

## CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES SUR LE TERRITOIRE DE NANTES METROPOLE POUR L'ELABORATION DU PLU METROPOLITAIN

### PHASES 2 & 3

### CARACTERISATION DES ECOULEMENTS ET CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

### RAPPORT



<b>Affaire n° : 17-412-01</b>			
<b>Version</b>	<b>Date</b>	<b>Rédigé par</b>	<b>Vérfié par</b>
0	18/07/2018	Laurianne Bellet/Quentin Strappazon	Marc Delbec
<b>Remarques :</b>			

## SOMMAIRE

---

Sommaire .....	2
Listes des Figures.....	3
Listes des tables.....	4
Introduction.....	5
1.1 Contexte de la mission .....	5
1.2 Objectifs des phases 2 et 3 de « Caractérisation des écoulements, définition et cartographie des zones inondables et de l'aléa fonctionnel » .....	6
1.3 Structuration du rapport .....	7
1.4 Synthèse .....	7
2 Construction du modèle hydraulique de ruissellement.....	9
2.1 Approche méthodologique globale.....	9
2.2 Modélisation hydrologique .....	10
2.2.1 Caractérisation des pluies .....	11
2.2.2 Passage de la pluie brute à la lame d'eau ruisselée .....	14
2.3 Modélisation hydraulique des écoulements.....	15
2.3.1 Prise en compte de la topographie .....	15
2.3.2 Prise en compte de la rugosité des sols .....	16
2.3.3 Prise en compte de l'effet d'obstacle du bâti .....	18
2.3.4 Intégration des ouvrages de passage et de vidange .....	19
2.4 Validation du modèle .....	22
2.5 Hypothèse retenue pour la pluie de référence utilisée pour l'évaluation des risques de ruissellement à l'échelle du territoire de Nantes Métropole .....	28
3 Construction de l'aléa de référence et analyse des résultats .....	31
3.1 Aléa fonctionnel de référence.....	31
3.1.1 Grille de définition de l'aléa .....	31
3.1.2 Construction de l'emprise inondée l'aléa de référence .....	35
3.2 Analyse des résultats.....	36
3.2.1 Construction de l'emprise unique des zones inondables et priorisation par source de données .....	36
3.2.2 Analyse des résultats et estimations des surfaces inondées .....	37
3.3 Description des rendus cartographiques .....	40

## LISTES DES FIGURES

---

Figure 1 – Le principe de la méthode mise en œuvre pour évaluer les phénomènes de ruissellement	9
Figure 2 : Territoire modélisé .....	10
Figure 3 : Maillage de calcul bidimensionnel et adaptation de la taille des mailles en fonction du relief .....	16
Figure 4 : Occupation du sol sur le territoire d'étude .....	17
Figure 5 : Forçage du maillage du fait de l'intégration des limites de parcelles bâties en tant que murs poreux .....	18
Figure 6 : Effet de l'intégration des limites de parcelles bâties dans le modèle sur les écoulements..	19
Figure 7 : Représentation des ouvrages de passage dans le modèle et influence sur la continuité des écoulements.....	20
Figure 8 : Intégration de cours d'eau busé dans le modèle - exemple du Gué Robert.....	21
Figure 9 : Confrontation des résultats de la modélisation de la pluie de référence avec les points de retour d'expérience de Nantes-Métropole (exemple sur Saint-Sébastien-sur-Loire) .....	23
Figure 10 : Confrontation des résultats de la modélisation de la pluie de référence avec les emprises de retour d'expérience de Nantes-Métropole (exemple sur Saint-Aignan de Grand Lieu) .....	24
Figure 11 : Comparaison des emprises inondables sur la Chézine issues de l'« Etude hydraulique complémentaire du ruisseau de la Chézine » réalisée par EGIS Eau en 2011 et du modèle hydraulique construit dans le cadre de la présente étude.....	25
Figure 12 : Comparaison entre les emprises inondables sur le Pré Poulain issues de l'« Etude hydraulique du ruisseau du Pré Poulain » réalisée par SOGREAH en 2003 (en marron), du modèle hydraulique construit dans le cadre de la présente étude (en bleu) et les zones inondées réellement constatées pendant les inondations du 24 décembre 2013 .....	26
Figure 13 Comparaison entre les emprises de la pluie 4h_15min (rouge), juillet 2013 – 100 ans (vert) et décembre 2013 – 100 ans (bleu), résultats non filtrés .....	29
Figure 14 : Possibilités de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (source : DDT Vaucluse) .....	31
Figure 15 : Photos d'inondations du 24 décembre 2013 à Thouaré-sur-Loire (à gauche) et du 7 juin 2013 à Carquefou (à droite) .....	32
Figure 16 : Photos des inondations du 24 décembre 2013 (avant/après) rue de Nantes à Thouaré-sur-Loire.....	33

Figure 17 : Grille d'aléa fonctionnel .....	34
Figure 18 : Vue de la carte d'aléa sans les zones d'écoulement naturel secondaire (à gauche) et avec (à droite).....	35
Figure 19 : Emprises de référence retenues pour les principaux cours d'eau et l'ensemble du territoire de Nantes-Métropole .....	36
Figure 20 Vue de l'aléa de référence fonctionnel .....	37
Figure 21 Distribution globale des zones inondables par source.....	38
Figure 22 Distribution des zones inondables par classe d'aléa au sein des zones inondables hors emprises officielles PPRi et AZI .....	39
Figure 23 Cartographies des zones inondables d'occurrence centennale à l'échelle de Nantes Métropole au 1/37 000e .....	40
Figure 24 Cartographie des zones inondables d'occurrence centennale selon le type d'aléa à Bouaye, au 1/17 000e .....	41

## LISTES DES TABLES

---

Tableau 1 : Cumuls de pluie statistique pour les périodes de retour 10, 30 et 100 ans calculés avec les coefficients de Montana de la station Météo-France Nantes Bouguenais.....	12
Tableau 2 : Coefficients de ruissellement considérés dans le modèle pour les pertes par infiltration	14
Tableau 3 : Type d'occupation des sols et coefficients de rugosité .....	17
Tableau 4 : Classification des types de section des ouvrages de la base de données de Nantes-métropole.....	20

## INTRODUCTION

---

### 1.1 CONTEXTE DE LA MISSION

Nantes Métropole, dont l'action dans le domaine de la prévention des risques d'inondation vient en complément des études entreprises par l'État et visant à recenser le risque d'inondation par débordement de cours d'eau (PPRi, AZI et TRI), souhaite profiter de l'élaboration en cours du PLU intercommunal sur les 24 communes concernées pour améliorer la prise en compte du risque d'inondation et de la préservation des milieux aquatiques dans l'urbanisme et l'aménagement du territoire.

A cet effet, Nantes Métropole souhaite pouvoir disposer d'une délimitation exhaustive et complète des zones exposées à un risque d'inondation, à la fois par débordement de cours d'eau mais également par ruissellement des eaux pluviales. Cela sous-entend d'enrichir la connaissance actuellement partielle du risque d'inondation, en évaluant et cartographiant dans un premier temps les phénomènes de ruissellement sur tous les bassins versants alimentant le territoire de Nantes Métropole, et en venant ensuite en ajouter les résultats aux zonages inondations existants (PPRi, AZI, TRI, études hydrauliques locales, etc.).

Au travers de cette mission, Nantes Métropole souhaite donc uniformiser sa base de connaissance sur les risques d'inondation de son territoire, comprendre le fonctionnement hydraulique de chacun des bassins versants identifiés et produire **une emprise unique et complète des zones inondables**.

Sur les secteurs urbanisés ou à urbaniser dans le futur, fortement vulnérables du fait de la densité d'enjeux présents (humains, économiques ou environnementaux), les zones inondables devront être discriminées selon différents niveaux d'aléa qui permettront de les hiérarchiser en fonction de la gravité du risque encouru et de la nature de ce risque (production, écoulement ou accumulation).

Enfin, Nantes Métropole souhaite exploiter ce zonage d'aléa pour définir dans le futur règlement du PLU métropolitain des prescriptions adaptées au degré d'exposition des différents secteurs à risque et aux phénomènes rencontrés.

La présente mission, confiée à Prolog Ingénierie en janvier 2016, se décompose en 4 phases successives :

- ↳ une première phase (PHASE 1), consacrée à la collecte, l'analyse et la mise en forme de l'ensemble des données liées aux inondations par débordement de cours d'eau et par ruissellement sur le territoire de Nantes Métropole (zonages inondation existants, études antérieures, localisation des désordres, etc.). **Cette phase a été finalisée en mars 2016 ;**
- ↳ **une seconde phase (PHASE 2)**, dédiée à la modélisation des phénomènes d'inondation sur les versants, les petits talwegs et les cours d'eau permanents et non permanents non couverts par des procédures existantes. A l'issue de cette phase, Nantes Métropole disposera d'une délimitation globale et unique des zones inondables par débordement et par ruissellement à l'échelle du territoire d'étude, en couplant les résultats de modélisation aux zonages inondation existants (PPRi, AZI, TRI et études locales) ;

- ↳ **la troisième phase (PHASE 3)** vise, au niveau des secteurs urbanisés et à urbaniser, à associer à ces zones inondables un niveau d'aléa permettant de qualifier la gravité et la nature des mécanismes d'inondation (en distinguant les zones de production, d'accumulation et d'écoulement). Les zones de production seront également prioritaires en fonction des enjeux qu'elles contribuent à alimenter directement ;
- ↳ enfin, une quatrième et dernière phase (PHASE 4), consacrée au croisement aléas-enjeux et à une réflexion sur les objectifs de prévention et prescriptions qui pourront être associés à chacune de ces zones à risque dans le cadre du futur règlement du PLU métropolitain.

**Le présent rapport traite des phases 2 et 3 de l'étude qui ont été réalisées en parallèle. Il a été remis dans une première version en juillet 2016. La présente version constitue une actualisation réalisée dans le cadre du marché complémentaire notifié à Prolog Ingénierie en janvier 2018. Elle intègre la mise à jour de la modélisation sur le secteur du Pré-Gauchet et la modification de la grille d'aléa retenue, en distinguant notamment au sein de la classe écoulement deux sous classes en écoulement faible et écoulement moyen.**

## 1.2 OBJECTIFS DES PHASES 2 ET 3 DE « CARACTERISATION DES ECOULEMENTS, DEFINITION ET CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES ET DE L'ALEA FONCTIONNEL »

Les objectifs des phases 2 et 3 de l'étude se confondent puisqu'elles visent à caractériser l'ensemble des zones inondables par débordement de cours d'eau et par ruissellement à l'échelle du territoire de Nantes Métropole, tant en termes d'emprises que de niveaux de risque ou niveaux d'aléa.

La phase 1 de l'étude a démontré que Nantes Métropole dispose déjà d'une connaissance partielle de ces zones inondées le long des principaux cours d'eau du territoire (la Loire, l'Erdre et la Sèvre Nantaise notamment) au travers des emprises officielles issues des procédures PPRi, TRI et AZI. La volonté de Nantes Métropole d'étendre cette connaissance à l'ensemble du territoire et aux phénomènes de ruissellement implique donc la mise en œuvre d'une modélisation hydraulique des écoulements sur ce-dit territoire permettant :

- ↳ une meilleure compréhension du fonctionnement hydraulique des versants, des axes d'écoulements, de la répartition des débits ruisselés entre ces différents axes pour des périodes de retour de 10, 30 et 100 ans ;
- ↳ la définition et la cartographie des zones inondables par débordement de cours d'eau et ruissellement pluvial pour un événement de référence centennal ;
- ↳ la caractérisation et la cartographie d'un aléa fonctionnel par débordement de cours d'eau et ruissellement pluvial pour un événement de référence centennal.

L'objectif final de Nantes Métropole à travers ce travail est bien de disposer à terme d'une unique emprise des zones inondables englobant les emprises existantes et les résultats de la modélisation ruissellement mise en place dans la présente étude et d'être capable de caractériser l'aléa sur l'ensemble de cette zone. C'est en effet cette couche d'aléa globale qui sera ensuite croisée avec les enjeux du PLUm (zones urbanisées, à urbaniser, naturelles ou agricoles) pour construire le zonage réglementaire.

### 1.3 STRUCTURATION DU RAPPORT

Le présent rapport se décompose de la manière suivante :

- ✚ un premier chapitre introductif rappelant le contexte et les objectifs globaux et ciblés de l'étude, ainsi que synthétisant son contenu ;
- ✚ un second chapitre présentant le modèle hydraulique bidimensionnel construit pour caractériser les écoulements sur le secteur d'étude et les hypothèses hydrologiques retenues ;
- ✚ enfin, un dernier chapitre faisant l'analyse des résultats obtenus, présentant la grille de l'aléa fonctionnel de référence retenue et décrivant la construction de l'emprise unique finale des zones inondables sur le territoire de Nantes Métropole.

### 1.4 SYNTHÈSE

Les phases 2 et 3 de la présente étude ont permis de caractériser l'ensemble des zones inondables par débordement de cours d'eau et par ruissellement sur le territoire de Nantes Métropole en termes d'emprise d'une part, et de niveaux de risque ou niveaux d'aléa d'autre part.

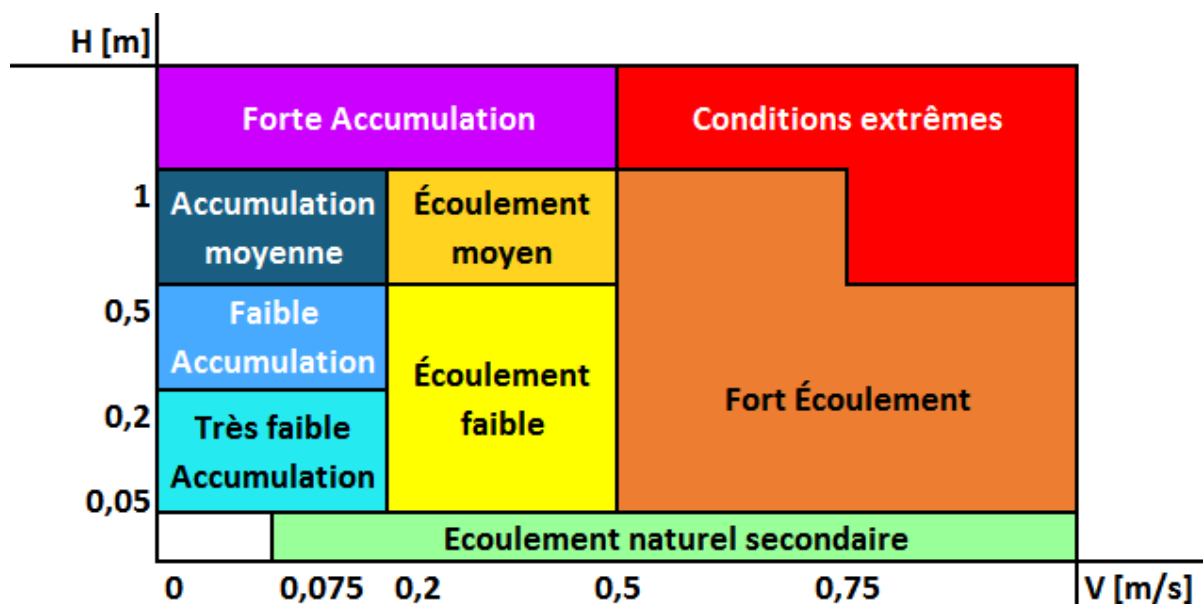
Pour cela, un modèle hydraulique bidimensionnel (2D) a été construit sur l'intégralité de la zone d'étude. Ce modèle tient compte de la topographie, de la rugosité des sols et des obstacles présents sur le territoire (remblais, ponts, bâti, etc.). Il permet ainsi de caractériser les phénomènes de ruissellement sur l'ensemble des versants, petits talwegs et les débordements des cours d'eau secondaires permanents et non permanents du territoire de Nantes Métropole.

Le modèle construit a été validé de manière qualitative sur la base de différentes sources de données disponibles (retours d'expérience d'inondations, remarques et témoignages fournis par Nantes Métropole et les communes de l'agglomération, emprises issues de modélisations d'études antérieures) afin de s'assurer de sa capacité à reproduire correctement les zones historiquement inondées. La comparaison entre les données transmises et les résultats de modélisation ont montré que le modèle reproduit correctement le fonctionnement hydraulique du territoire étudié.

Le modèle ainsi construit a permis de simuler la pluie de référence retenue, de période de retour centennale, dans un souci de cohérence avec les procédures PPRi et TRI existantes sur le territoire d'étude (la crue de référence des procédures PPRi est une crue centennale et la crue moyenne de l'étude TRI est de période de retour de l'ordre de 100 ans). Il a été décidé de retenir comme pluie de référence la pluie historique du 27 juillet 2013 mise à l'échelle centennale sur une durée de 1h, car elle permet de bien mettre en évidence les multiples axes de ruissellement qui se forment et présente l'avantage de s'appuyer sur une forme de pluie réelle.

La modélisation de la pluie de référence retenue permet d'accéder, en tout point du modèle, aux valeurs de hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement maximales. L'aléa de référence est produit à partir du croisement entre ces deux paramètres, croisement qui conditionne le risque sur une zone donnée. En effet, le même niveau d'aléa pourra être induit par de fortes hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulements faibles et par de faibles hauteurs d'eau mais des vitesses d'écoulements élevées.

La grille d'aléa retenue dans cette étude vise à qualifier le risque en termes de fonctionnement et conduit à un zonage du territoire en fonction des phénomènes prépondérants entre l'écoulement et l'accumulation. Des zones dites d'écoulement naturel secondaire ont également été identifiées. Elles permettent une meilleure compréhension de la génération des phénomènes de ruissellement en amont des versants et de la dynamique des écoulements en venant prolonger ou compléter le tracé de certains axes de ruissellement. La grille de définition de l'aléa fonctionnel retenue est la suivante.



Les secteurs du territoire qui ne sont ni zones d'accumulation, ni zones d'écoulement, ni zones de conditions extrêmes sont par définition des zones de production. Bien que n'étant pas directement exposées au risque inondation, ces zones peuvent alimenter en aval des secteurs qui eux seront touchés par les inondations. Le choix a été fait de distinguer ces zones en fonction de leur impact potentiel en termes d'aggravation des phénomènes de ruissellement et d'intégrer au zonage pluvial des règles différenciées selon le type de zone de production (en étant plus strict sur les zones de production à fort impact potentiel).

Enfin, une emprise unique des zones inondables sur le territoire de Nantes Métropole pour une occurrence centennale et pour les phénomènes de débordement de cours d'eau et de ruissellement a été construite en compilant les résultats du modèle et les emprises inondées existantes par ailleurs. Sur les cours d'eau principaux, les emprises officielles connues (PPRi et AZI) ont été retenues comme référence sur la cartographie finale de délimitation des zones inondables de Nantes Métropole. Concernant les secteurs couverts par des études locales, il s'est avéré que les résultats de simulation du modèle étaient plus précis que ceux des études antérieures. Le choix a donc été fait de retenir les résultats de simulation du modèle construit dans le cadre de cette étude comme emprise de référence sur ces secteurs.



## 2 CONSTRUCTION DU MODELE HYDRAULIQUE DE RUISSELLEMENT

Le logiciel utilisé pour construire le modèle hydrologique et hydraulique de Nantes Métropole est le logiciel ICM V6.5 développé par INNOVYZE. Ce logiciel résout les équations de Barré de Saint-Venant en régime transitoire dans leur version bidimensionnelle et peut intégrer tout type d'ouvrages et de singularités hydrauliques.

### 2.1 APPROCHE METHODOLOGIQUE GLOBALE

Il est important de rappeler ici la spécificité des phénomènes de ruissellement, qui se forment par concentration des eaux de pluie tombant sur des surfaces plus ou moins perméables, et évoluent en fonction de la topographie pour former des zones d'écoulement, présentant des vitesses importantes, ou au contraire des zones d'accumulation, dans les points bas topographiques ou en arrière d'obstacles artificiels (remblais routiers et ferrés notamment).

Pour caractériser les phénomènes de ruissellement sur le territoire de Nantes Métropole, un modèle numérique a donc été construit. Il a pour objectif de représenter le phénomène naturel et aléatoire de transformation de la pluie tombant au sol en écoulement à la surface du terrain. Ce modèle numérique calcule les écoulements qui vont être engendrés par une pluie brute appliquée à l'ensemble du territoire. Ce calcul se fait alors en deux étapes :

- ↳ tout d'abord, un modèle hydrologique calcule le volume d'eau « disponible » pour le ruissellement à partir d'un certain volume de précipitations brutes (pluie brute). C'est ce qu'on appelle la transformation pluie-ruissellement. Il s'agit d'estimer en fonction de la nature des sols la part de l'eau de pluie qui va pouvoir s'infiltrer et la part de la pluie qui va engendrer et participer au ruissellement ;
- ↳ un modèle hydraulique calcule ensuite la manière dont ce volume d'eau va s'écouler à la surface du terrain naturel en fonction de la topographie et des différents obstacles rencontrés notamment.

Figure 1 – Le principe de la méthode mise en œuvre pour évaluer les phénomènes de ruissellement

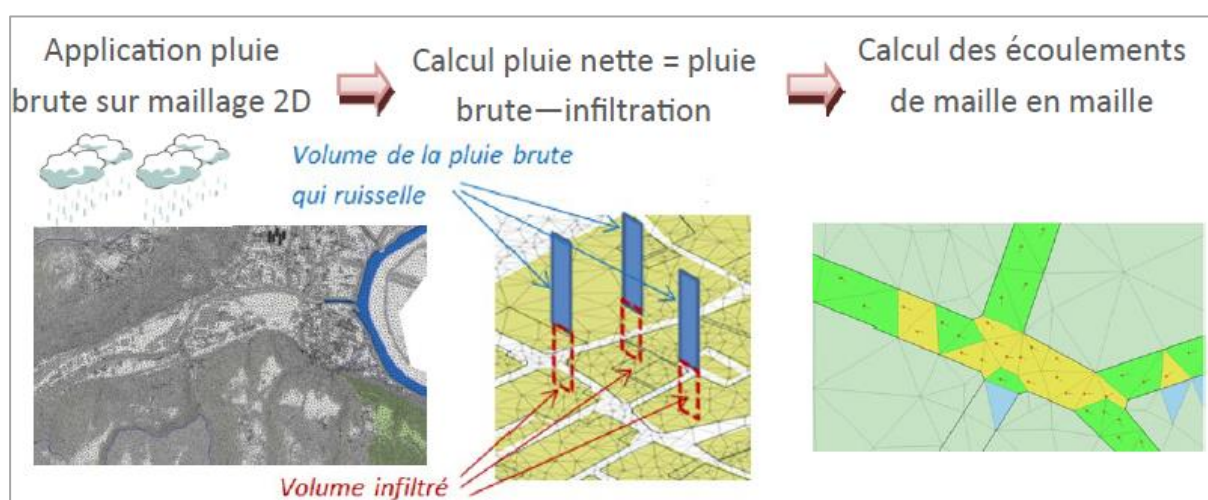
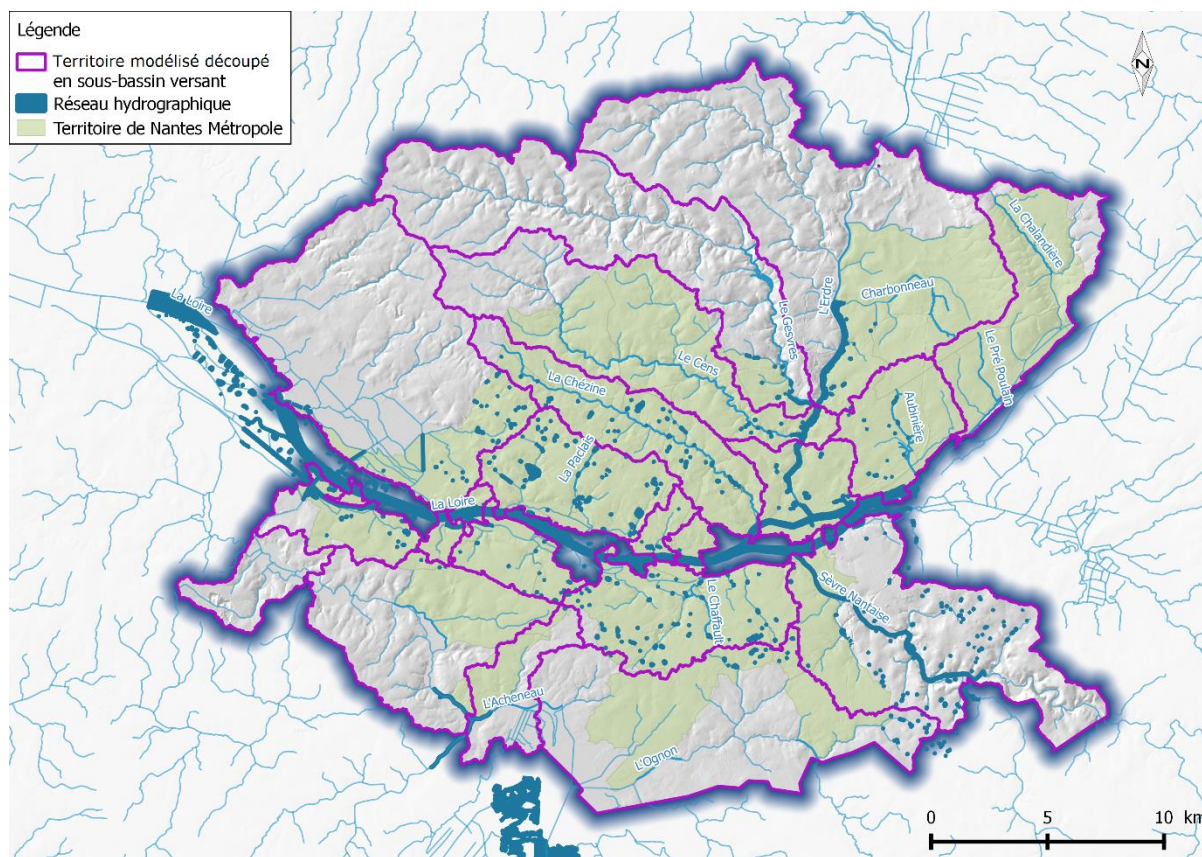


Figure 2 : Territoire modélisé



## 2.2 MODELISATION HYDROLOGIQUE

La première étape de la caractérisation des phénomènes de ruissellement est donc la représentation fidèle de la transformation de la pluie tombée (pluie brute) en volume d'eau qui va ruisseler, en évaluant correctement les pertes, c'est à dire le volume d'eau qui ne participera pas au ruissellement (la part de pluie qui est retenue par exemple par la végétation, ou qui va s'infiltrer dans les sols).

Le modèle de transformation pluie-ruissellement utilisé s'appuie sur trois composantes :

- ↗ **une pluie réelle observée ou une pluie de projet** qui est une représentation simplifiée du phénomène pluvieux à l'origine de la formation des phénomènes de ruissellement ;
- ↗ **une fonction d'infiltration** qui permet de définir sur chaque maille de calcul les pertes par infiltration (c'est à dire la part d'eau précipitée perdue, qui ne va donc pas ruisseler) en fonction de l'occupation des sols ;
- ↗ **les conditions de saturation des sols** au début de l'événement qui sont dictées par les conditions pluvieuses antécédentes et qui influent sur la capacité d'infiltration des sols.

### 2.2.1 Caractérisation des pluies

La première étape consiste donc à retenir une pluie de référence en accord avec l'objectif de Nantes Métropole de caractériser l'ensemble des zones inondées par un épisode pluvieux de période de retour 100 ans. Le choix de cette période de retour centennale vise à une cohérence globale des résultats de la modélisation avec la crue de référence des procédures PPRi (crue centennale) et la crue moyenne de l'étude TRI (crue de période de retour de l'ordre de 100 ans). Par ailleurs l'ensemble des experts ainsi que les références réglementaires s'accordent pour retenir la référence centennale pour la prise en compte du risque inondation dans l'urbanisme (directive inondation, loi Barnier de 1995, CEPRI...).

Il est donc nécessaire de retenir une pluie de référence d'occurrence centennale mais se posent alors deux questions :

- ↳ sur quelle durée de pluie le cumul des précipitations sera-t-il centennal ?
- ↳ quelle forme et dynamique de pluie retenir entre une pluie courte et très intense de type orage estival ou une pluie longue et soutenue que l'on rencontre habituellement en hiver ?

Il s'agit de s'interroger ici sur les types de pluies représentatives du régime des précipitations locales et susceptibles de provoquer une réponse intense des différents bassins versants. Afin de pouvoir analyser l'influence de ces différents paramètres sur l'emprise des inondations simulées, plusieurs pluies d'occurrence centennale ont donc été testées :

- ↳ des pluies de projets théoriques :
  - une pluie estivale double triangle de durée totale 4 h et de durée intense 15 min ;
  - une pluie estivale double triangle de durée totale 4 h et de durée intense 30 min ;
  - une pluie hivernale double rectangle constante de durée totale 24 h ;
  - une pluie hivernale double triangle de durée total 12 h et de durée intense 6 h ;
- ↳ des pluies de projets construites à partir d'une pluie réelle observée sur le territoire :
  - une pluie estivale construite à partir de l'événement historique du 27 juillet 2013 mis à l'échelle afin d'obtenir un cumul de pluie centennal sur 1 heure ;
  - une pluie hivernale construite à partir de l'événement historique du 24 décembre 2013 mis à l'échelle afin d'obtenir un cumul de pluie centennal sur 24 h.

A noter que ces deux pluies historiques ont entraîné des dégâts et des inondations sur le territoire de Nantes Métropole alors qu'elles présentaient respectivement une période de retour de 30 ans sur 1 heure au Pellerin (station de Jaunaie) et une période de retour comprise entre 5 et 10 ans sur 24 h à la station des Dervallières, mais avec comme facteur aggravant l'état de saturation des sols en eau très important suite à la pluviosité des jours précédant le 24 décembre.

Les 6 pluies construites sont représentées sur les figures ci-après. Les différentes pluies simulées ont été construites sur la base des cumuls de pluie statistiques obtenus à partir des coefficients de Montana de la station Météo-France de Nantes Bouguenais.

Tableau 1 : Cumuls de pluie statistique pour les périodes de retour 10, 30 et 100 ans calculés avec les coefficients de Montana de la station Météo-France Nantes Bouguenais

Durée	T = 10 ans		T = 30 ans		T = 100 ans	
	Coef Montana	Cumuls (mm)	Coef Montana	Cumuls (mm)	Coef Montana	Cumuls (mm)
15 min	a = 4.213 b = 0.53	15	a = 5.908 b = 0.54	20.5	a = 8.538 b = 0.557	28.3
30 min		20.8		28.2		38.5
1 h		28.9		38.8		52.4
4h	a = 12.213 b = 0.793	38	a = 21.76 b = 0.843	51.4	a = 41.292 b = 0.899	71.5
6 h		41.3		54.8		74.8
12h		47.7		61.1		80.3
24 h		55		68.2		86.1
48 h	a = 5.338 b = 0.676	70.5	a = 8.283 b = 0.71	83.4	a = 13.323 b = 0.748	99.2



### 2.2.2 Passage de la pluie brute à la lame d'eau ruisselée

Les différentes pluies simulées ont été appliquées directement sur un maillage de calcul bidimensionnel (2D), construit sur la base de la topographie réelle du terrain (Modèle Numérique de Terrain datant de 2005 de 1 m de résolution de Nantes Métropole).

Le calcul des **pertes par infiltration** est alors effectué au niveau de chaque maille de calcul, en fonction de l'occupation du sol majoritaire sur la surface de cette maille. L'occupation du sol sur chaque maille a été déterminée à partir de la base de données BD Ortho 2012, de la BD Corinne Land Cover et de la BD Occupation du sol de Nantes Métropole.

Le modèle hydrologique utilisé pour modéliser ces pertes par infiltration est dit à coefficient de ruissellement constant, différencié selon le type de sol rencontré. Ce coefficient caractérise la part de pluie tombée ruisselant effectivement (par exemple, un coefficient de 0,8 signifie que l'on considère que 80% du volume de la pluie tombée va ruisseler, ou que 20% du volume de la pluie tombée va s'infiltrer). Les coefficients de ruissellement appliqué au maillage 2D sont les suivants.

Tableau 2 : Coefficients de ruissellement considérés dans le modèle pour les pertes par infiltration

Type de sol	Coefficient de ruissellement
Urbain	0.4
Transport	0.8
Forêt/Culture	0.2
Jardins/ Prairies	0.25
Urbain non bâti	0.35

Les valeurs des coefficients de ruissellement retenues ont été définies en fonction de l'occupation du sol mais également des **conditions antécédentes de saturation des sols** (sèches dans le cas de la pluie historique de juillet 2013 et donc définies comme telles pour la modélisation de la pluie de référence centennale).

A noter que :

- ✚ **les pertes par évapotranspiration** sont quant à elles négligées compte-tenu de la durée limitée des pluies simulées ;
- ✚ **l'influence des réseaux d'évacuation des eaux pluviales** sur la lame d'eau ruisselée a également été négligée. La capacité de ces réseaux étant nettement inférieure aux apports induits par la pluie de référence centennale, ils ont été considérés comme transparents dans les calculs car rapidement saturés.

## 2.3 MODELISATION HYDRAULIQUE DES ECOULEMENTS

Le modèle hydraulique construit est un modèle bidimensionnel (2D). Il couvre l'intégralité de la zone d'étude et permet ainsi de caractériser les phénomènes de **ruissellement** sur l'ensemble des versants, petits talwegs et les **débordements des cours d'eau permanents et non permanents** du territoire de Nantes-Métropole. Le module bidimensionnel du logiciel ICM s'appuie sur un système de maillage du territoire. Chaque maille est un élément de calcul qui représente la topographie et prend en compte la rugosité des sols, c'est-à-dire leur capacité à freiner les écoulements ou à les accélérer au contraire. La forme du maillage est également influencée par les obstacles que l'on retrouve sur les versants et au sein des secteurs urbanisés (remblais, ouvrages, ponts, etc.).

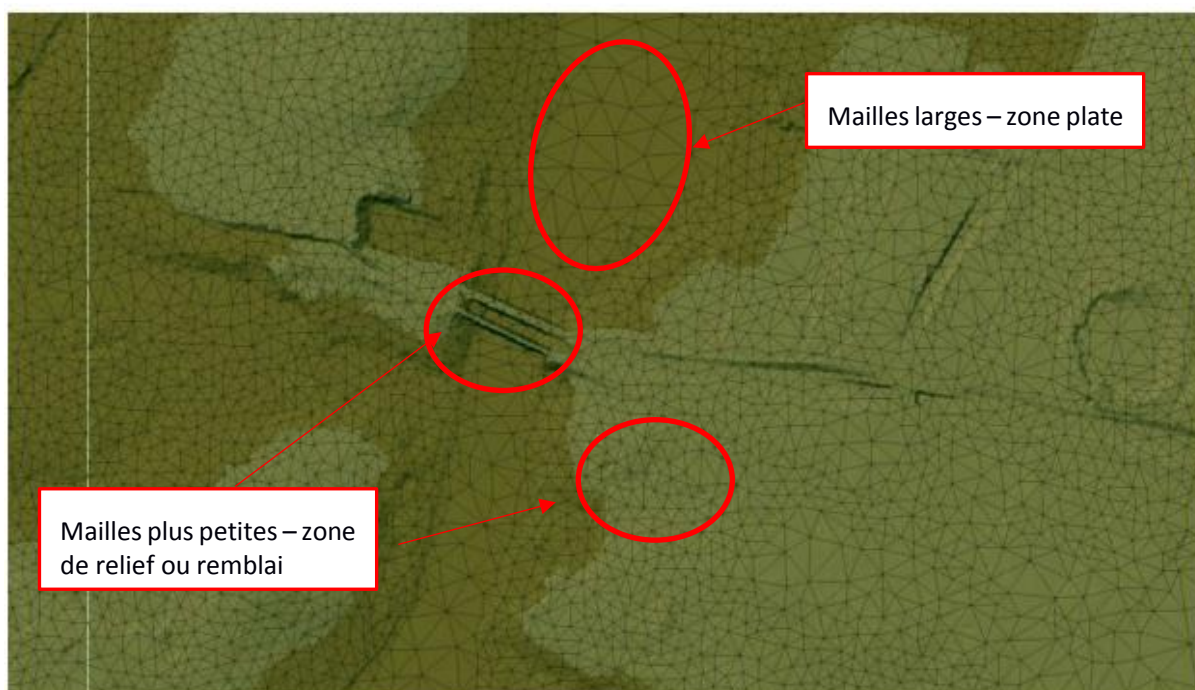
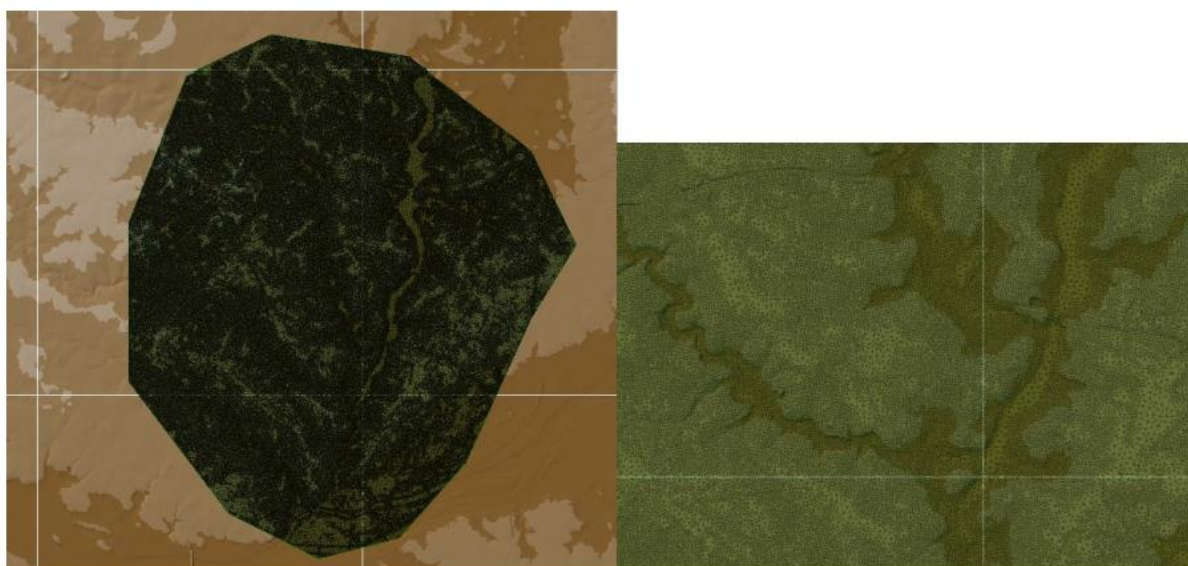
La méthodologie de construction de ce modèle est décrite pas à pas dans les paragraphes ci-après.

### 2.3.1 Prise en compte de la topographie

Le premier élément de façonnage du maillage est la topographie du secteur d'étude qui caractérise le relief, les pentes et obstacles du territoire. Le maillage de calcul bidimensionnel du modèle hydraulique est directement construit à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de Nantes Métropole, datant de 2005 et de résolution 1 m.

Le maillage s'adapte automatiquement aux formes du terrain et la taille des mailles s'affine lorsque l'altimétrie du terrain varie de manière importante : ainsi, les mailles sont grandes lorsque le terrain est peu accidenté ; à l'inverse, leur taille est réduite dès qu'un obstacle apparaît (remblai, talus...).

Figure 3 : Maillage de calcul bidimensionnel et adaptation de la taille des mailles en fonction du relief



### 2.3.2 Prise en compte de la rugosité des sols

La dynamique d'écoulement sur une parcelle agricole, dans une zone de forêt ou sur une voirie est différente, les phénomènes de frottement n'étant pas les mêmes : une voirie, lisse, favorise l'écoulement, quand des espaces boisés les freinent.

Afin d'obtenir une bonne représentation des phénomènes de ruissellement, il est donc important de sectoriser le périmètre d'étude en zones d'écoulement dont le coefficient de rugosité est adapté au type d'occupation du sol.



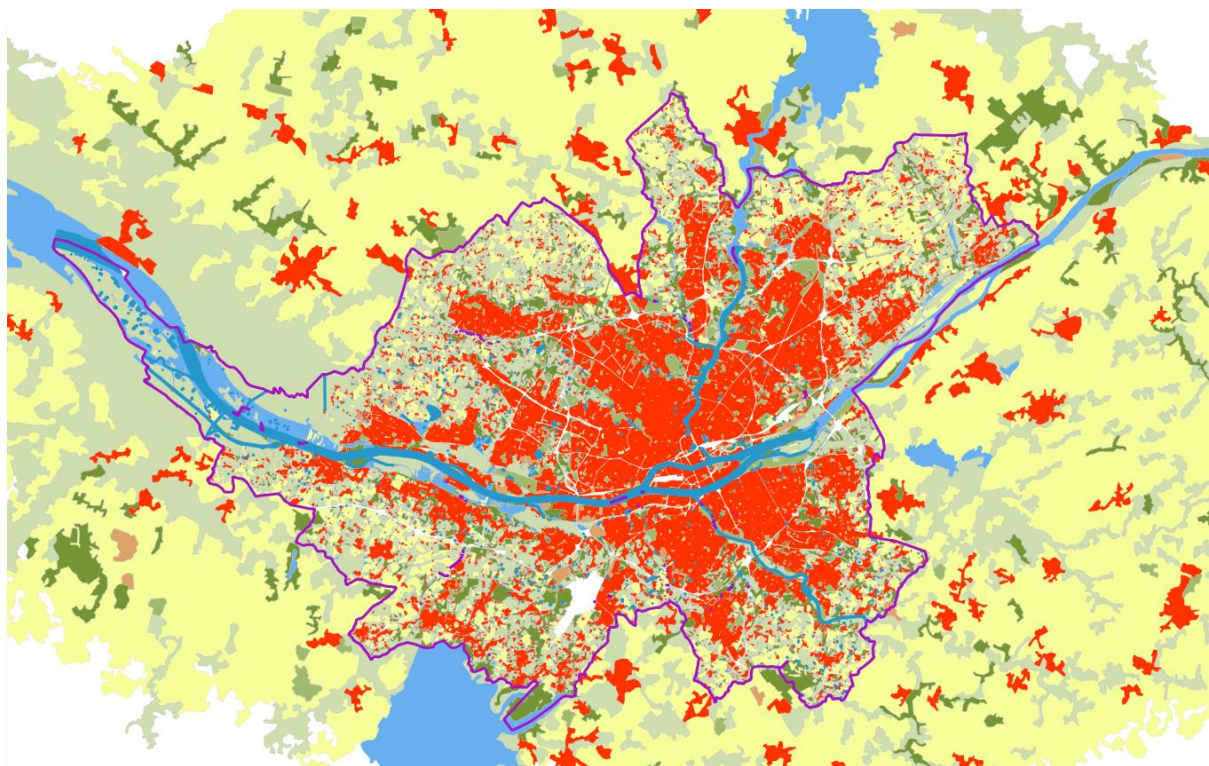
L'occupation du sol sur chaque parcelle a été déterminée à partir de la base de données BD Ortho 2012, de la BD Corinne Land Cover et de la BD Occupation du sol de Nantes Métropole. Les valeurs de rugosité (coefficients de Strickler) retenues sont conformes aux données de la littérature et permettent de bien distinguer des grands types de couverture du sol.

Tableau 3 : Type d'occupation des sols et coefficients de rugosité

Type de sol	Rugosité (coefficient de Strickler en $m^{1/3}/s$ )
Urbain	15
Espaces ouverts	14
Espaces verts urbains	12.5
Prairies	12
Agricole	30
Espaces boisés	11
Eaux	50

La figure ci-après représente l'occupation du sol sur le territoire de Nantes Métropole en fonction des catégories présentées précédemment.

Figure 4 : Occupation du sol sur le territoire d'étude



Chaque maille de calcul s'est donc vue affecter une valeur de rugosité en fonction du type d'occupation du sol majoritaire sur sa surface.

### 2.3.3 Prise en compte de l'effet d'obstacle du bâti

Cette étape a pour but d'intégrer les limites de parcelles bâties en tant que murs « poreux » dans le modèle. Par « poreux », on entend que l'on souhaite intégrer l'effet bloquant du mur, tout en laissant néanmoins passer une fraction des eaux, les murs et clôtures n'étant pas continus le plus souvent.

Cette étape vise donc à :

- ↗ prendre en compte l'effet de blocage des bâtiments dans les zones urbanisées;
- ↗ affiner le maillage de calcul dans les zones à enjeux en utilisant les limites de parcelles bâties comme élément de forçage de celui-ci.

*Figure 5 : Forçage du maillage du fait de l'intégration des limites de parcelles bâties en tant que murs poreux*



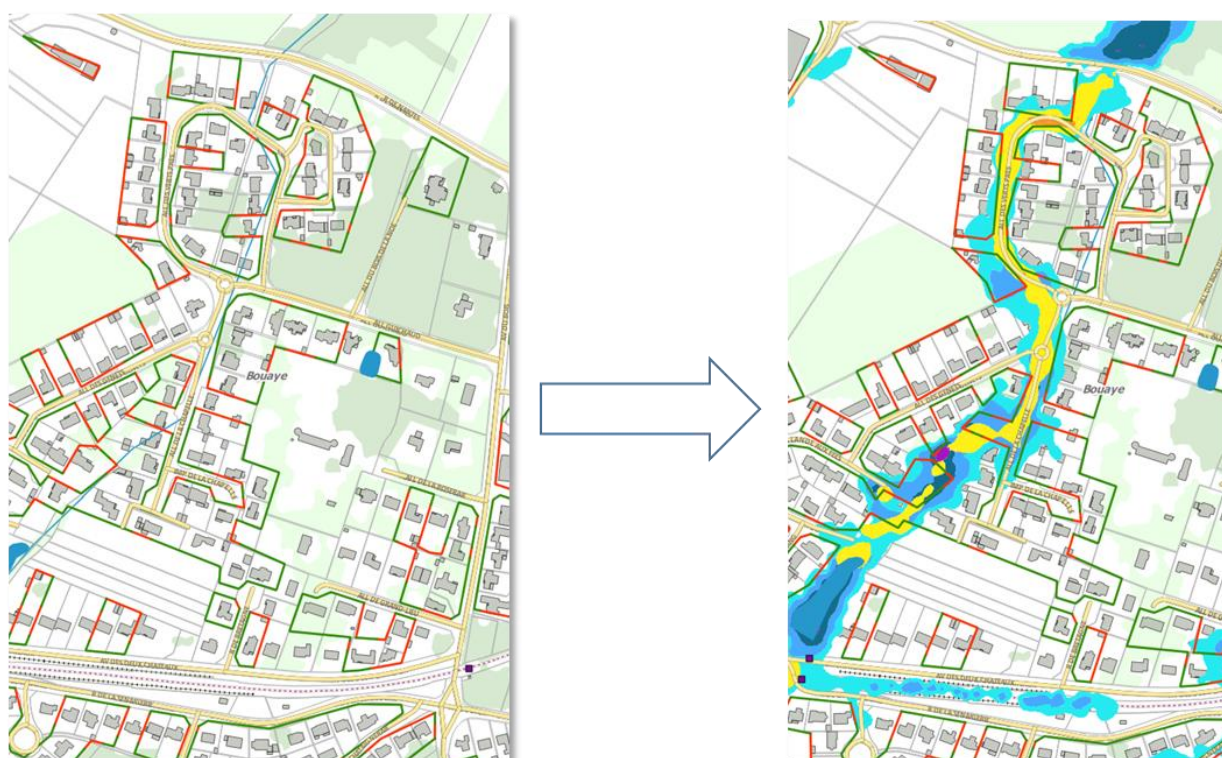
A noter qu'il n'est pas possible d'intégrer les bâtiments du cadastre directement comme des obstacles aux écoulements car la multiplicité des formes, la densité bâtie sur certains secteurs et la superficie importante du territoire d'étude auraient conduit à créer de nombreuses mailles de calcul de petites dimensions, allongeant ainsi considérablement le temps de calcul.

Au vu de l'échelle de la présente étude, il a donc été décidé d'utiliser les limites de parcelles bâties plutôt que le bâti lui-même comme éléments de forçage du maillage et comme obstacles aux écoulements (sous la forme de mur poreux c'est à dire laissant passer un certain pourcentage du débit entrant pour ne pas surestimer l'effet de blocage, ce qui est réaliste car l'eau arrive toujours à s'infiltrer dans les bâtiments par des interstices ou autres points de passage).

Cette approche se justifie par le fait que, dans le centre-ville, les limites de parcelles se confondent souvent avec les limites du bâti et, en dehors des centres urbains, les parcelles bâties sont souvent entourées de clôtures ou de haies qui ont, en situation d'inondation, un impact important sur les écoulements.

L'intégration des limites de parcelles bâties dans le modèle permet de représenter au mieux la dynamique des écoulements. Cette approche permet en effet de bien représenter les effets de concentration des écoulements dans les rues, au niveau des voiries, tout en autorisant le passage de l'eau dans les parcelles bâties pour ne pas surestimer les hauteurs de submersion.

Figure 6 : Effet de l'intégration des limites de parcelles bâties dans le modèle sur les écoulements



L'image précédente présente les résultats de la modélisation de la pluie de référence centennale au niveau de l'allée de la Chapelle à Bouaye. Sur cette image, on observe bien les écoulements canalisés dans les rues. Les murs poreux représentant les îlots bâtis dévient bien les eaux de ruissellement sans toutefois empêcher complètement leur écoulement sur les parcelles, ce qui correspond à une représentation réaliste des phénomènes en milieu urbanisé.

#### 2.3.4 Intégration des ouvrages de passage et de vidange

Les **ouvrages de passage** (ponts, trémies, etc...) ont été également intégrés dans le modèle pour représenter correctement le fonctionnement hydraulique du secteur d'étude et éviter les zones d'accumulation artificielles. En effet, le Modèle Numérique de Terrain de Nantes Métropole est issu d'un levé aérien (LIDAR), il ne prend donc pas en compte les points de passage sous remblais, souterrains.

Ces points de passage sous remblai routier ou SNCF ont systématiquement été identifiés à partir de la base de données d'ouvrages transmise par Nantes Métropole (essentiellement la couche SIG des ouvrages d'art), complétée par une analyse du territoire sur la base d'un croisement entre les cours d'eau, les voiries et les voies ferrées. **Au total, environ 1 000 ouvrages ont ainsi été intégrés dans le modèle hydraulique.**

Les points de passage intégrés au modèle ont été représentés de manière schématique par un gabarit type en cohérence avec la classification des types de section de Nantes-Métropole.

Tableau 4 : Classification des types de section des ouvrages de la base de données de Nantes-métropole

Type de section	Description
T1	Ponts $\geq 10\text{m}$ , ponts provisoires, buses métalliques, tunnels et trémies, murs $h \geq 5\text{m}$ , ouvrages non courants
T2	Ponts / ponceaux $5\text{m} \geq \text{portée} \geq 10\text{m}$ , ouvrages avec constatation d'anomalies, sur structure porteuses
T3	Ponts / ponceaux / dalots $< 5\text{m}$ , murs soutènement $1\text{m} < h < 5\text{m}$
T4	Ouvrages de rives
T5	A déterminer types – propriétaires
T6	Ouvrages comblés, détruits
T7	Divers, escaliers...
T8	Busages, tuyaux béton

Ainsi, un ouvrage de passage situé en travers d'un remblai autoroutier se verra attribuer un gabarit plus important qu'une buse de passage sous un chemin rural. De plus, des dimensions plus fines ont été affectées aux ouvrages stratégiques signalés par Nantes-Métropole.

Figure 7 : Représentation des ouvrages de passage dans le modèle et influence sur la continuité des écoulements



**La vérification du bon fonctionnement de ces ouvrages dans le modèle a été effectuée de manière itérative** afin de s'assurer que la continuité hydraulique des axes de ruissellement de part et d'autre d'un obstacle était effectivement assurée, et de détecter d'éventuels ouvrages de passage manquants (ne figurant pas dans la base de données de Nantes-Métropole et n'ayant pas été détectés par l'analyse géographique).

Cette vérification s'est appuyée sur une analyse visuelle des résultats et sur les commentaires de Nantes Métropole. Certains ouvrages ont alors été ajustés que ce soit en termes de dimensions ou de positionnement.

Suite à cette vérification notamment, le choix a été fait, en concertation avec Nantes Métropole, d'intégrer les parties busées des cours d'eau listés ci-après dans le modèle :

- ↖ Gué Robert ;
- ↖ Gué Moreau ;
- ↖ Chézine ;
- ↖ Martelière ;
- ↖ Balinière ;
- ↖ Jaunaie.

Les cours d'eau busés intégrés ont été représentés par des conduites de sections équivalentes. Il s'agit ici de bien représenter la capacité d'évacuation, de drainage de ces réseaux pour ne pas surestimer les écoulements se produisant en surface.

*Figure 8 : Intégration de cours d'eau busé dans le modèle - exemple du Gué Robert*



## 2.4 VALIDATION DU MODELE

L'exploitation du modèle hydraulique ainsi construit pour simuler la pluie de référence nécessite qu'il soit au préalable validé afin de s'assurer de sa capacité à reproduire correctement les zones historiquement inondées. Une validation **qualitative** du modèle a donc été mise en place.

En effet, contrairement aux modèles exploités dans le cadre d'études classiques de débordement de cours d'eau, le calage du modèle global de Nantes Métropole est complexe, puisqu'il est très difficile de faire des comparaisons quantitatives entre les résultats de modélisation et des observations réelles pour les raisons suivantes :

- ↳ d'une part, il n'existe pas de mesures de débits, et très rarement de mesures de niveaux lors d'un épisode de ruissellement. De plus les retours d'expérience ou témoignages sont en général moins denses et moins fournis pour des épisodes de ruissellement que pour des phénomènes de débordement de cours d'eau ;
- ↳ d'autre part, l'événement simulé est « fictif », puisque la pluie est appliquée uniformément sur tout le bassin versant, pour faire ressortir tous les axes d'écoulement potentiels, alors qu'une pluie réelle est hétérogène à l'échelle du secteur d'étude ;
- ↳ enfin, il n'est dans tous les cas pas possible d'envisager un calage quantitatif du modèle compte tenu de l'étendue et de l'échelle de la zone modélisée (50 000 ha).

Plusieurs sources de données disponibles ont été utilisées pour la validation du modèle hydraulique construit :

- ↳ les retours d'expérience d'inondations à la date de mars 2016 (cf. phase 1 de l'étude) fournis par les différents pôles de proximité de Nantes Métropole, transmis sous la forme de points et d'emprises reconstituées ;
- ↳ les emprises issues des modélisations des études antérieures ;
- ↳ les remarques et témoignages transmis par Nantes Métropole et les communes de l'agglomération en cours d'étude via la plateforme cartographique de visualisation mise en place.

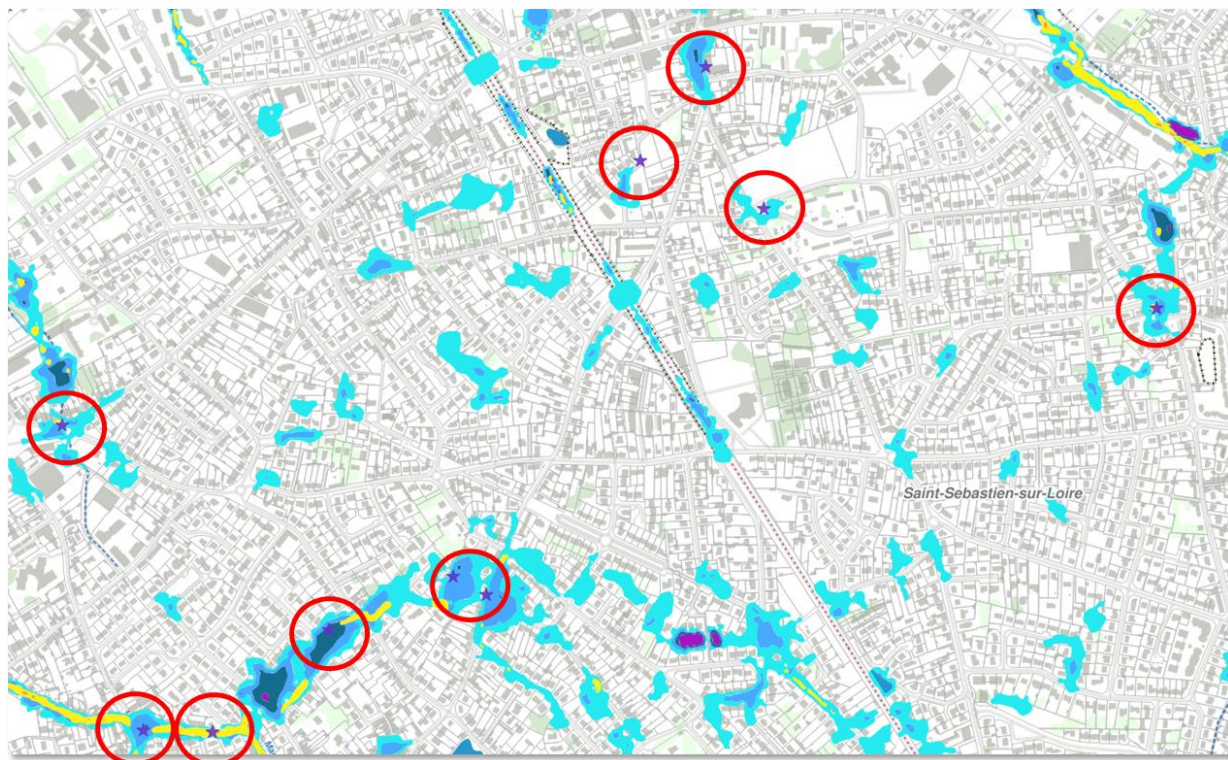
**Au total, sur les 149 points localisant des zones d'inondation identifiées par Nantes Métropole, 120 sont effectivement inclus ou touchés par les zones en eau issues de la modélisation de la pluie de référence centennale, soit 80% des points indiqués.**

Il faut néanmoins garder à l'esprit que la localisation de ces points de retour d'expérience n'est pas forcément précise puisque certains de ces points ont été construits dans l'idée d'identifier les zones à risques à l'échelle du quartier d'habitation ou d'une voirie mais pas à l'échelle de chaque bâtiment individuel.

De même, certains de ces témoignages d'inondation peuvent être liés à un dysfonctionnement des réseaux d'évacuation des eaux pluviales, non pris en compte dans le cadre de la présente étude.

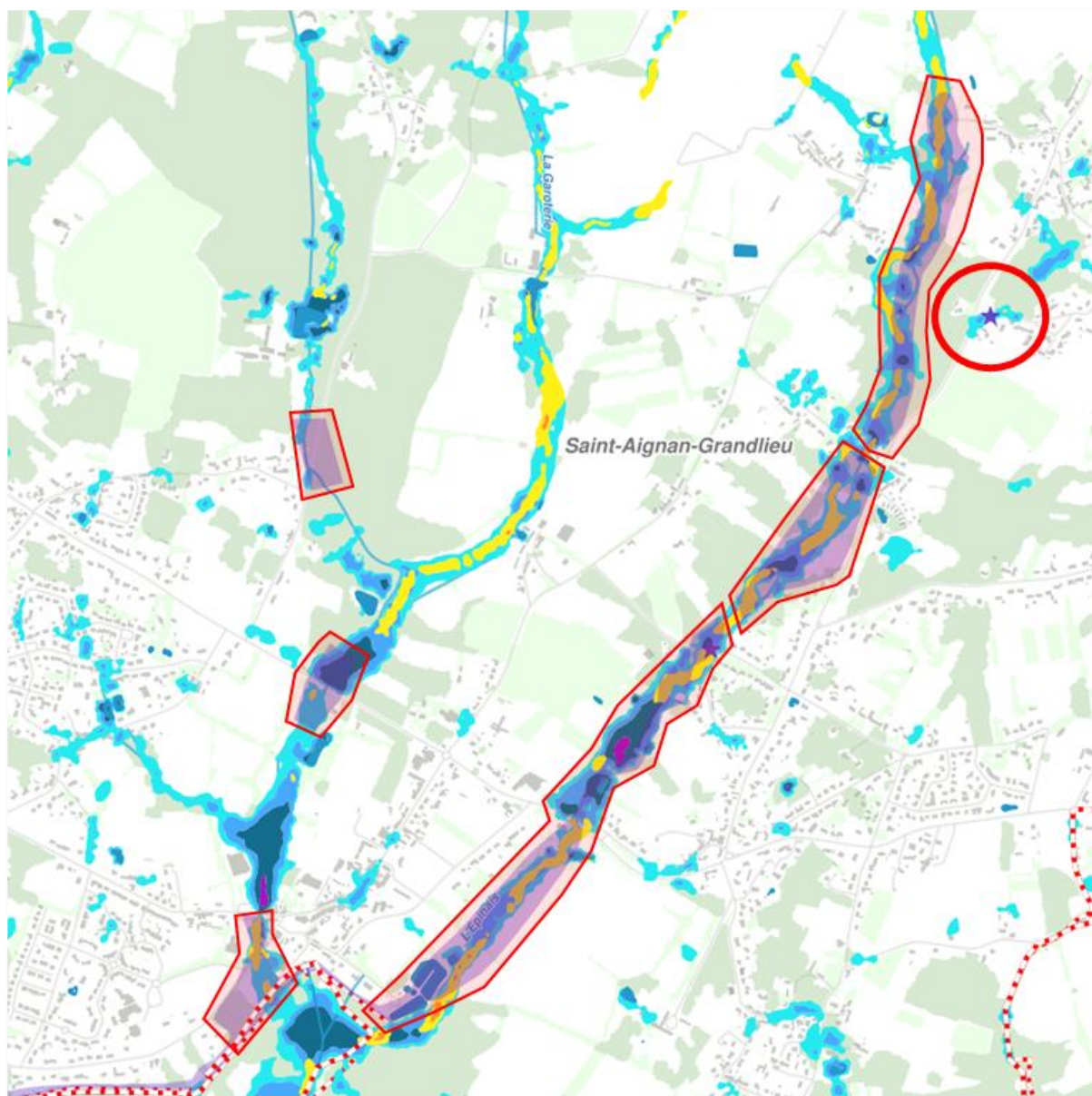
Ainsi, la confrontation entre les points de retour d'expérience des pôles de proximité et les résultats de modélisation est globalement très satisfaisante compte-tenu des incertitudes mentionnées ci-dessus.

Figure 9 : Confrontation des résultats de la modélisation de la pluie de référence avec les points de retour d'expérience de Nantes-Métropole (exemple sur Saint-Sébastien-sur-Loire)



De même, une vérification visuelle systématique montre que les différentes emprises inondées indiquées par les pôles de proximité de Nantes-Métropole sont correctement reproduites par la modélisation de la pluie de référence centennale (voir figure page suivante).

Figure 10 : Confrontation des résultats de la modélisation de la pluie de référence avec les emprises de retour d'expérience de Nantes-Métropole (exemple sur Saint-Aignan de Grand Lieu)



Les emprises inondées issues du modèle ont également été comparées aux emprises inondées issues des études antérieures réalisées sur le territoire de Nantes Métropole. Cette comparaison montre que les résultats du modèle en termes d'emprises sont cohérents avec celles issues des études antérieures et s'avèrent même être plus précis, du fait de l'utilisation de données topographiques plus fines. Sur le secteur du Pré Poulain notamment, les résultats obtenus sont plus cohérents avec les témoignages récoltés suite à l'événement de décembre 2013 que ceux issus de l'« Etude hydraulique du ruisseau du Pré Poulain » réalisée par SOGREAH en 2003.



Figure 11 : Comparaison des emprises inondables sur la Chézine issues de l'« Etude hydraulique complémentaire du ruisseau de la Chézine » réalisée par EGIS Eau en 2011 et du modèle hydraulique construit dans le cadre de la présente étude

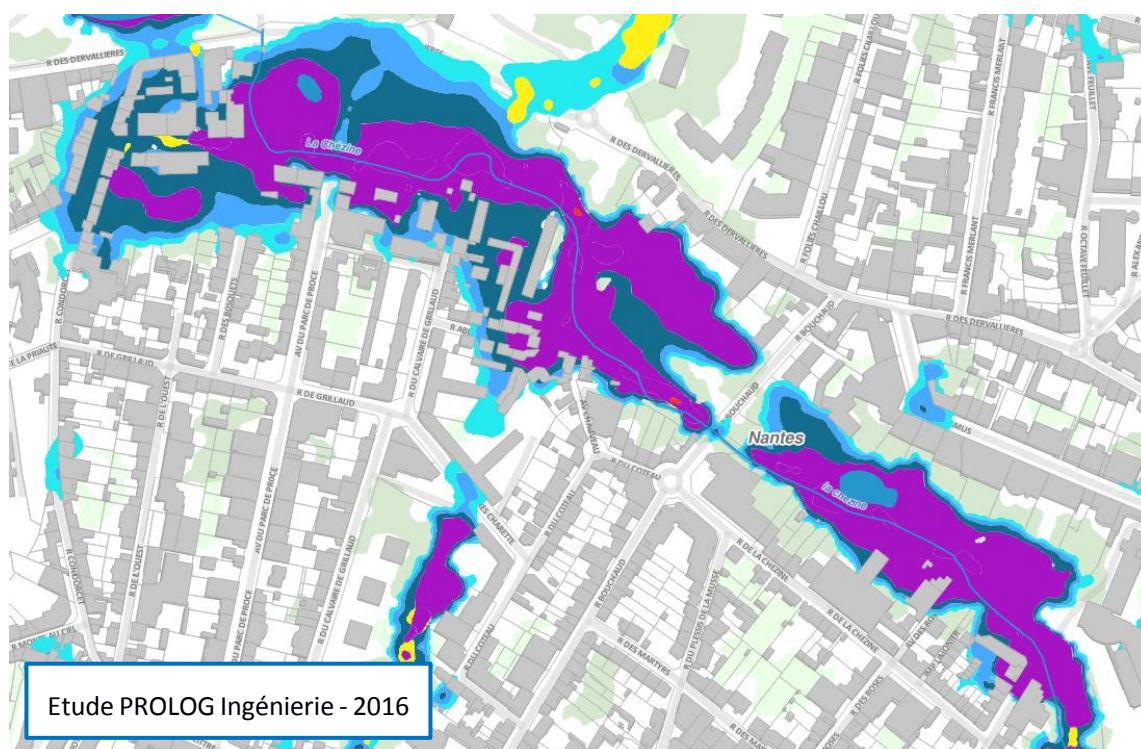
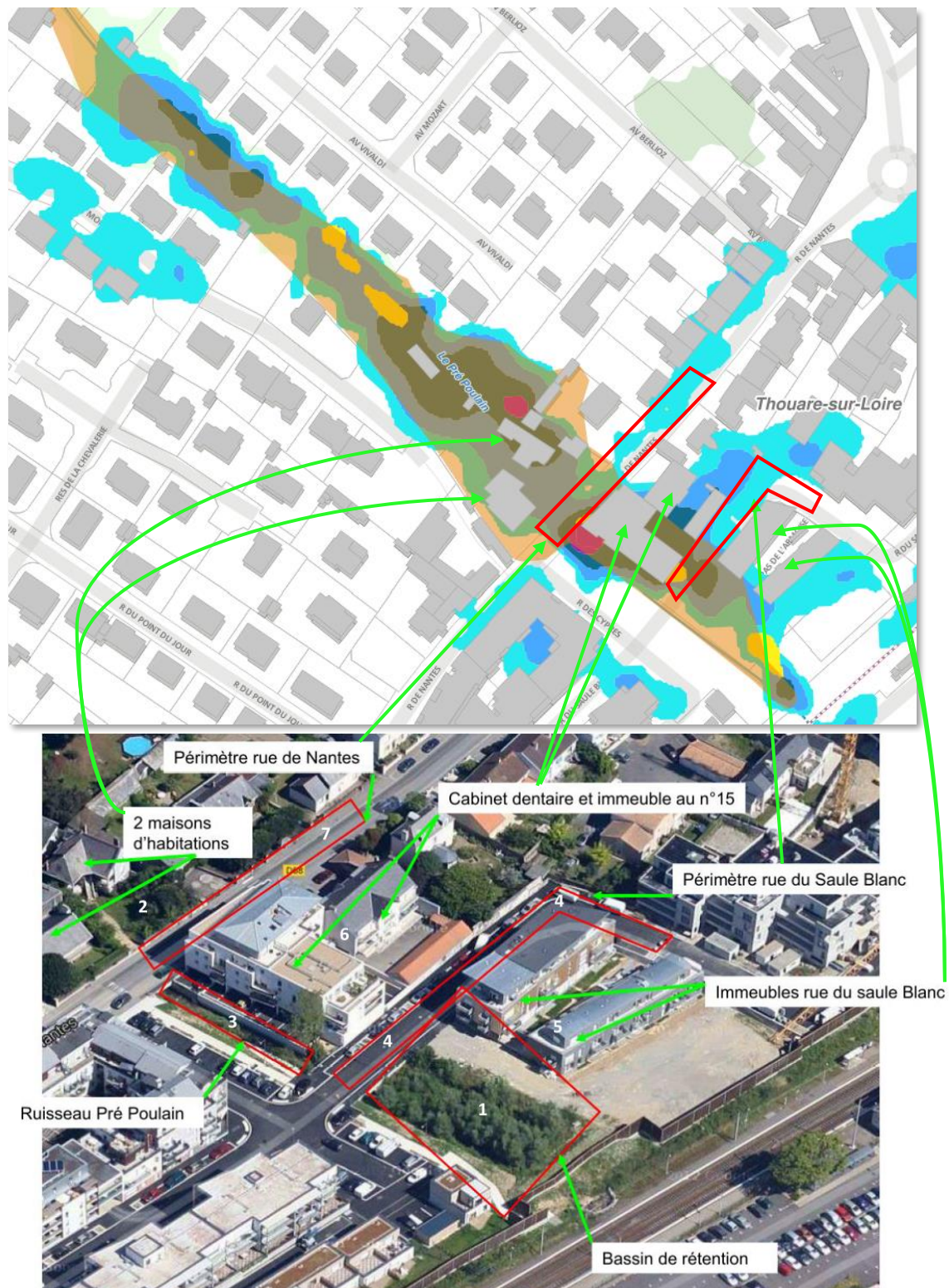


Figure 12 : Comparaison entre les emprises inondables sur le Pré Poulain issues de l'« Etude hydraulique du ruisseau du Pré Poulain » réalisée par SOGREAH en 2003 (en marron), du modèle hydraulique construit dans le cadre de la présente étude (en bleu) et les zones inondées réellement constatées pendant les inondations du 24 décembre 2013



Ces différentes comparaisons et retours d'expérience montrent que le **modèle reproduit correctement le fonctionnement hydraulique du territoire étudié** :

- ↗ les principales zones à risque identifiées par Nantes Métropole en date de mars 2016 sont bien mises en évidence par les résultats du modèle ;
- ↗ les résultats obtenus sont cohérents avec ceux des études antérieures et même plus réalistes (exemple du Pré Poulain) ;
- ↗ la continuité entre les axes de ruissellement sur les versants et le lit majeur des cours d'eau est bonne.

Enfin, malgré la bonne représentativité des phénomènes de ruissellement et de débordements le long des cours d'eau secondaires du territoire, il faut bien garder à l'esprit que **la modélisation proposée intègre plusieurs hypothèses simplificatrices** (pluie de projet homogène, représentation schématique des cours d'eau et des ouvrages de passages) qui, bien qu'**en accord avec les objectifs de l'étude** (identification exhaustive des axes de ruissellement potentiels et de l'emprise des inondations), induisent **certaines limites dans l'interprétation des résultats** :

- ↗ le modèle construit ne peut reproduire de manière satisfaisante les inondations le long des grands cours d'eau du territoire (Loire, Sèvre, Erdre, Acheneau, lac de Grandlieu) dans la mesure où :
  - ces derniers réagissent fortement lors de crues hivernales très longues avec un volume d'eau très important, alors que la pluie simulée dans le modèle pour caractériser l'aléa est une pluie estivale très courte et très intense ;
  - les bassins versants, et donc les apports, drainés par ces grands cours d'eau sont bien plus larges que le territoire de Nantes Métropole et ne sont donc pas repris dans le modèle ;

**Ce point n'est pas problématique dans la mesure où le long de ces cours d'eau, il existe déjà une délimitation des emprises inondables issues des procédures PPRI, TRI ou AZI. Le long des autres cours d'eau plus petits, le modèle reproduit de façon satisfaisante les inondations ;**

- ↗ la pluie de référence retenue conduit à définir une enveloppe maximale des inondations à attendre en cas de survenue d'une pluie centennale de par son caractère généralisé ;
- ↗ à l'inverse, il n'a pas été tenu compte de phénomènes tels que l'envasement ou l'obstruction d'ouvrages, du fait de la présence de corps flottants, qui peuvent avoir un effet aggravant sur les phénomènes de ruissellement ;
- ↗ enfin, les différents travaux de remblaiement ou de modification de lit des cours d'eau réalisés récemment ne sont pas intégrés dans le modèle dont la topographie s'appuie sur le MNT fourni dans le cadre de l'étude (produit en 2005) ;
- ↗ l'objet de l'étude et la méthode n'intègrent pas le risque inondation par remontée de nappe.

## 2.5 HYPOTHESE RETENUE POUR LA PLUIE DE REFERENCE UTILISEE POUR L'EVALUATION DES RISQUES DE RUISSELLEMENT A L'ECHELLE DU TERRITOIRE DE NANTES METROPOLE

Les principaux éléments méthodologiques étant décrits ci-dessus, il convient désormais de définir la pluie de référence qui a été utilisée pour l'évaluation des risques de ruissellement à l'échelle de la Métropole, étant entendu que cette pluie constitue la donnée d'entrée du modèle hydrologique/hydraulique mis en œuvre.

Afin de retenir la pluie la plus adaptée à l'objectif de prévention des risques, les résultats de simulation des différentes pluies modélisées, présentées au paragraphe 2.2.1, ont été comparés en termes d'emprise et de fonctionnement hydraulique.

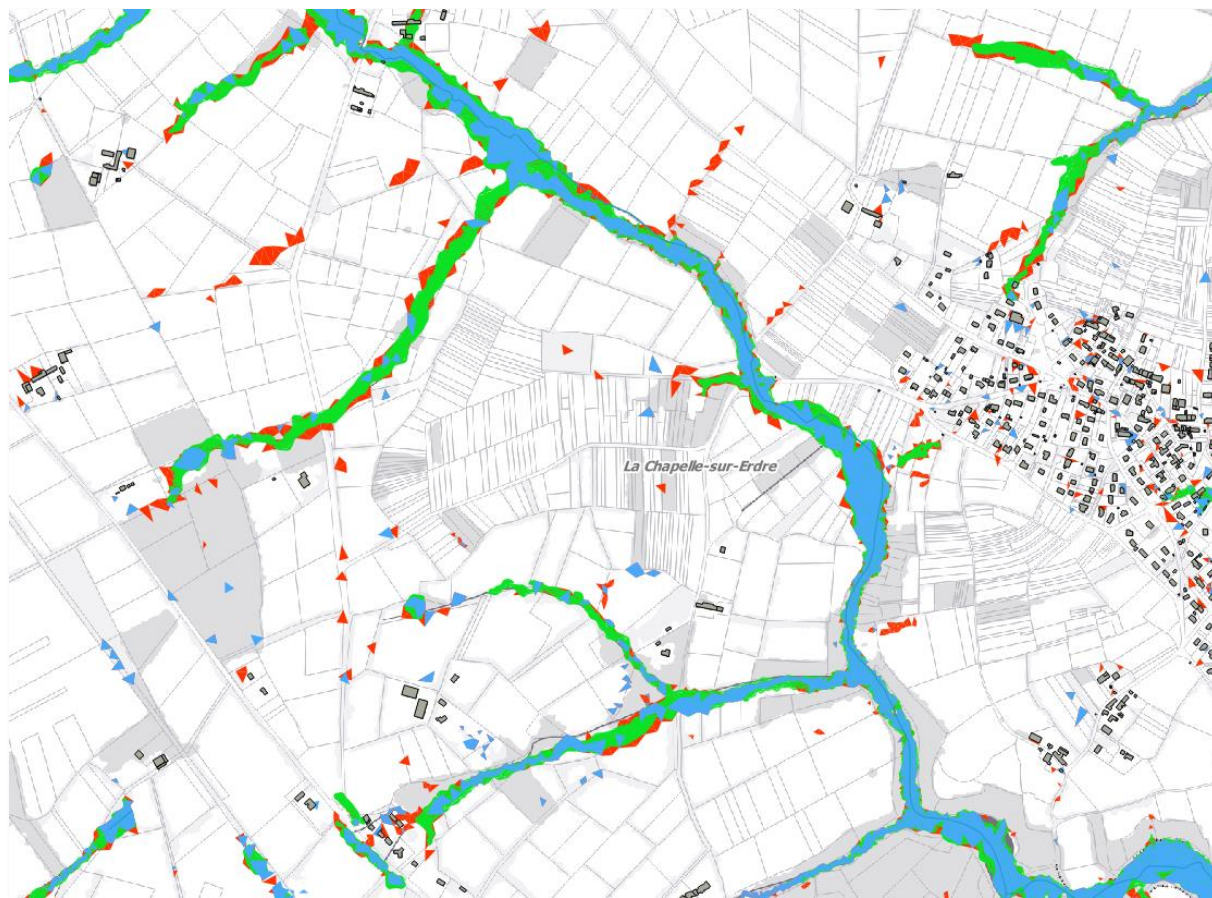
Trois pluies ressortent particulièrement de cette analyse en termes d'emprises :

- ↳ **la pluie de décembre 2013 mise à l'échelle centennale**, présentant un comportement hivernal : il s'agit d'une pluie longue avec des intensités modérées. Les zones d'accumulation du territoire sont alors bien mises en évidence ainsi que les principaux axes d'écoulement. En revanche les axes d'écoulement secondaires ne sont pas mis en évidence ;
- ↳ **la pluie de juillet 2013 mise à l'échelle centennale sur une durée de 1h et la pluie théorique de durée totale 4h et de durée intense 15 min**, présentant toutes deux un comportement estival : il s'agit de pluies plus courtes avec de fortes intensités. Ce type de pluie permet de bien mettre en évidence les zones d'accumulation ainsi que les axes d'écoulement principaux et secondaires du territoire étudié.

L'image ci-après met clairement en évidence que l'emprise de la pluie hivernale de décembre 2013 mise à l'échelle centennale (en bleu) ne permet pas de faire ressortir nettement les différents affluents et axes de ruissellement secondaires le long du Rupt à La Chapelle-sur-Erdre.

A l'inverse, l'emprise de la pluie théorique 4h\_15min (en rouge) est très proche de celle de la pluie de juillet 2013 mise à l'échelle centennale (en vert) mais aurait tendance localement à faire ressortir des micro-axes de ruissellement pas réellement pertinents au vu de l'échelle de l'étude et à maximiser l'emprise des axes d'écoulement.

Figure 13 Comparaison entre les emprises de la pluie 4h\_15min (rouge), juillet 2013 – 100 ans (vert) et décembre 2013 – 100 ans (bleu), résultats non filtrés



Après examen des caractéristiques des différentes pluies et discussions avec Nantes Métropole, il a été décidé de retenir comme **pluie de référence la pluie de juillet 2013 mise à l'échelle centennale sur une durée de 1h.**

Ce choix se justifie par :

- ↗ le caractère estival de la pluie, avec un épisode très court et très intense qui permet de bien mettre en évidence les multiples axes de ruissellement qui se forment à la fois en milieu naturel (talwegs secs, ravins) et en milieu urbain (écoulement dans les rues à forte pente), ce que ne permet pas la pluie hivernale de décembre 2013 mise à l'échelle centennale moins intense. Les zones d'accumulation sont elles aussi bien identifiées ;
- ↗ **l'avantage de s'appuyer sur une forme de pluie réelle**, déjà observée sur le territoire de Nantes Métropole et qui pourrait donc de reproduire dans l'avenir ;
- ↗ un souci de réalisme de la part de Nantes Métropole qui ne souhaite pas surestimer le risque d'inondation réel encouru sur son territoire, raison pour laquelle la pluie estivale théorique 4h\_15min, la pluie pénalisante en termes d'emprise, a été écartée au profit de la pluie de référence retenue moins maximisante.

Les différentes pluies simulées ont été appliquées **de manière uniforme** sur l'ensemble du territoire modélisé. Cette hypothèse d'homogénéité des précipitations permet ainsi de répondre à l'objectif principal de l'étude, à savoir la délimitation exhaustive par secteur des zones inondables (axes de ruissellement et points bas), permettant ainsi de quantifier le risque à l'échelle de Nantes Métropole, et non pas la reconstitution d'un événement en particulier.

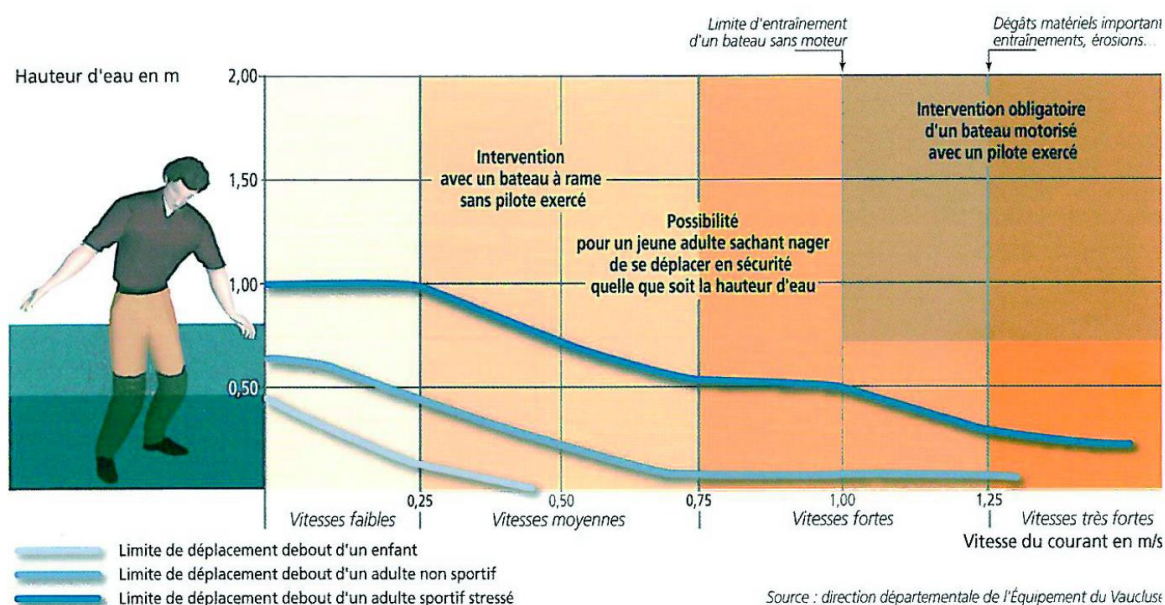
## 3 CONSTRUCTION DE L'ALEA DE REFERENCE ET ANALYSE DES RESULTATS

### 3.1 ALEA FONCTIONNEL DE REFERENCE

#### 3.1.1 Grille de définition de l'aléa

La modélisation de la pluie de référence retenue permet d'accéder, en tout point du modèle, aux valeurs de hauteurs de submersion et vitesses d'écoulement maximales. **L'aléa de référence est produit à partir du croisement entre ces deux paramètres**, croisement qui conditionne le risque sur une zone donnée. En effet, le même niveau d'aléa peut être induit par de fortes hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulements faibles et par de faibles hauteurs d'eau mais des vitesses d'écoulements élevées. La figure ci-dessous illustre pour indication l'impact du couplage de ces deux paramètres sur les possibilités de déplacement des personnes en fonction de leur âge.

Figure 14 : Possibilités de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (source : DDT Vacluse)



Les photos ci-après illustrent certaines inondations survenues sur le territoire de Nantes Métropole et les dangers qu'elles représentent (hauteurs d'eau et vitesses d'écoulement importantes).

Figure 15 : Photos d'inondations du 24 décembre 2013 à Thouaré-sur-Loire (à gauche) et du 7 juin 2013 à Carquefou (à droite)



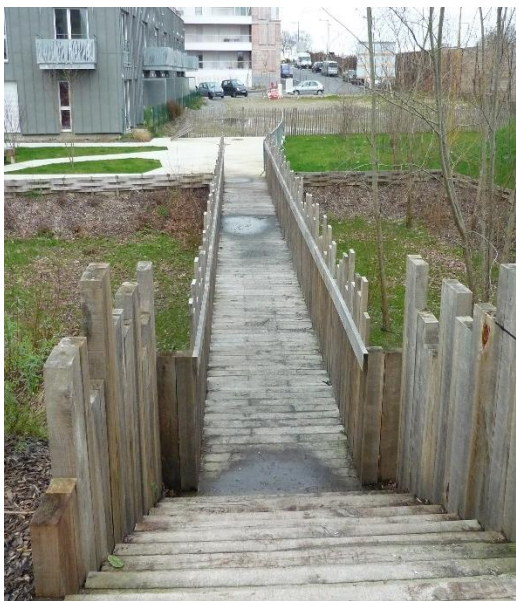
Hauteurs d'eau importantes dans un parking rue de Nantes



Vitesses d'écoulement importantes chez un particulier rue Volga



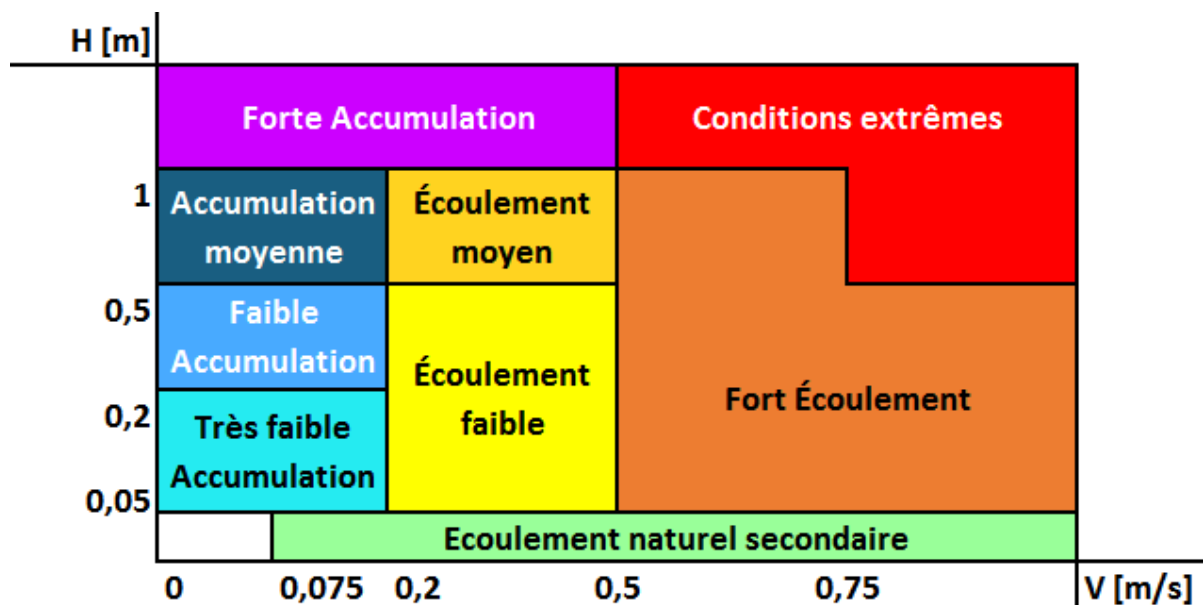
Figure 16 : Photos des inondations du 24 décembre 2013 (avant/après) rue de Nantes à Thouaré-sur-Loire



Cependant, à la différence des grilles d'aléa classique des études PPRi qui visent à caractériser le risque en termes d'intensité, **la grille d'aléa retenue dans cette étude vise à qualifier le risque en termes de fonctionnement** et propose un zonage du territoire en fonction des phénomènes prépondérants entre l'écoulement et l'accumulation. Cette notion d'aléa « fonctionnel » vient du constat que la notion d'aléa fort est souvent associée dans les esprits à l'observation de fortes hauteurs d'eau. Or le facteur déterminant peut également être la vitesse, d'autant plus lorsque l'on s'intéresse à des phénomènes de ruissellement.

La distinction entre les zones « d'écoulement » et celles « d'accumulation » dans la grille d'aléa fonctionnel proposée permet alors de bien différencier les phénomènes et les risques encourus et ainsi d'aider à la compréhension globale du fonctionnement hydraulique du territoire. La grille de définition de l'aléa fonctionnel retenue est la suivante.

Figure 17 : Grille d'aléa fonctionnel



La grille d'aléa fonctionnel permet donc d'individualiser de manière homogène à l'échelle du périmètre d'étude dans son entier :

- ↪ les zones d'écoulements (écoulement faible, écoulement moyen ou fort écoulement) ;
- ↪ les zones d'accumulation (très faible, faible, moyenne ou forte accumulation) ;
- ↪ les zones de conditions extrêmes c'est à dire à la fois de fort écoulement et de forte accumulation.

Sont également identifiées les zones dites d'écoulement naturel secondaire, qui présentent des hauteurs d'eau très faibles (< 5 cm) mais des vitesses pouvant être importantes (seuil fixé à 0,075 m/s). Ces zones ne représentent pas des zones à risques en tant que telles pour un événement centennal au vu des très faibles hauteurs d'eau simulées. Néanmoins, il s'agit d'axes de passage naturel des eaux de ruissellement du bassin versant (chemin hydraulique des écoulements naturels). Ces zones **contribuent à la génération des phénomènes de ruissellement en amont des versants et permettent une meilleure compréhension de la dynamique des écoulements en venant prolonger ou compléter le tracé de certains axes de ruissellement**. De plus, ces zones d'écoulement naturel secondaire sont susceptibles de devenir des zones d'écoulement à risque :

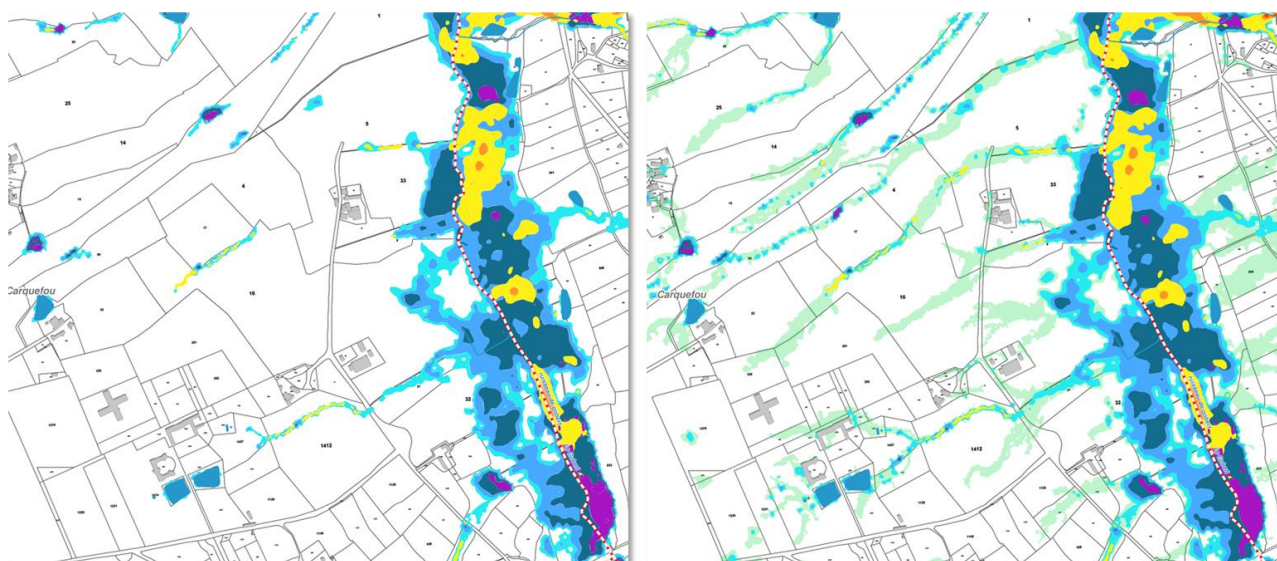
- ↪ à court terme, si des modifications topographiques de leur tracé ou l'implantation d'obstacles en travers de ces axes viennent en modifier le fonctionnement hydraulique, ou encore si des évolutions des pratiques culturelles ou de l'occupation du sol sur le bassin versant aggravent les écoulements (imperméabilisation, retournement d'une prairie, suppression d'une mare ou d'une haie...)

- à moyen/long terme, si le changement climatique conduit à augmenter les apports d'une pluie centennale.

Il est donc important de conserver ces zones de passage de l'eau, qui restent sensibles et à les préserver pour garantir le libre écoulement des eaux de ruissellement. Elles délimitent les axes d'écoulement, dans la cartographie de l'aléa de référence.

A titre d'exemple, sur la vue des résultats du modèle ci-dessus, on identifie bien les zones d'écoulement naturel secondaire (en vert) qui relient les zones où les eaux de pluie auront tendance à s'accumuler (zones bleues).

Figure 18 : Vue de la carte d'aléa sans les zones d'écoulement naturel secondaire (à gauche) et avec (à droite)



### 3.1.2 Construction de l'emprise inondée l'aléa de référence

Comme énoncé précédemment, l'aléa résulte d'un croisement entre hauteur de submersion et vitesse d'écoulement maximales en un point.

Les résultats de modélisation ont donc été transformés en classes de hauteurs d'eau et en classes de vitesses d'écoulement, puis croisés afin de définir les classes d'aléa fonctionnel.

Par définition, pour la problématique ruissellement, la pluie est appliquée sur tout le territoire. En termes de cartographie, cela se manifeste par la création de multiples zones inondées de petite taille (cuvettes) qui nuisent à la lecture globale de la carte et qui ne représentent pas réellement un risque à l'échelle du territoire. Cette problématique a conduit à définir deux **critères de filtrage des résultats de modélisation** :

- un critère de hauteur d'eau minimale de 5 cm pour caractériser les zones d'accumulation, d'écoulement et de conditions extrêmes. Les zones présentant des hauteurs d'eau inférieures à 5 cm et des vitesses supérieures à 0,075 m/s ont été conservées et correspondent aux zones d'écoulement naturel secondaire ;

- ↪ un critère de surface inondée minimale de 1 000 m<sup>2</sup> pour nettoyer la couche d'aléa et filtrer les petits polygones d'aléas non significatifs par rapport à l'échelle de l'étude. Ce filtre a notamment été utile lorsque les résultats de modélisation ont été couplés avec les emprises existantes (voir ci-après).

## 3.2 ANALYSE DES RESULTATS

### 3.2.1 Construction de l'emprise unique des zones inondables et priorisation par source de données

L'objectif global de Nantes Métropole au travers de cette étude est bien de produire une emprise unique des zones inondables du territoire de Nantes Métropole pour une occurrence centennale et pour les phénomènes de débordement de cours d'eau et de ruissellement.

Cela sous-entend donc de compiler différentes sources de données (les résultats du modèle et les emprises inondées pour un événement centennal ou équivalent existant par ailleurs) et de les prioriser entre elles (cf. chapitre 3.1 du rapport de phase 1).

Les emprises de référence retenues pour l'ensemble du territoire sont les suivantes.

Figure 19 : Emprises de référence retenues pour les principaux cours d'eau et l'ensemble du territoire de Nantes-Métropole

Cours d'eau	Emprise de référence
Loire amont	Emprise du PPRI <sup>1</sup> de la Loire amont
Loire aval	Emprise du PPRI de la Loire aval
Estuaire de la Loire	Emprise du lit majeur exceptionnel de l'AZI de l'Estuaire de la Loire
Sèvre Nantaise	Emprise du PPRI de la Sèvre
Erdre	Emprise du lit majeur de l'Erdre tiré de l'AZI <sup>2</sup> de l'Erdre, en excluant la zone inondable en aval du Pont Morand
Grandlieu et Acheneau	Emprise du lit majeur de l'AZI de Grandlieu complétée par l'emprise des plus hautes eaux (2.5 m NGF) définie par le syndicat de Grandlieu sur la partie nord et est du lac
Reste du territoire	Résultats de simulation avec caractérisation de l'aléa de référence fonctionnel

<sup>1</sup> PPRI : Plan de Prévention du Risque inondation

<sup>2</sup> AZI : Atlas des Zones Inondables

Ces choix ont été faits en concertation avec les services de l'État, les procédures PPRI et AZI ayant un caractère officiel et même réglementaire pour le PPRI (les AZI ont une portée informative, comme rappelé dans le porter-à-connaissance de l'État de mai 2015 pour le Plan Local d'Urbanisme métropolitain), que n'ont pas les autres sources de données.

Concernant les secteurs couverts par des études locales, il s'est avéré que les résultats de simulation du modèle étaient plus précis que ceux des études antérieures. Le choix a donc été fait de retenir les résultats de simulation du modèle construit dans le cadre de cette étude comme emprise de référence sur ces secteurs.

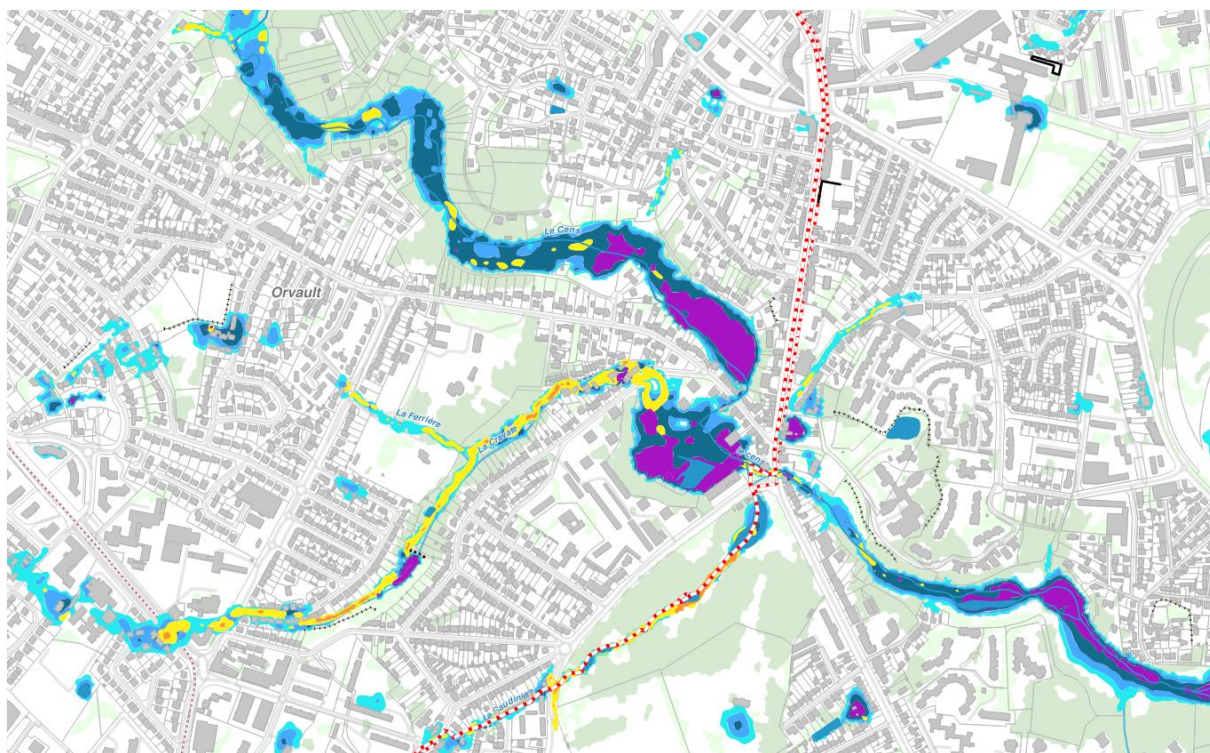
### 3.2.2 Analyse des résultats et estimations des surfaces inondées

En dehors des emprises officielles PPRI et AZI, la cartographie de l'aléa de référence fonctionnel permet de délimiter les zones à risque d'inondation mais surtout de comprendre le fonctionnement hydraulique des zones inondables.

Ainsi, sur l'exemple ci-dessous, on identifie très rapidement à partir de la carte :

- ↖ les zones d'écoulement à fortes vitesses en jaune et orange ;
- ↖ les zones de forte accumulation supérieure à 1 m en violet ;
- ↖ les zones de très faible accumulation en bleu ciel et d'accumulation moyenne (entre 50 cm et 1 m) en bleu foncé.

Figure 20 Vue de l'aléa de référence fonctionnel



En termes de surface inondée, **pour un événement d'occurrence centennale, 13 798 ha se situent en zone inondable, soit un peu plus de 25% de la superficie totale de Nantes-Métropole (53 400 ha)**. Il faut garder à l'esprit que ce chiffre inclut l'emprise naturelle du lit mineur des cours d'eau qui n'est pas négligeable pour la Loire par exemple. Dans le détail, les superficies inondables se répartissent comme suit :

- ✦ 1 656 ha pour le PPRI Loire amont soit 3 % de la superficie du territoire ;
- ✦ 4 382 ha pour le PPRI Loire aval soit 8 % de la superficie du territoire ;
- ✦ 2 008 ha pour l'AZI de l'Estuaire de la Loire soit 4 % de la superficie du territoire ;
- ✦ 1 176 ha au niveau de l'Erdre (AZI) soit 2 % de la superficie du territoire ;
- ✦ 674 ha au niveau de l'Acheneau et du lac de GrandLieu (AZI et emprise du syndicat de GrandLieu) soit 1.2 % de la superficie du territoire ;
- ✦ 348 ha au niveau de la Sèvre Nantaise (PPRI) soit 0.7 % de la superficie du territoire ;
- ✦ 3 554 ha inondés en dehors des emprises officielles PPRI et AZI donc sur le reste du territoire de Nantes Métropole, soit 6.7 % de la superficie du territoire.

Ainsi, sur les 13 798 ha inondés pour un événement centennal, 10 244ha sont issus des emprises officielles PPRI et AZI (74 % des zones inondées) et 3 554 ha des résultats de modélisation de la présente étude (26 % des zones inondables).

Au sein de ces 3 554 ha, il convient de distinguer les zones d'écoulement naturel secondaire qui comme dit précédemment ne sont pas de réelles zones à risque pour une occurrence centennale. Ces dernières représentent une superficie totale de 465 ha. La figure ci-après détaille les surfaces inondables au global et par classe d'aléa fonctionnel.

Figure 21 Distribution globale des zones inondables par source

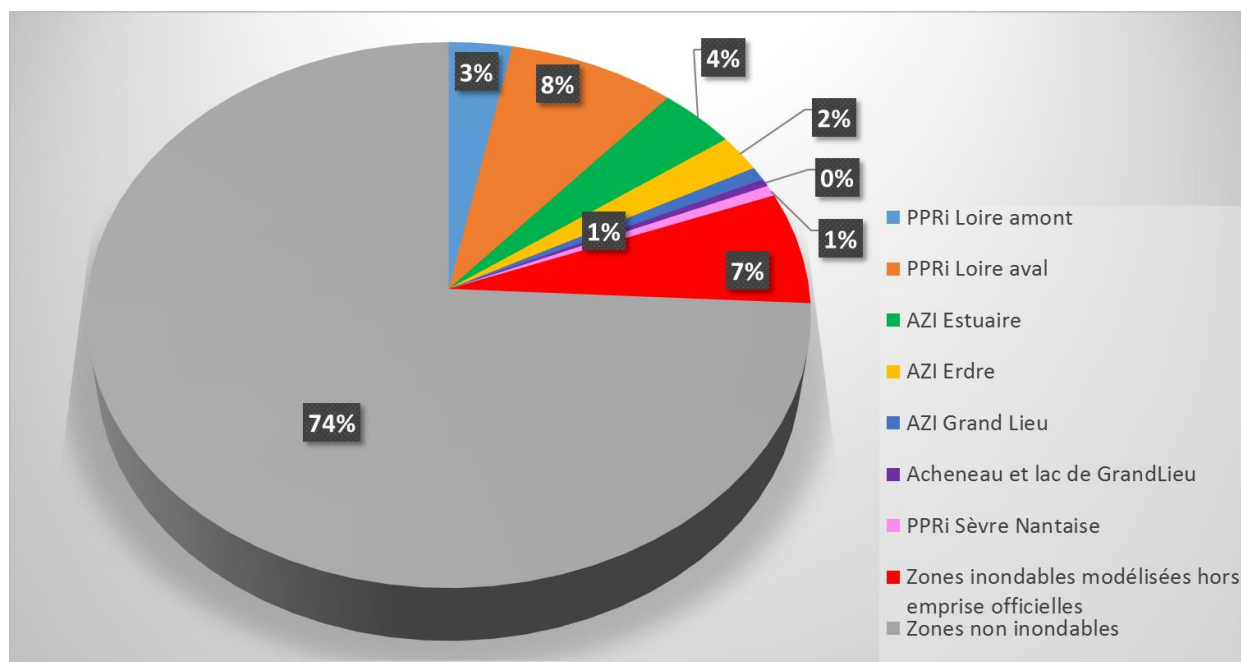
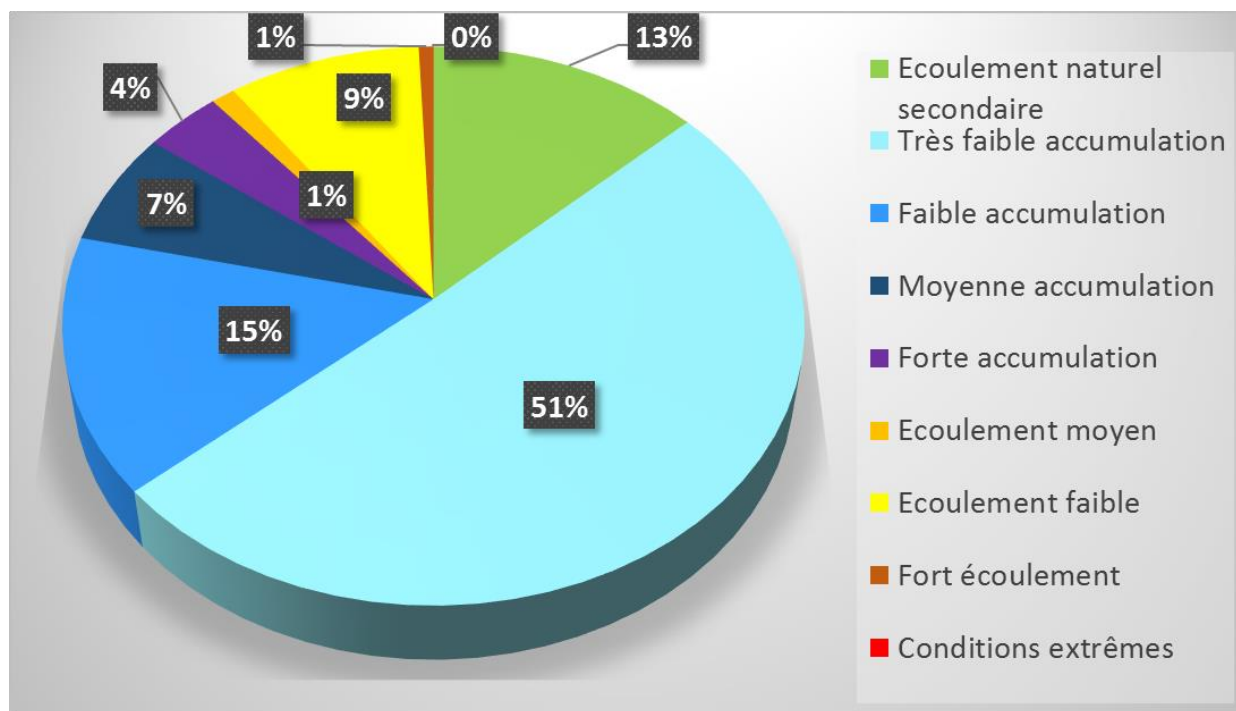


Figure 22 Distribution des zones inondables par classe d'aléa au sein des zones inondables hors emprises officielles PPRi et AZI



Les deux graphiques précédents amènent plusieurs remarques :

- ↗ la majorité du territoire de Nantes Métropole n'est pas concernée par les inondations pour un événement centennal (74 %) ;
- ↗ les zones inondées par une crue centennale de la Loire aval représentent une superficie supérieure (4 382 ha) à celles de toutes les autres zones inondables hors emprises officielles (3 554 ha) ;
- ↗ au sein de ces dernières zones, on constate 13 % de zones d'écoulement naturel secondaire, donc sans risque réel, et surtout 51 % de zones de très faible accumulation (hauteur d'eau < 20 cm). On retrouve ensuite 15 % de zones de faible accumulation (hauteur d'eau comprises entre 20 et 50 cm) et 7 % de zones de moyenne accumulation (hauteurs d'eau comprises entre 50 cm et 1 m). Les zones de forte accumulation couvre 4 % seulement de ces zones inondables ;
- ↗ les zones d'écoulement faible représentent 9 % de ces surfaces inondables (contre seulement 1 % pour les zones de fort écoulement et 1% pour les zones d'écoulement moyen) ;
- ↗ enfin les zones de conditions extrêmes sont négligeables (< 1% de la surface inondée hors emprises officielles).

**Ainsi, parmi les zones inondables hors emprises officielles, les zones les plus pénalisantes en termes d'aléa (et donc de règles d'urbanisme pour les futurs projets d'aménagements) représentent seulement 15 % des surfaces inondées et 1% de la superficie totale de Nantes Métropole.**

### 3.3 DESCRIPTION DES RENDUS CARTOGRAPHIQUES

Le travail réalisé durant les phases 2 et 3 de l'étude a été restitué par l'intermédiaire de plusieurs types de cartographie :

- ↗ une cartographie au 1/37 000e des zones inondables à l'échelle de Nantes Métropole sur fond SCAN 25, représentées avec un aplat bleu unique ;
- ↗ une cartographie au 1/37 000e de l'aléa fonctionnel à l'échelle de Nantes Métropole sur fond SCAN 25 représentant les emprises officielles PPRI et AZI en grisé et les classes de l'aléa fonctionnel en dehors des emprises ;
- ↗ des cartographies communales au 1/17 000e de l'aléa fonctionnel sur fond SCAN 25 avec des formats adaptatifs (A3 à A0) en fonction de la taille de la commune, représentant les emprises officielles PPRI et AZI en grisé et les classes de l'aléa fonctionnel en dehors des emprises officielles.

Figure 23 Cartographies des zones inondables d'occurrence centennale à l'échelle de Nantes Métropole au 1/37 000e





Figure 24 Cartographie des zones inondables d'occurrence centennale selon le type d'aléa à Bouaye, au 1/17 000e

