0,58	1,00	0,50	12	6	9
riv18-21	2,23	2,00	0,60	16	11	13
riv22-23	1,53	1,50	0,53	15	9	12
riv2-28	0,83	1,30	2,76	6	3	4
riv2-3	1,08	0,92	0,54	15	7	11
riv2-3-4	3,68	3,30	0,55	18	16	17
riv25-26	0,19	0,40	1,50	6	2	4
riv25-26-27	0,15	0,40	0,50	9	3	6
riv5-14	2,30	0,80	0,06	62	25	44
riv5-24	0,45	0,70	0,14	22	9	16
riv5-27	2,43	2,03	0,54	17	12	14
riv5-6-7	0,80	1,10	1,09	9	5	7
riv5-8	1,35	2,00	0,90	11	8	9
riv5-9	4,02	3,30	0,45	20	18	19

Tableau 26: Paramètres nécessaires aux calculs des lag time de Giandotti et Passini et résultats des calculs pour chaque tronçon du bassin versant de Saint-Fulgent, France.

- La première modélisation avec la méthode des lag time permet d'obtenir les hydrgrammes entrants et sortants de chaque tronçon (cf. figure 30). Le hyétogramme utilisé pour cette modalisation est synthétique de période semestrielle et de pas de temps 5min. Il a été élaboré grâce à la méthode double triangles de Chocat (cf. tableau 27). Les caractéristiques sont les suivantes :

Durée de l'évènement en min	2400
Durée de pluie intense	240
Coefficient de Montana a (mm)	1,435
Coefficient de Montana b	-0,536

Tableau 27: Paramètres à renseigner pour la construction du hyétogramme synthétique en double triangle.

Les coefficients de Montana sont issus de la station de Saint-Nazaire Montoire pour la période 1991-2006. Le hyétogramme est présenté ci-dessous (cf. figure 28).

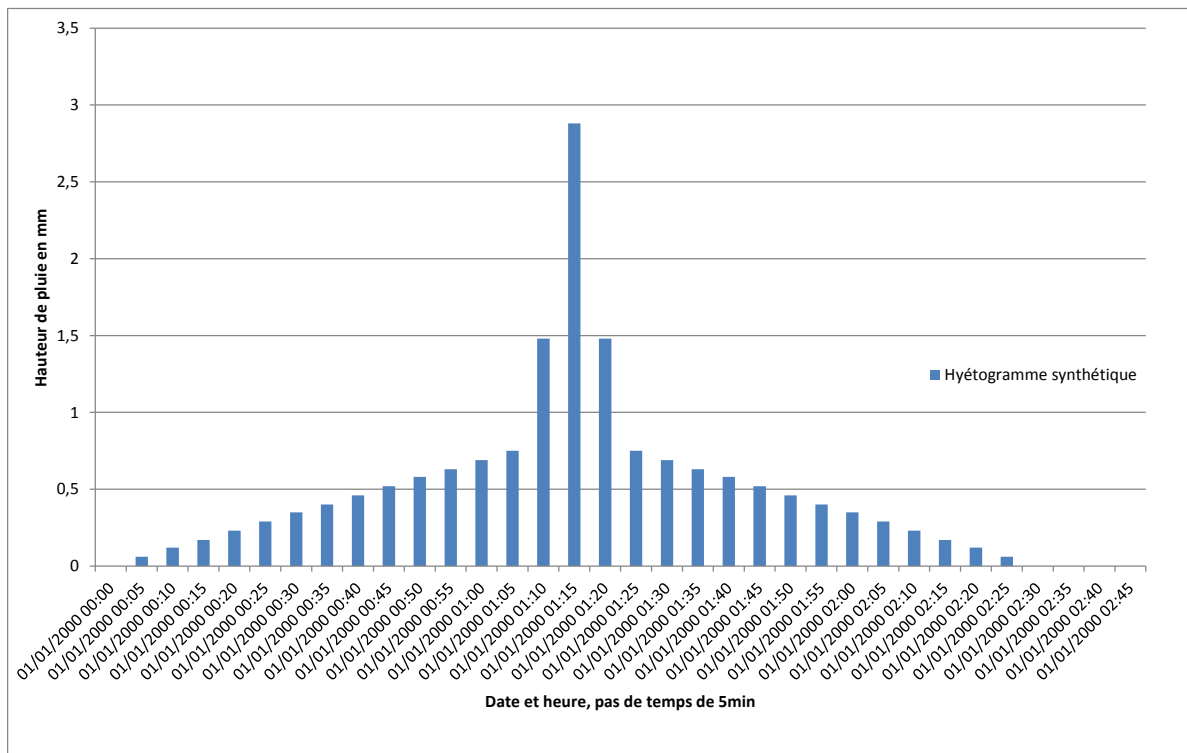


Figure 28: Hyétogramme synthétique issu des paramètres présentés et qui servira pour le calcul des coefficients K de Muskingum

Le graphe (cf. figure 29) ci-dessous superpose les deux hydrogrammes aval et amont. Le quadrillage vertical correspond à un pas de temps de 2min, néanmoins la lecture graphique reste relativement imprécise, les durées sont donc arrondies.

Seul l'exemple du tronçon riv 10-11-12 est présenté pour éviter toute redondance.

Ici, le coefficient K de Muskingum vaut environ 10 minutes soit 0,17h. Les résultats finaux sont présentés dans le tableau ci-dessous (cf. tableau 28).

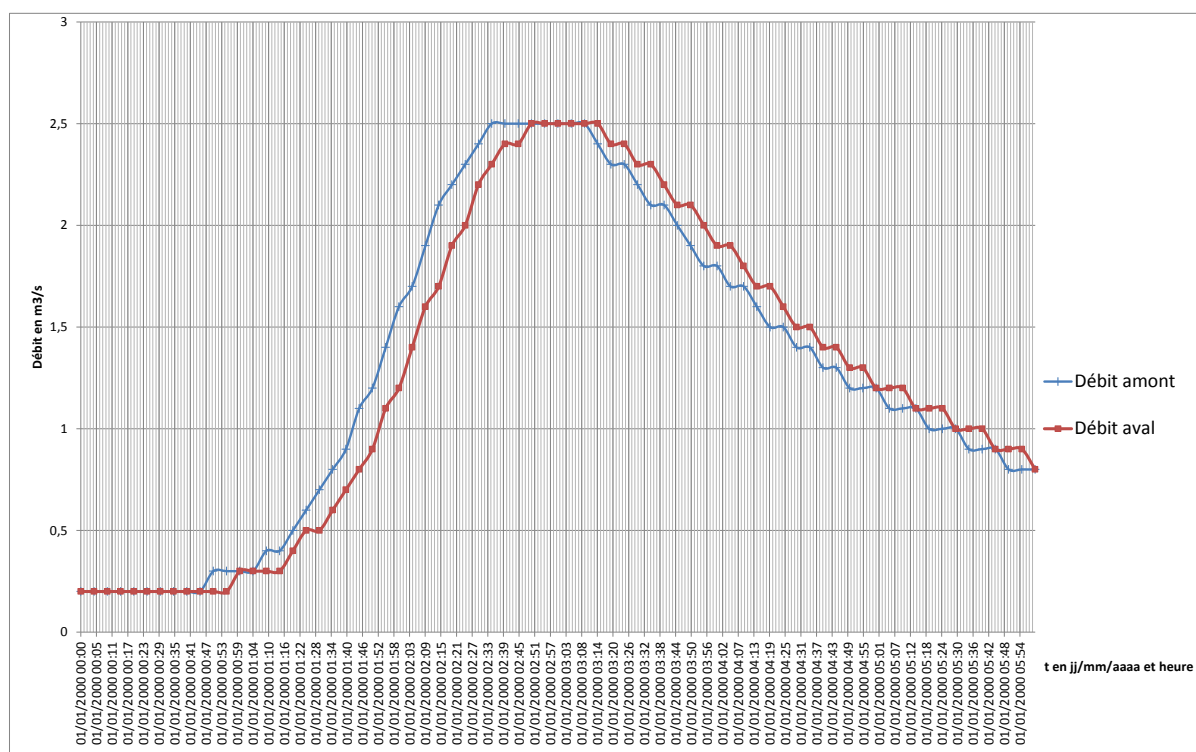


Figure 29: Hydrogramme résultant de la modélisation lancée avec le hyétogramme synthétique.

	Coefficient K en min	Coefficient K en h		Coefficient K en min	Coefficient K en h
riv1	9	0,15	riv5-8	7	0,12
riv2	8	0,13	riv10-11	15	0,25
riv3	6	0,10	riv10-11-12	10	0,17
riv4	6	0,10	riv10-13	25	0,42
riv5	3	0,05	riv10-14	10	0,17
riv6	5	0,03	riv15-16	10	0,17
riv7	5	0,08	riv15-16-17	6	0,10
riv8	2	0,03	riv22-23	10	0,16
riv9	5	0,08	riv18-19	4	0,07
riv10	5	0,08	riv18-19-20	7	0,12
riv11	5	0,08	riv18-21	11	0,18
riv12	5	0,08	riv25-26	3	0,05
riv13	5	0,08	riv25-26-27	5	0,08
riv14	7	0,12	riv5-9	15	0,25
riv15	7	0,12	riv2-3-4	14	0,23
riv16	6	0,10	riv15-23	10	0,17
riv17	7	0,12	riv15-21	30	0,50
riv18	10	0,17	riv15-24	25	0,42
riv19	5	0,08	riv2-3	9	0,15

riv20	5	0,08	riv5-27	12	0,19
riv21	5	0,08	riv5-24	13	0,21
riv22	12	0,20	riv5-14	40	0,67
riv23	6	0,10	riv2-28	4	0,06
riv24	7	0,12	riv5-6-7	5	0,08
riv25	10	0,17	exutoire	15	0,25
riv26	5	0,08			
riv27	5	0,08			
riv28	2	0,03			

Tableau 28: Présentation des coefficients K de Muskingum pour chaque tronçon du bassin-versant de Saint-Fulgent.

Le coefficient K de Muskingum variant très peu d'un débit à l'autre, ces valeurs seront reprises pour l'ensemble des scénarii modélisés.

Nous rappelons que le coefficient X de Muskingum est constant pour l'ensemble des bassins et il est imposé **X=0,2**.