



HAL
open science

Analyse hydrologique du réseau de drainage de la zone sud de la métropole nantaise pour une meilleure gestion des eaux pluviales

Anna Guézénoc

► **To cite this version:**

Anna Guézénoc. Analyse hydrologique du réseau de drainage de la zone sud de la métropole nantaise pour une meilleure gestion des eaux pluviales. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2020. dumas-03116352

HAL Id: dumas-03116352

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03116352>

Submitted on 20 Jan 2021

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.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES**

MEMOIRE

**présenté en vue d'obtenir
le DIPLOME D'INGENIEUR CNAM**

SPECIALITE : Géomètre et Topographe

par

Anna GUEZENOC

Analyse hydrologique du réseau de drainage de la zone sud de la métropole nantaise pour une meilleure gestion des eaux pluviales

Soutenu le 14 Octobre 2020

JURY

Monsieur Nathalie THOMMERET
Madame Prénom2 NOM2
Madame Katia CHANCIBAULT
Monsieur Arnaud GALLAIS

Président du jury
Examineur
Maître de stage
Enseignant référent

Remerciements

J'aimerais remercier toutes les personnes qui ont contribué au bon déroulement de mon travail de fin d'étude.

Tout d'abord un grand merci à l'Université Gustave Eiffel pour m'avoir accueilli au sein de son établissement et pour m'avoir proposé un sujet de stage aussi captivant et enrichissant.

Merci à ma tutrice Katia Chancibault, pour son encadrement, ses précieux conseils, son écoute. Un grand merci également à Alexandra Mosset pour son accompagnement tout au long de mon projet de recherche. Merci à elles pour leur soutien, leurs réponses à mes questions, leur disponibilité. J'aimerais les remercier de s'être aussi bien adaptées à la crise sanitaire qui nous a tous touché. Elles m'ont permis de continuer mon travail dans de bonnes conditions.

Je tiens aussi à remercier M. Arnaud Gallais, le professeur référent de mon stage dont les conseils avisés m'ont aidés à la rédaction de ce mémoire de fin d'études.

Merci également à Saray Chavez, stagiaire de l'UTC Compiègne en matière de documents d'urbanisme, avec qui j'ai pu travailler et échanger sur nos travaux respectifs.

Merci à mes parents et à mon frère pour leur soutien et leurs encouragements sans faille. Et merci pour leurs avis, leurs critiques et nombreuses relectures.

Liste des abréviations

BD : Base de Données

BD CARTO : Base de Données Cartographiques

BD OCS GE : Base de Données de l'Occupation du Sol à Grande Echelle

BD TOPO : Base de données topographiques

EPCI : Etablissement Public de Coopération Intercommunale

IGN : Institut National de l'Information Géographique et Forestière

MANIPUR : Méthodologie pour l'ANalyse d'ImPact des documents d'URbanisme

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NBS : Nature Based solutions

NGF : Nivellement Géodésique Français

PLUm : Plan Local d'Urbanisme métropolitain

QGIS : Quantum Geographic Information System

RGF93 : Réseau Géodésique Français de 1993

SIG : Système d'Information Géographique

STEU : Station de Traitement des Eaux Usées

TEB : Town Energy Balance scheme

TOHR : TOol for Hydrographic network Reconstruction

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

Glossaire

Débit de pointe : débit maximal instantané d'un cours d'eau pour un événement donné.

Etiage : niveau moyen le plus bas d'un cours d'eau.

Evapotranspiration : processus combinés par lesquels de l'eau est transférée à l'atmosphère de la surface par évaporation et du sol via la végétation par transpiration.

Noue : fossé large, peu profond et généralement végétalisé servant à recueillir, stocker et favoriser l'infiltration des eaux pluviales.

Orthophotographie : image photographique corrigée des déformations dues au relief du terrain, à l'axe de prise de vues et à la distorsion de l'objectif.

Ponceau : structure hydraulique aménagée sous un remblai qui permet le passage de l'eau tout en permettant aux humains, animaux, machines et équipements de traverser le cours d'eau.

Radier : fond d'une canalisation ou d'un regard

Regard : boîte enterrée de forme parallélépipédique ou cylindrique (en béton ou en matière plastique) fermée par un couvercle appelé tampon. Ils sont généralement disposés aux points de rencontre des canalisations enterrées ou à leurs changements de directions.

Services écosystémiques : services rendus par la nature à l'Homme.

Substrat : support de base sur lequel peuvent se développer les végétaux.

Table : ensemble de données organisées en lignes et colonnes. Chaque ligne représente un enregistrement unique et chaque colonne représente un champ de l'enregistrement.

Unité de collecte : portion de la zone d'étude drainée par le réseau hydrographique.

Table des matières

Remerciements	2
Liste des abréviations	3
Glossaire	4
Table des matières	5
Introduction	7
I CONTEXTE DE L'ETUDE	9
I.1 L'EAU EN ZONE URBAINE.....	9
I.1.1 Le grand et le petit cycles de l'eau.....	9
I.1.2 L'assainissement	9
I.1.3 Le développement de l'assainissement	10
I.1.4 Les systèmes d'assainissement unitaire et séparatif.....	10
I.2 LES SOLUTIONS D'ADAPTATION A L'URBANISATION ET AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	11
I.2.1 Les dérèglements de l'hydrologie en zone urbaine.....	11
I.2.2 Des solutions végétalisées axées sur les services écosystémiques	13
I.2.3 Les diverses solutions alternatives à l'urbanisation	13
I.3 LES OUTILS TEB-HYDRO ET TOHR.....	15
I.3.1 TEB-Hydro, un modèle hydro-climatique urbain	16
I.3.2 Le rôle de l'outil de reconstruction et de projection TOHR.....	17
I.3.3 Le fonctionnement de l'outil de reconstruction et de projection TOHR.....	17
I.3.3.1 Les données d'entrée.....	18
I.3.3.2 La création du semis de nœuds.....	18
I.3.3.3 La création des connexions	19
I.3.3.4 La projection du graphe orienté du réseau d'assainissement sur la grille maillée.....	20
II APPLICATION DE L'OUTIL TOHR A LA ZONE SUD DE NANTES METROPOLE	21
II.1 PRESENTATION DU SECTEUR D'ETUDE.....	21
II.1.1 Nantes Métropole	21
II.1.2 Zone d'étude : le secteur sud-Loire.....	24
II.1.3 Les données descriptives utilisées.....	25
II.1.3.1 Les données du réseau d'assainissement.....	25
II.1.3.2 Le réseau hydrographique naturel.....	26
II.2 METHODOLOGIE DE DEFINITION DU PERIMETRE D'ETUDE	26
II.2.1 Aire drainée par la STEU Petite Californie	26
II.2.2 La prise en compte du réseau d'eaux pluviales	28
II.3 RECONSTRUCTION DU RESEAU D'ASSAINISSEMENT DE LA ZONE SUD DE NANTES METROPOLE.....	29
II.3.1 La préparation des données d'entrée de TOHR.....	29
II.3.2 Méthodologie de mise à jour de l'outil de reconstruction des réseaux hydrographiques	32
II.3.3 La reconstruction des nœuds.....	32
II.3.4 Les arcs de connexions des réseaux artificiels.....	34
II.4 LA PROJECTION DU RESEAU SUR LA GRILLE MAILLEE	36
II.4.1 La sélection des exutoires d'eaux pluviales.....	36
II.4.2 Croisement avec l'analyse des documents d'urbanisme	37
II.4.3 Les bassins versants obtenus	39
II.5 DISCUSSION DES RESULTATS.....	40

II.5.1	La reconstruction.....	40
II.5.2	La résolution de la grille.....	42
II.5.3	La projection du graphe sur la grille	43
III	L'ETUDE DES BASSINS VERSANTS	44
III.1	LES DONNEES UTILISEES	44
III.2	LA METHODOLOGIE	46
III.3	LES RESULTATS DE L'OCCUPATION DU SOL PAR BASSIN VERSANT	46
III.4	LES FAIBLESSES EN MATIERE DE GESTION DES EAUX PLUVIALES ET LES SOLUTIONS VERTES POUVANT ETRE MISES EN PLACE.....	48
III.4.1	Identification des bassins versants présentant des faiblesses en matière de gestion des eaux pluviales	48
III.4.2	Le développement de solutions vertes dans les secteurs d'OAP	49
	Conclusion.....	52
	Bibliographie.....	55
	Table des annexes.....	58
	Liste des figures	62
	Liste des cartes	63
	Liste des tableaux	64

Introduction

La croissance urbaine est un phénomène d'échelle mondiale. Elle résulte de deux mouvements : la croissance démographique globale et l'exode rural. Aujourd'hui plus de 55% de la population mondiale vit en zone urbaine (Banque Mondiale, 2018). D'ici 2050, deux personnes sur trois habiteront probablement dans les villes (Nations Unies, 2018). Actuellement les villes les plus peuplées sont dans l'axe Asie, Afrique, Amérique Latine, mais le mouvement est le même en France, où la population se concentre dans les grandes métropoles.

L'urbanisation a pour effet de densifier les surfaces imperméabilisées au détriment des surfaces naturelles et elle entraîne l'augmentation des réseaux de drainage dans le sol. Elle impacte alors inévitablement le cycle de l'eau urbain en modifiant les chemins d'écoulement des eaux. L'infiltration des eaux pluviales dans le sol diminue, ce qui cause l'augmentation du ruissellement de surface. De plus, la réduction du stockage de l'eau dans le sol entraîne une baisse des capacités d'évapotranspiration (Stavropoulos-Laffaille, 2019). Ainsi, les zones urbaines peuvent être touchées par des crues plus intenses et plus fréquentes.

Le changement climatique joue également un rôle important dans le dérèglement de l'hydrologie en ville. Il contribue à l'augmentation des risques de sécheresses et d'inondations (Lotfi et al., 2016).

En France, la gestion durable de l'eau s'appuie sur des textes internationaux, européens et nationaux. Elle est notamment encadrée par la directive-cadre européenne 2000/60/CE sur l'eau qui restreint les impacts de l'urbanisation sur le cycle de l'eau et le climat local. En effet, l'objectif de cette directive est de parvenir au « bon état » des eaux et de mettre fin à la détérioration de l'état des eaux dans l'Union Européenne.

Dans l'optique d'adapter la ville à l'urbanisation et au changement climatique, de nombreuses techniques alternatives ont vu le jour. Elles sont basées sur la végétation. Aussi, il existe diverses infrastructures vertes et bleues, telles que les façades ou toitures végétalisées, les bassins de rétention, les noues, etc., permettant de gérer l'eau pluviale à la source. Leur intégration en zone urbaine a de nombreux bénéfices : en plus de favoriser les processus du cycle naturel de l'eau, ces solutions améliorent le confort thermique, permettent de dépolluer, jouent un rôle dans l'atténuation sonore, etc. Elles ont, de plus, une fonction paysagère et sociale.

Ces stratégies d'adaptation végétalisées sont nombreuses et variées. Cependant elles doivent être davantage étudiées. Ainsi, il existe de nombreux outils de modélisation

hydrologiques et/ou énergétiques, qui permettent de les évaluer. L'Université Gustave Eiffel, en collaboration avec Météo France, a élaboré le modèle hydro-climatique TEB-Hydro (Stavropoulos-Laffaille et al., 2018). Il permet de représenter les transferts d'eau et de chaleur entre le sous-sol, la surface et l'atmosphère, ainsi que les différents écoulements de l'eau et les diverses connexions entre réseaux artificiels et naturels. Il s'intéresse au cycle de l'eau dans son ensemble. C'est un modèle urbain particulièrement adapté pour évaluer la mise en œuvre de solutions végétalisées en ville.

Ce travail de fin d'étude s'inscrit dans un projet de plus grande envergure (projet MANIPUR) qui vise à développer une méthodologie permettant d'évaluer à priori, d'un point de vue hydrologique et énergétique, les documents réglementaires élaborés par les villes vis-à-vis des solutions végétalisées. C'est pourquoi mon projet a été mené en parallèle d'un autre stage portant sur l'analyse de documents réglementaires (d'une partie de Nantes Métropole) (Chavez, 2020).

Le modèle TEB-Hydro nécessite préalablement une représentation réaliste des différents chemins d'écoulement de l'eau en milieu urbain mais non exhaustive pour être adapté à la résolution à laquelle il est utilisé. Une compréhension du fonctionnement du réseau d'assainissement ainsi que des connexions avec le milieu naturel est cruciale.

Dans le cadre de ce stage, nous nous intéresserons seulement à l'aspect hydrologique, et plus particulièrement à l'étape préalable indispensable à la modélisation : la reconstruction de réseaux d'assainissement (afin de produire un graphe orienté).

L'accent sera mis dans un premier temps sur le contexte de l'étude qui traitera de l'eau en zone urbaine, des solutions d'adaptation aux changements globaux et de l'outil TOHR (Tool for Hydrographic network Reconstruction) qui permet de reconstruire de manière simplifiée mais fonctionnelle les réseaux hydrologiques. De ce fait, la seconde partie présentera l'application de l'outil sur la partie sud de Nantes Métropole et les résultats obtenus. Ensuite, la phase finale de ce projet mettra en lumière les faiblesses et le potentiel des bassins versants étudiés en termes d'intégration de solutions végétalisées.

I Contexte de l'étude

I.1 L'eau en zone urbaine

I.1.1 Le grand et le petit cycles de l'eau

Le cycle naturel de l'eau, communément appelé « grand cycle de l'eau », se décompose en plusieurs étapes. Le soleil fait évaporer l'eau en surface (océans, mers, rivières, lacs, etc.) et permet la transpiration des plantes : on parle d'évapotranspiration. L'eau retombe sous forme de précipitations. Elle ruisselle à la surface terrestre. Elle peut être stockée en surface (sol, végétation, bâti) ou s'infiltrer dans le sol et remplir les nappes phréatiques. Et finalement, elle retourne au milieu naturel (la mer, les océans). C'est « le mouvement perpétuel de l'eau dans tous ses états » (Les Agences de l'eau, 2017).

Le petit cycle de l'eau est totalement artificiel. Il a été mis en place par l'Homme au XIX^{ème} siècle afin de capter l'eau, la rendre potable et en disposer à volonté à son domicile, puis la collecter et la traiter afin de la restituer au milieu naturel. Ainsi, aujourd'hui, l'eau est prélevée au milieu naturel, traitée, utilisée, assainie et enfin restituée.

Un bassin versant est un territoire à l'intérieur duquel toutes les eaux en surface et souterraines, convergent vers un même exutoire. Il est délimité par des frontières naturelles correspondant à des lignes de crête. De part et d'autres de ces limites, les eaux de pluie s'écoulent vers des exutoires distincts. Aussi, dans un bassin versant urbanisé, le grand cycle de l'eau est modifié par les réseaux qui drainent le sol et les diverses constructions établies, entraînant une augmentation des surfaces imperméables. On parle alors de cycle global de l'eau.

I.1.2 L'assainissement

L'assainissement est « l'ensemble des techniques de collecte, de transport et de traitement des eaux usées et pluviales d'une agglomération, d'un site industriel ou d'une parcelle privée avant leur rejet dans le milieu naturel » (Veolia, 2020). Les eaux pluviales, les eaux de vidange des bassins de natation et de baignade et certaines eaux industrielles, dont les caractéristiques permettent un rejet en milieu naturel sans traitement, sont déversées dans le réseau d'eaux pluviales. Les eaux domestiques et les eaux industrielles autorisées par conventions spéciales de déversement, s'écoulent dans le réseau d'eaux usées (Règlement d'assainissement collectif de Nantes Métropole, 2019).

I.1.3 Le développement de l'assainissement

Historiquement, les réseaux d'assainissement ont pour rôle d'évacuer les eaux le plus loin et le plus rapidement possible hors de la ville sans traitement afin de minimiser les problèmes sanitaires et de lutter contre les inondations (DEUTSCH J.C., 2003).

Le système d'assainissement unitaire est mis en place au XIX^{ème} siècle : des canalisations souterraines évacuent conjointement eaux usées (elles correspondent aux eaux vannes et aux eaux ménagères) et pluviales (elles proviennent des précipitations atmosphériques). Cependant les effluents polluent les milieux naturels dans lesquels ils sont rejetés. Et de plus, le coût des réseaux est trop élevé pour les collectivités territoriales, car dimensionnés pour avoir la capacité de recueillir les eaux usées et les eaux pluviales. Ainsi, au XX^{ème} siècle apparaît le procédé d'épuration des eaux usées. Ce système ne peut pas accueillir de débits très importants. Sont donc mis en place des déversoirs d'orage qui permettent de soulager le réseau unitaire en temps de pluie : les excédents sont déversés dans le milieu naturel. Cependant, lors d'évènements pluvieux moyens, c'est un mélange d'eaux usées et pluviales qui est rejeté. Pour y pallier apparaît le système séparatif : on distingue eaux usées et eaux pluviales.

I.1.4 Les systèmes d'assainissement unitaire et séparatif

Aujourd'hui en France, il y a donc deux systèmes d'assainissement public. Le système unitaire est composé d'un seul type de canalisations où se mêlent eaux pluviales et eaux usées. On le retrouve principalement dans les centres-villes anciens. Le système séparatif, quant à lui, possède des canalisations distinctes pour les eaux pluviales et pour les eaux usées. Les eaux pluviales ont pour exutoire les cours d'eau. Les eaux usées et les eaux du système unitaire rejoignent les STEU (stations de traitement des eaux usées), elles sont dépolluées avant d'être rejetées à leur tour en milieu naturel.

Une seconde distinction est également à faire concernant la collecte des eaux usées. En effet, elles peuvent être évacuées dans un réseau d'assainissement collectif, communément appelé tout-à-l'égout. Sinon elles sont récupérées par un équipement d'assainissement non collectif : c'est une installation individuelle qui assure la collecte, le transport, le traitement et l'évacuation des eaux usées. Le système à adopter dépend du zonage d'assainissement qui est établi au niveau communal ou intercommunal.

Plusieurs ouvrages spéciaux appareillent les réseaux d'assainissement. Les déversoirs d'orage peuvent équiper les réseaux unitaires. Ils vont permettre de soulager les canalisations

en période de pluie afin d'éviter la saturation du réseau en rejetant le trop-plein directement dans le milieu naturel. Ils participent à la lutte contre les inondations. Ensuite, les stations de relevage des eaux pluviales et les stations de refoulement des eaux usées permettent de remonter les eaux ne s'écoulant pas de manière gravitaire. Et finalement, les stations de traitement d'appoint permettent de lutter contre la production de sulfure d'hydrogène.

I.2 Les solutions d'adaptation à l'urbanisation et au changement climatique

L'un des défis sociétal actuel majeur est de s'adapter au changement climatique et à l'urbanisation, et d'en réduire les effets. Ces changements globaux sont les causes de l'augmentation des températures, des vagues de chaleur, des fortes pluies, des inondations et sécheresses. Ils impactent aussi les écosystèmes. En effet, la chaleur menace les conditions actuelles d'habitat et de nombreux espaces naturels sont dégradés au profit des zones urbaines (Kabisch et al., 2017).

I.2.1 Les dérèglements de l'hydrologie en zone urbaine

Avec l'urbanisation, la part de surfaces imperméable augmente fortement : toits, routes, parkings, etc.. au détriment de la nature. De pair, les systèmes de drainage enterrés se densifient. L'approche du drainage conventionnel d'un bassin versant, était d'une part d'amener les eaux usées jusqu'à la station de traitement et d'autre part de drainer les eaux de ruissellement directement dans les cours d'eau naturels, grâce à un réseau de canalisations (SUDSWP, 2002). Aussi, l'hydrologie en zone urbaine est modifiée. Le risque de crues s'intensifie et en parallèle les taux de pollution des milieux naturels augmentent, et par conséquent les divers écosystèmes sont impactés.

Dans un bassin versant urbanisé, l'occupation du sol, les activités humaines et les aménagements conditionnent les cheminements des eaux. En effet, la proportion de surfaces imperméables augmente avec les toits, les routes, les parkings, etc. et ces zones interfèrent avec les processus du cycle naturel de l'eau. Dans un bassin versant non urbanisé, les parts d'infiltration et d'évapotranspiration sont importantes par rapport à celles du ruissellement. Et au contraire, lorsqu'il est urbanisé, la part de ruissellement augmente fortement, et celles de l'infiltration et de l'évapotranspiration diminuent (SUDSWP, 2002) (Figure 1).

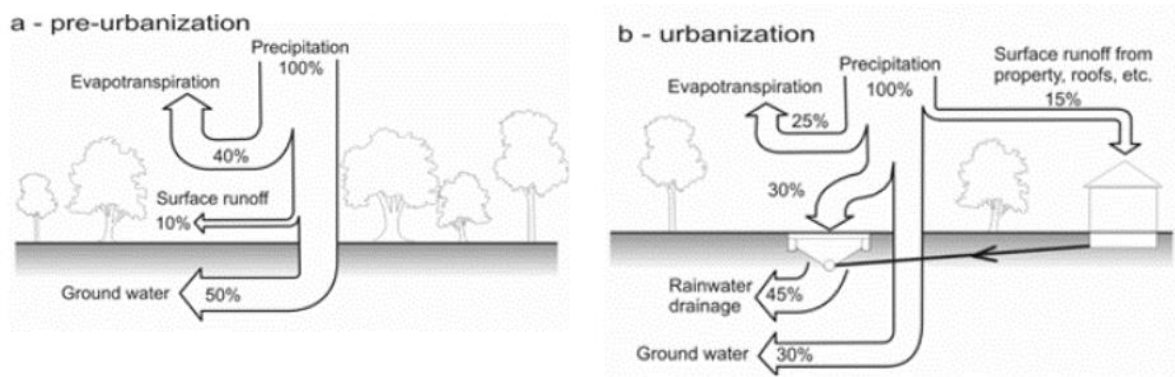


Figure 1 : Comparaison du cycle de l'eau en zone naturelle et urbaine (Stavropoulos-Laffaille, 2019)

Ainsi, dans un bassin versant urbanisé, la réduction de l'infiltration, et la présence de canalisations, qui peuvent drainer l'eau du sol (par défaut d'étanchéité), participent à l'assèchement des sols. Par conséquent, les rivières urbaines peuvent avoir des périodes d'étiage (période annuelle où le débit est minimal) plus intenses et plus longues.

Le temps de réponse d'un bassin versant correspond à la différence entre le pic de pluie et le pic de débit. Plus le secteur est imperméabilisé et plus ce temps de réponse est rapide. En effet, la quantité et la vitesse des eaux ruisselées sont plus importantes que dans un bassin versant naturel. Cela conduit aussi à un débit de pointe plus élevé. Cela peut mener à des crues, surtout dans les petits cours d'eau (SUDSWP, 2002). Par ailleurs, dans de nombreuses zones urbaines, plusieurs rivières s'écoulent à travers de larges tuyaux souterrains, appelés ponceaux. Lors d'évènements pluvieux importants, certains de ces ponceaux n'ont pas une capacité suffisante pour recevoir les eaux, ce qui peut causer ou augmenter les problèmes d'inondation.

Aussi, la pollution des rivières urbaines vient s'ajouter au problème des inondations. En ruisselant sur les toits, routes, parkings, etc., l'eau se charge en polluants qui sont acheminés jusqu'au rivières et ensuite diffusés dans la nature. En outre, les rivières peuvent recevoir des effluents d'eaux usées à cause de mauvaises connexions : des canalisations unitaires sont branchées sur des canalisations d'eaux pluviales (SUDSWP, 2002).

Par conséquent, en réintégrant la nature en zone urbaine par le biais de solutions alternatives, l'objectif est de rapprocher le cycle de l'eau urbain du cycle de l'eau naturel afin notamment de lutter contre les problèmes d'inondations et de pollution des milieux naturels. La finalité est donc de limiter le ruissellement des eaux de pluie grâce à une gestion à la source, d'augmenter la part d'évapotranspiration et de favoriser le stockage et l'infiltration dans le sol et de restituer les eaux pluviales à faible débit dans le réseau d'assainissement ou dans le milieu naturel.

I.2.2 Des solutions végétalisées axées sur les services écosystémiques

Des solutions, axées sur les services écosystémiques pourraient atténuer ces différentes pressions. Le concept de solutions fondées sur la nature ou NBS (Nature Based Solutions) a émergé lors de la conférence des parties de la CCNUCC (Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques) en 2009 à Copenhague pour souligner l'importance de la conservation de la biodiversité pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique. Les NBS sont « les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » (UICN, 2016). Elles ont pour objectif de promouvoir une urbanisation durable, de rétablir les écosystèmes, d'adapter et atténuer le changement climatique, et d'améliorer la gestion des risques et la résilience (Stavropoulos-Laffaille, 2019). Ainsi elles permettent de répondre aux défis majeurs actuels, tout en apportant des bénéfices pour la biodiversité (UICN Comité Français, 2019).

Elles sont multifonctionnelles : elles délivrent de multiples services simultanément. Par exemple le parc urbain est une zone de loisirs pour l'homme, il fournit un effet de refroidissement, il assure l'infiltration, permet de réduire le bruit et stocke le carbone (Kabisch et al., 2017). Elles permettent aussi de conserver et augmenter le stock de capital naturel. Et elles sont flexibles et adaptables.

Les NBS englobent plusieurs domaines comme la protection et l'expansion des zones forestières, le développement des infrastructures vertes en milieu urbain (Kabisch et al., 2017), la préservation de prairies inondables, la restauration de tourbières (UICN, 2016). Elles se déclinent sous de nombreuses formes : murs et toitures végétalisés, parcs, bassins en eau, noues végétalisées, etc.

I.2.3 Les diverses solutions alternatives à l'urbanisation

Les solutions fondées sur la nature ont un impact sur la gestion de l'eau en ville. Elles peuvent notamment réduire les inondations locales. Cependant, elles ont généralement un faible impact lors des événements pluvieux de grande ampleur (inondations liées aux rivières, mers, pluies torrentielles, etc.). Il est donc nécessaire de travailler à différentes échelles spatiales : celle de l'aménagement urbain ou à une plus petite échelle comme celle des bâtiments. Ainsi, en parallèle de ces solutions locales, l'accent doit être mis sur les règlements de zonage d'urbanisme pour le développement des logements et la planification des zones d'inondation.

Il existe une multitude de dispositifs, qui sont complémentaires. En effet, leurs résultats seront optimaux lorsqu'ils sont utilisés conjointement avec d'autres solutions, dans une chaîne de traitement. On parle de principe de gestion en cascade de l'eau pluviale.

Les toitures végétalisées sont des toitures stockantes. Les eaux sont stockées dans le substrat végétal et sont ensuite évacuées par absorption ou évapotranspiration. Les toits doivent être plats ou faiblement inclinés (0,1 à 5%) (SYMASOL, 2016). Elles présentent de nombreux avantages : elles permettent de réduire le ruissellement et donc les débits de pointe et de filtrer les eaux de pluie. Elles sont adaptées à l'échelle de la parcelle, s'intègrent dans le tissu urbain, mais présentent un surcoût par rapport à une toiture classique.

Les murs végétalisés ont de nombreux bénéfices : ils permettent notamment l'absorption de l'eau de pluie dans les plantes et le substrat. Cela retarde l'évacuation vers le réseau d'assainissement et donc régulent les débits, purifie l'eau de pluie et assure l'évapotranspiration. De plus ils diminuent la température environnementale.

Les noues végétalisées sont des fossés larges et peu profonds avec des rives en pente douce. Elles servent à recueillir (par ruissellement ou grâce aux canalisations) et stocker les eaux pluviales, qui sont ensuite infiltrées dans le sol ou évacuées vers un exutoire à un débit régulé. Elles sont plantées d'herbe ou de vivaces diverses adaptées. La végétation permet notamment l'évapotranspiration et la dépollution des eaux par décantation et filtration. Les débits de pointe à l'aval sont limités grâce au stockage et à la régulation. De plus, leur conception est simple, les coûts sont peu élevés et l'entretien est facile. Cependant elles peuvent nécessiter de l'espace dans certains cas (ouvrages collectifs), ce qui n'est pas toujours aisé en zone urbaine (Guide Bâtiment Durable, 2020).

Les jardins de pluie sont des dépressions peu profondes et plantées. Leur fonction primaire est celle de jardin, mais ils permettent aussi de traiter (par filtration) et de stocker les eaux pluviales. Ils reçoivent les eaux de ruissellement des surfaces voisines qui sont filtrés grâce aux plantes. Plus les espèces végétales sont diversifiées et meilleur sera le traitement. Elles doivent également être adaptées à l'alternance période inondées-sèches. Ainsi, les jardins de pluie concilient fonction paysagère et gestion des eaux de ruissellement. Il en existe plusieurs types. On retrouve les infiltrants, dont les sols sont perméables. Ensuite, il y a les drainants (sols imperméables) : l'eau est filtrée par le système végétal et des drains enterrés évacuent les eaux à débit régulé (vers le réseau ou vers un autre dispositif de gestion des eaux). Et finalement, il y a les jardins de pluie semi-filtrants où on allie une infiltration lente des eaux et leur évacuation

(grâce à des drains) lorsqu'il y a des événements pluvieux trop importants, afin de vidanger le jardin en un temps raisonnable. Ils s'adaptent à différentes échelles et s'intègrent parfaitement dans la trame urbaine : ronds-points aménagés, espaces verts communs de logements collectifs, bermes centrales d'axes routiers, etc. Ils peuvent être implantés en zone pentue, mais il faudra casser la vitesse. Les résultats seront optimaux si l'implantation de plusieurs petits jardins décentralisés est favorisé, plutôt qu'une grande surface centralisée (Guide Bâtiment durable, 2020).

Les bandes filtrantes sont placées entre une surface imperméabilisée et un autre type de solution fondé sur la nature, situé en aval. Ce sont donc des dispositifs de transition. Elles accroissent les performances du dispositif aval et limitent le ruissellement : 10% d'une pluie incidente ruisselle sur une surface plantée contre 90% sur une surface imperméable. Leurs pentes doivent être douces (de 2 à 6%) (Guide Bâtiment Durable, 2020). De plus, leur installation est simple et les coûts faibles.

Plus simplement, l'implantation d'arbres individuels, est aussi un exemple de solution végétalisée. Ils ont de nombreux avantages : ils permettent notamment d'augmenter le taux d'évapotranspiration, de stocker le carbone, offrent une part d'ombre supplémentaire, et donc améliorent le confort thermique en été, et ils ont une fonction paysagère. Ils peuvent prendre place en bords de voirie, sur des parkings, etc.

I.3 Les outils TEB-Hydro et TOHR

Aujourd'hui, l'avancé des solutions fondées sur la nature pour lutter contre les effets de l'urbanisation et du changement climatique nécessite d'étudier d'avantage ces techniques alternatives. Pour ce faire il existe des outils comme TEB-Hydro qui est un modèle hydro-climatique urbain maillé. Du point de vue de la composante hydrologique, ce modèle ne simule que les écoulements des eaux pluviales (et donc partiellement les eaux des réseaux unitaires), et ne représentent pas ceux des eaux usées.

Pour cela, il nécessite des données d'entrée caractérisant les différents chemins d'écoulements des eaux pluviales. Ces données sont fournies par TOHR qui est un outil de reconstruction des réseaux hydrographiques artificiels et naturels, et prend en compte les diverses connexions. Il permet aussi de projeter le réseau reconstruit sur la grille maillée utilisée par TEB-Hydro. Il est indispensable à la modélisation et nous nous y intéresserons dans ce travail de fin d'étude.

I.3.1 TEB-Hydro, un modèle hydro-climatique urbain

Les collectivités disposent d'outils de gestion quotidienne de leur réseau : ce sont des modèles hydrauliques. Ils étudient les réseaux d'eaux usées et unitaires et non pas le cycle de l'eau global. Ainsi, ils servent à gérer de manière quotidienne les réseaux d'assainissement collectifs et ils ne permettent que très rarement de prendre en compte l'impact des solutions végétalisées sur la gestion des réseaux. TEB-Hydro est un modèle hydro-climatique urbain maillé qui a été développé pour répondre à cet objectif. Il a pour but d'étudier le microclimat urbain présent et futur, aussi bien à l'échelle du quartier qu'à celle de l'agglomération.

TEB-Hydro est le produit d'une collaboration entre le Laboratoire Eau et Environnement de l'Université Gustave Eiffel et Météo France (Stavropoulos-Laffaille et al., 2018). Il permet de calculer les échanges d'eau et d'énergie entre le sous-sol, la surface terrestre et l'atmosphère. Il reproduit les cycles de l'eau naturel et artificiel en ville : il représente les différents cheminements hydrologiques et leurs connexions. Ainsi, il permet d'analyser les impacts du changement climatique et de l'urbanisation sur les bilans hydrologiques et énergétique urbains, et d'évaluer les stratégies d'adaptation.

La modélisation hydrologique identifie et reproduit les différents processus du cycle de l'eau (i.e. : l'évaporation, l'évapotranspiration, l'infiltration, etc.). Ces processus hydrologiques peuvent avoir des échelles spatiales et temporelles différentes. Cette variabilité a conduit à développer différents outils selon les processus ciblés. On peut grouper les modèles selon divers critères. Ainsi, TEB-Hydro est un modèle conceptuel, distribué et continu (Allard, 2015 ; Stavropoulos-Laffaille, 2019). C'est-à-dire que les représentations physiques sont simplifiées sur des périodes continues plus ou moins longues et l'espace est discriminé suivant une grille de mailles carrées régulières. La résolution de la grille est définie par l'utilisateur.

Chaque maille de la grille est fractionnée en fonction de l'occupation du sol. Elle est d'abord divisée en deux fractions : les surfaces d'eau et la ville, qui est décomposée en trois fractions : le bâti, la voirie et la végétation (Figure 2). Dans cette dernière on distingue végétation haute, basse et sol nu qui correspond à du sol perméable.

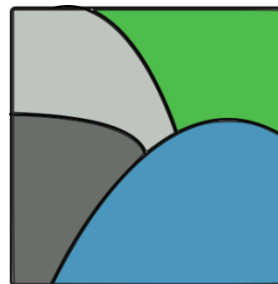


Figure 2 : Maille fractionnée en fonction de l'occupation du sol. En bleu l'eau, en vert la végétation, en gris foncé le bâti et en gris clair la voirie.

I.3.2 Le rôle de l'outil de reconstruction et de projection TOHR

TOHR est un code informatique développé sous MapBasic (langage de programmation) au sein de l'Université Gustave Eiffel (Allard, 2015 ; Lotfi et al., 2016). Il a été évalué sur deux zones d'études distinctes : Nantes (Allard, 2015) et le Grand Paris (Lotfi et al., 2016).

Il permet de reconstruire de manière simplifiée et fonctionnelle les cheminements de l'eau en milieu urbain à partir de l'existant. Le réseau obtenu à l'issue de la reconstruction est appelé graphe orienté. Il prend en compte les réseaux artificiels (réseaux d'eaux pluviales, d'eaux usées et unitaires), les cours d'eau naturels et leurs diverses connexions.

Cet outil a été développé car les banques de données urbaines ne fournissent que très rarement un graphe orienté du réseau d'assainissement. Les données SIG de regards et de canalisation disponibles dans les banques de données urbaines peuvent visuellement correspondre à un graphe orienté, cependant il n'y a pas de connexion topologique entre les différents objets. Ainsi, grâce à la reconstruction, on connaît la canalisation aval de chaque canalisation. Le graphe obtenu après la reconstruction étant projeté sur la grille utilisée par le modèle TEB-Hydro, on peut, par extension, associer à chaque maille, sa maille aval et donc connaître son exutoire. Ces informations sont nécessaires pour la modélisation.

De plus, chacune des mailles de la grille de TEB-Hydro représente une information moyennée. Il n'y a donc qu'une entrée d'eau par type de réseau (séparatif ou unitaire) ce qui conduit à la simplification du réseau réel en fonction de la résolution de la grille du modèle hydrologique.

I.3.3 Le fonctionnement de l'outil de reconstruction et de projection TOHR

Un réseau d'assainissement est composé d'un chevelu de canalisations, de regards (ouvrages d'accès au réseau) et de divers ouvrages spéciaux. La reconstruction est constituée de deux grandes étapes : la construction du graphe orienté du réseau d'assainissement, puis sa projection sur la grille utilisée par TEB-Hydro. Il faut donc tout d'abord créer le semi de nœuds : c'est-à-dire choisir les regards et ouvrages spéciaux du réseau reconstruit. Un élément sélectionné est appelé nœud. Ensuite, on crée les arcs de connexion. Une fois le graphe orienté reconstruit, le réseau est projeté sur la grille¹ et pour toutes les mailles vierges (non parcourues par le réseau artificiel), on applique l'algorithme D8 (Jenson et Domingue, 1988) (Lotfi et al.,

¹ En annexe n°1 le diagramme des étapes de l'utilisation des outils TOHR et TEB-Hydro

2016). Il permet d'obtenir les directions d'écoulement, afin d'assurer le transfert des eaux de ces mailles vers les différents exutoires.

I.3.3.1 Les données d'entrée

Plusieurs données d'entrée sont nécessaires pour faire fonctionner l'outil.

L'espace doit être segmenté. En effet, la reconstruction se fait sous forme vectorielle, cependant la modélisation se fait ensuite grâce à un modèle maillé. Ainsi il faut intégrer cette contrainte dès le début en se basant sur une grille de mailles régulières. La résolution est choisie par l'utilisateur (i.e. : 100m, 200m, 250m, etc.).

Sont également nécessaires les données descriptives du réseau d'assainissement telles que les regards de tous les réseaux artificiels, les ouvrages spéciaux (STEU, station de refoulement, déversoirs d'orage, etc.) et, la surface de drainage par STEU.

Le réseau hydrographique naturel est l'exutoire des eaux de pluie et de points de rejets en cas de saturation du réseau.

I.3.3.2 La création du semis de nœuds

L'objectif de cette partie est de créer l'arborescence du graphe orienté du réseau d'assainissement. Cela se traduit par la sélection de l'exutoire des eaux de chaque maille de la grille (Figure 3). Elles sont drainées uniquement par un type de réseau : séparatif ou unitaire. La priorité est donnée au réseau séparatif (c'est le choix qui a été fait au regard de la zone sur laquelle va être appliquée l'outil).

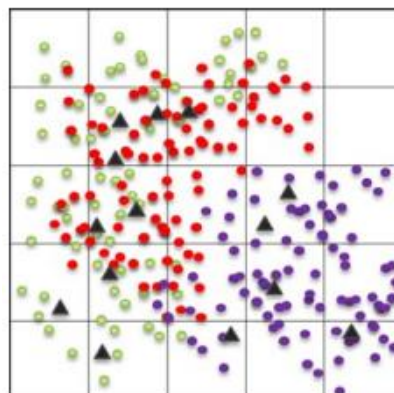


Figure 3 : Etat initial, avant la reconstruction. En vert, les regards d'eaux pluviales, en rouge les regards d'eaux usées, en violet les regards unitaires, et les ouvrages spéciaux sont représentés par les triangles noirs (Lotfi et al., 2016).

On représente en premier l'eau pluviale. Ainsi, pour chaque maille, s'il existe, on sélectionne le regard d'eaux pluviales avec la plus basse altitude. Ensuite, on choisit le regard

unitaire le plus bas dans les mailles inoccupées. Enfin, on sélectionne le regard d'eaux usées avec la plus basse altitude dans chaque maille non occupée par le réseau unitaire, mais qui peut contenir de l'eau pluviale. Ainsi à la fin de cette étape, dans une maille il peut y avoir un nœud d'eaux pluviales et/ou d'eaux usées, ou un nœud unitaire (Figure 4).

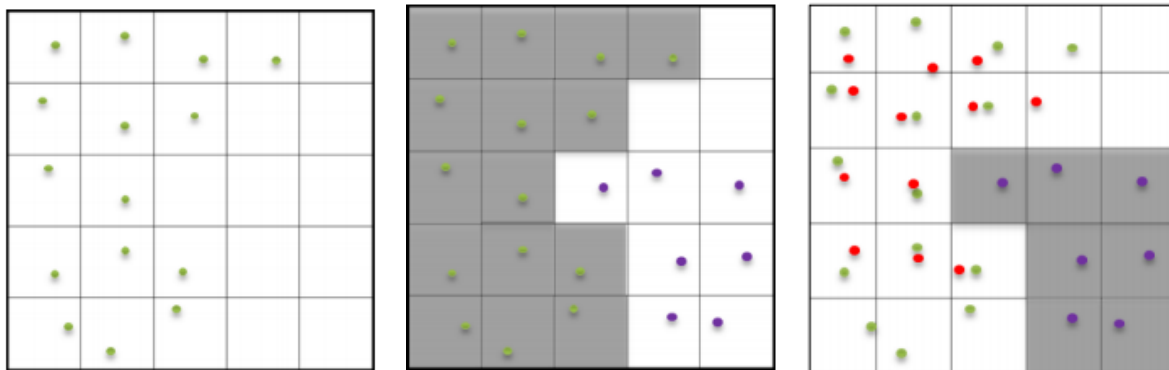


Figure 4 : Sélection des regards du réseau d'eaux pluviales, sélection des regards du réseau unitaire, sélection des regards du réseau d'eaux usées (Lotfi et al., 2016)

Ensuite, en plus des regards des différents réseaux, on sélectionne les ouvrages spéciaux : les STEU, les déversoirs d'orage et les stations de refoulement des eaux usées (Figure 5).

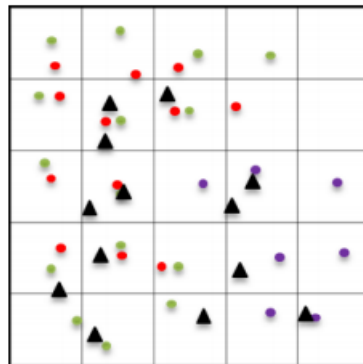


Figure 5 : Ajout des ouvrages spéciaux (Lotfi et al., 2016)

I.3.3.3 La création des connexions

Les connexions se font en deux étapes : en amont et en aval. Chaque nœud peut avoir plusieurs connexions amont, mais une seule connexion aval.

Pour les réseaux d'eaux usées et unitaires, la pente doit être positive et la longueur d'un arc de connexion ne peut excéder trois fois la résolution du maillage. Lorsque ces conditions ne sont pas respectées, la connexion se fait avec le regard le plus proche. Pour les réseaux d'eaux pluviales, la pente doit être positive et la longueur de l'arc de connexion ne doit pas

dépasser deux fois la distance entre le nœud et la rivière. Lorsque ces conditions ne sont pas remplies, la connexion se fait avec le cours d'eau naturel le plus proche.

De plus, des conditions de connexion sont mises en place afin de vérifier l'utilité des ouvrages spéciaux à la résolution à laquelle on reconstruit le réseau. Si elles ne sont pas respectées l'ouvrage est supprimé.

Pour les stations de refoulement, en amont, la station est connectée au regard le plus bas présent dans la même maille. En aval, la pente de l'arc doit être négative afin de permettre de remonter les eaux et l'arc de connexion avec le regard suivant doit être inférieur à trois fois la résolution de la grille.

En ce qui concerne les déversoirs d'orage, en amont la connexion est faite avec le regard de plus basse altitude appartenant à la même maille. En aval, la connexion se fait avec le cours d'eau naturel ou le tronçon d'eaux pluviales le plus proche.

On ne prend pas en compte l'altitude des STEU puisqu'elles constituent les exutoires finaux.

Finalement, des tables de « lignes interdites » sont aussi à mettre en place. Ces dernières sont positionnées sur le réseau hydrographique naturel. Elles vont empêcher la création de connexions traversant les rivières, qui n'existent pas en réalité, lors de la reconstruction. En effet, il est très rare que le réseau d'assainissement traverse les cours d'eau. Ainsi il y a une table de lignes interdites pour les eaux pluviales, et une seconde pour les eaux usées et les eaux du réseau unitaire.

I.3.3.4 La projection du graphe orienté du réseau d'assainissement sur la grille maillée

La projection, qui est l'ultime étape de TOHR, permet de passer d'objets vectoriels à des informations raster. En effet, toutes les informations sont projetées sur la grille maillée qui est ensuite utilisée pour le modèle hydro-climatique TEB-Hydro. Ainsi on associe à chaque maille le type de réseau qui la traverse (eaux pluviales et/ou eaux usées, ou unitaire), son exutoire direct, la distance à cet exutoire et l'exutoire aval éventuel de chaque exutoire et la distance qui les sépare.

Pour toutes les mailles non connectées au graphe orienté et non parcourues par le réseau hydrographique naturel, on utilise l'algorithme D8 (O'Callaghan et Mark, 1984) pour déterminer le cheminement de l'eau de ces mailles jusqu'à un exutoire. On parle de cheminement de l'eau en versant (écoulements en surface qui suivent la plus forte pente).

L'algorithme est basé sur des calculs de dénivelées entre le centre d'une maille et le centre de ses mailles voisines. La plus forte pente est sélectionnée. Ce processus est réitéré jusqu'à atteindre une maille dotée d'un exutoire d'eaux pluviales : un regard d'eaux pluviales, unitaire ou une rivière (Figure 6).

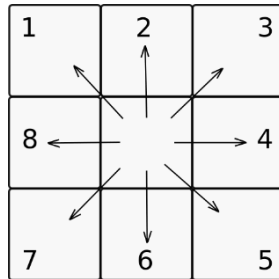


Figure 6 : Schéma de calcul du cheminement de l'eau en versant avec l'algorithme D8 (Jenson et Domingue, 1988)

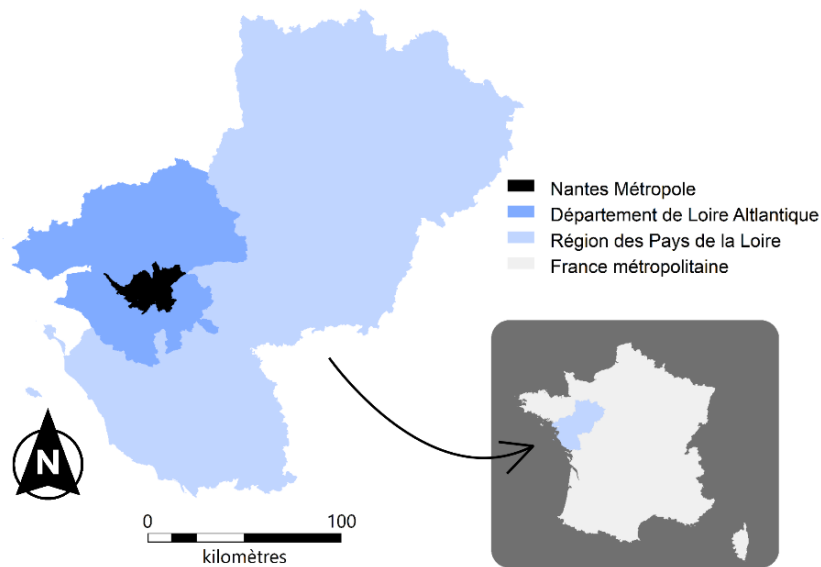
II Application de l'outil TOHR à la zone sud de Nantes Métropole

Dans le cadre de ce travail de fin d'étude, nous avons projeté d'utiliser l'outil de modélisation TEB-Hydro sur une partie de l'agglomération nantaise, située au sud de la Loire. De taille raisonnable, la zone a été choisie conjointement pour correspondre à mon stage et à celui portant sur l'analyse des documents réglementaires (Chavez, 2020) qui ont été menés concomitamment. Ainsi, la reconstruction des réseaux d'assainissement, va s'effectuer grâce à l'outil TOHR (Allard, 2015 ; Lotfi et al., 2016) sur cette zone d'étude. Cette étape préalable essentielle permet de représenter de manière homogène et simplifiée les écoulements des eaux en zone urbaine.

II.1 Présentation du secteur d'étude

II.1.1 Nantes Métropole

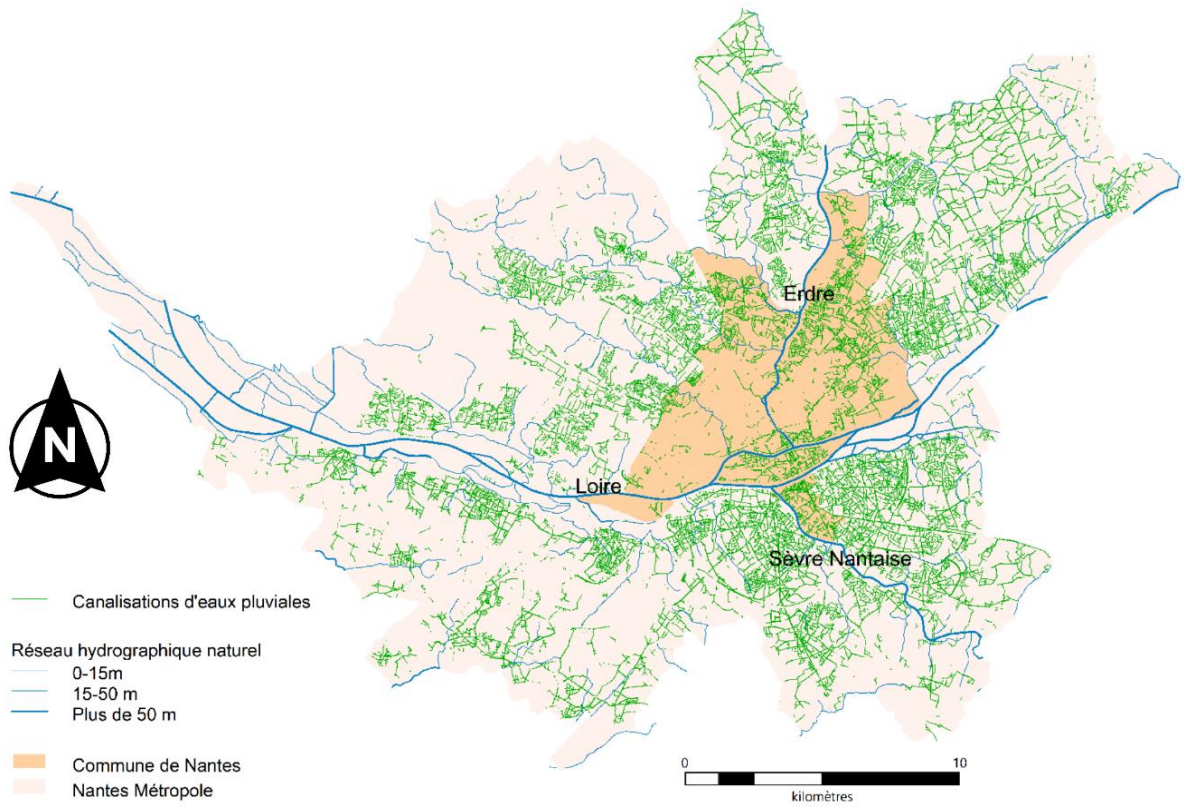
Nantes Métropole est un EPCI (Etablissement Public de Coopération Intercommunal) français composé de vingt-quatre communes. Il est situé dans le département de Loire-Atlantique en région Pays de la Loire (Carte 1).



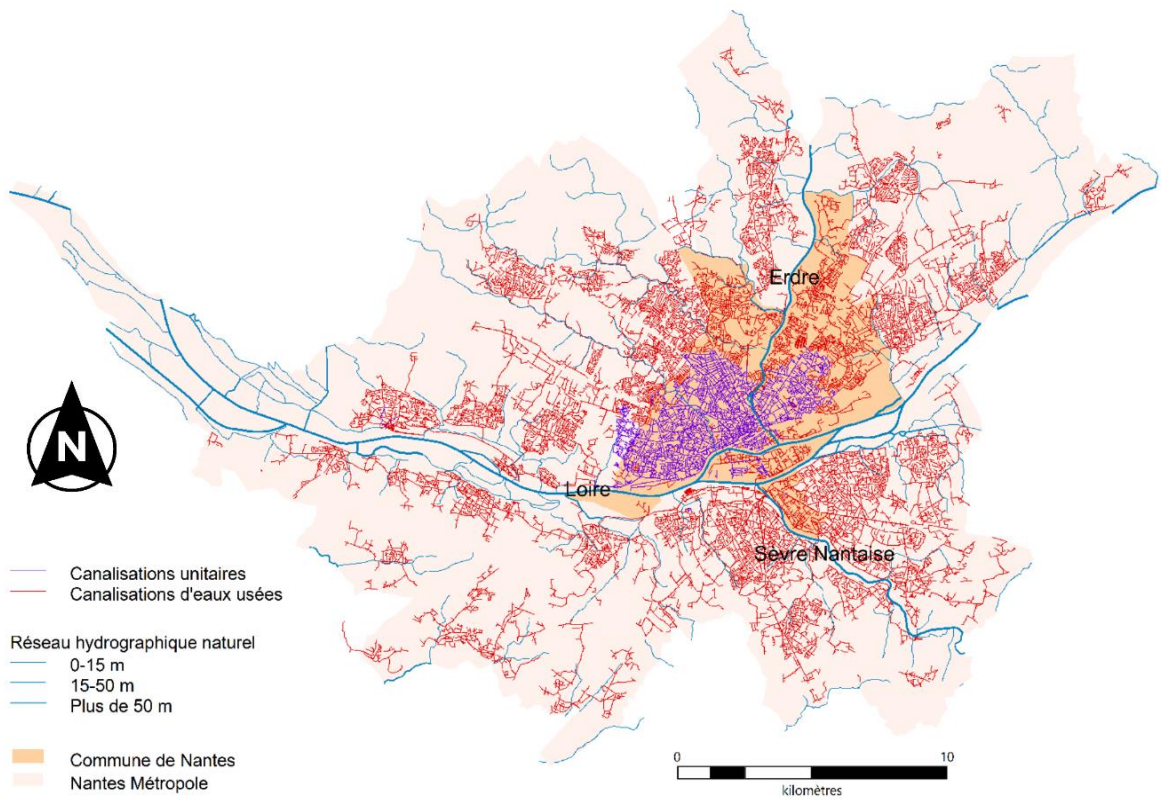
Carte 1 : Localisation de Nantes Métropole

Plus de la moitié du territoire est constituée d'espaces naturels et agricoles et 30% de sa superficie est urbanisée. La métropole nantaise compte 638 931 habitants, avec une augmentation d'environ 44 000 habitants entre 2011 et 2016 (INSEE, 2016). L'agglomération est traversée par un réseau hydrographique important de plus de 600 kilomètres de cours d'eau, dont les principaux sont la Loire, l'Erdre et la Sèvre Nantaise. Elle est notamment constituée de 9 250 hectares de zones humides (prairies humides, marécages, roselières, etc.) dont quatre d'intérêt majeur : le marais de Goulaine, l'estuaire de la Loire, le lac de Grand-Lieu et le marais de Mazerolles (Zonage d'assainissement des eaux usées, Nantes Métropole, 2019).

Nantes Métropole est composée d'un réseau de collecte unitaire dans le centre ancien de Nantes et d'un réseau de collecte séparatif en périphérie. Elle est traversée par un linéaire de 4486 kilomètres de réseau de collecte. Il y a ainsi 1939 kilomètres de réseaux d'eaux usées, 2187 kilomètres de réseaux d'eaux pluviales et 360 kilomètres de réseaux unitaires (Rapport annuel sur l'eau de Nantes Métropole, 2018) (Cartes 2 et 3).



Carte 2 : Réseau d'assainissement des eaux pluviales de Nantes Métropole

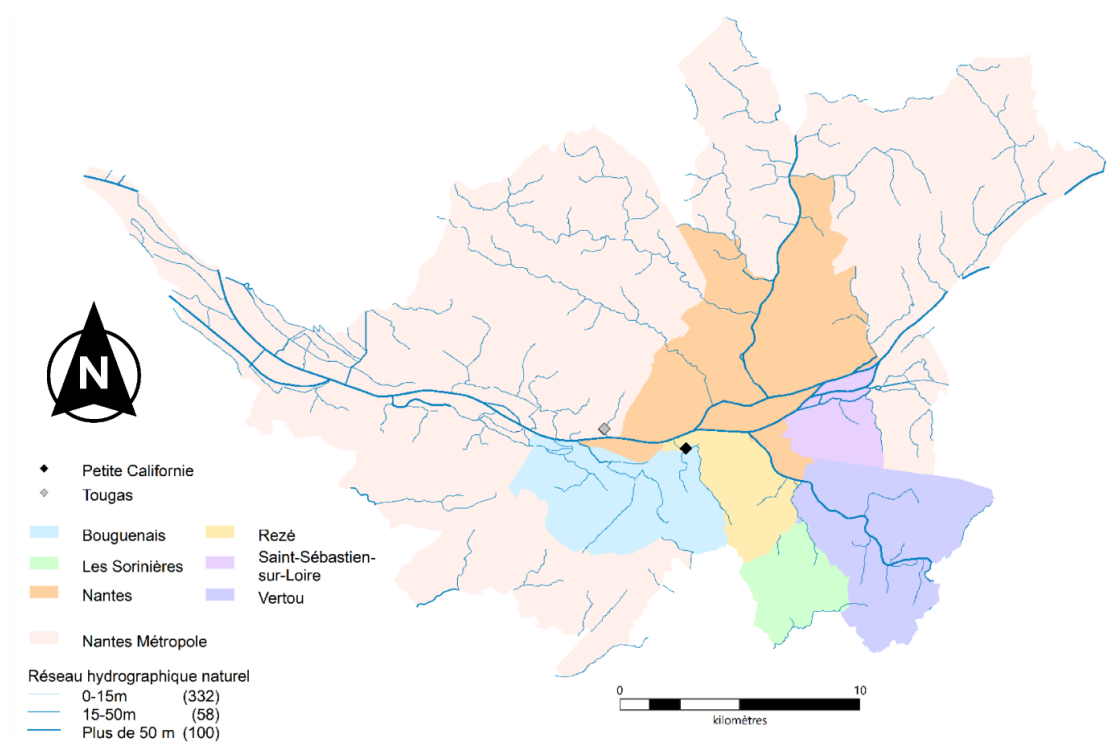


Carte 3 : Réseaux d'assainissement des eaux usées et unitaires de Nantes Métropole

Ces réseaux sont équipés de divers ouvrages spécifiques. En effet, on dénombre 25 STEU sur le territoire de l'EPCI, qui traitent plus de 56 millions de mètres cubes d'eau (Rapport annuel sur l'eau de Nantes Métropole, 2018). Il y a également de nombreux déversoirs d'orage, des stations de refoulement des eaux usées et des stations de relevage des eaux pluviales.

II.1.2 Zone d'étude : le secteur sud-Loire

Nous avons étudié une zone au sud de la Loire. En effet, nous nous sommes intéressés à la STEU Petite Californie. Elle se situe au nord-ouest de la commune de Rezé et a été mise en service en 2011. Tougas, situé à Saint-Herblain (commune limitrophe de Nantes à l'ouest), est la première STEU de l'agglomération en matière de volumes d'eaux traités (39 millions de mètres cubes d'eau). En seconde position, se place Petite Californie (12 millions de mètres cubes d'eau) (Rapport annuel sur l'eau de Nantes Métropole, 2018). Elle draine les eaux usées et les eaux du réseau unitaire de diverses communes : Bouguenais, Rezé et Saint-Sébastien-sur-Loire. Elle constitue aussi l'exutoire des eaux de la partie sud de Nantes, tandis que les eaux du secteur nord sont acheminées vers Tougas (Carte 4). De plus, elle draine la majorité des territoires de Vertou et Les Sorinières, qui possèdent aussi des stations de plus petite capacité. La zone d'étude a ensuite été élargie en fonction de l'eau pluviale.



Carte 4 : Petite Californie, la seconde STEU en matière de capacités de Nantes Métropole

Notre choix s'est portée sur ce secteur car il est principalement parcouru par du réseau séparatif. Actuellement, ce dernier est privilégié lors de la mise en place de nouvelles

canalisations. La Directive européenne n° 91/271 du 21/05/91 relative aux traitement des eaux urbaines résiduaires a pu conduire notamment à des travaux de réhabilitation de réseaux unitaires et de mise en séparatif. De plus, la zone est vouée à évoluer en terme d'aménagements, et pas uniquement en terme de rénovation. Des constructions futures sont prévues (Chavez, 2020).

II.1.3 Les données descriptives utilisées

Plusieurs données SIG ont été utilisées afin d'analyser et de définir le secteur choisi. Ainsi, nous nous sommes intéressés aux données du réseau d'assainissement (canalisations et regards) et à celles du réseau hydrographique naturel (cours d'eau).

II.1.3.1 Les données du réseau d'assainissement

La base de données urbaines de Nantes Métropole répertorie l'ensemble des données géographiques décrivant le territoire. De nombreuses données sont transmises à l'Université Gustave Eiffel par le biais d'une convention d'échange avec Nantes Métropole. Elle a été remise à jour en Décembre 2019. Ainsi de nombreuses données ont été partagées notamment celles modélisant la voirie, les espaces verts, les rivières, le réseau d'assainissement. Ce dernier est constitué de canalisations et de regards. Ce sont des données vectorielles sous formes de tronçons et de points. Ces éléments possèdent de nombreuses informations attributaires, dont un numéro d'identifiant.

Pour les tronçons, il est notamment possible de les différencier selon le type de réseau : séparatif ou unitaire. Leur diamètre est renseigné, le nom de la STEU à laquelle ils sont reliés aussi. Il y a aussi des informations sur le statut du tronçon (public ou privé), ainsi que ses altitudes de radier (fond de la canalisation) amont et aval, qui sont fournies dans le système de référence RGF93 (Réseau Géodésique Français de 1993) et dans le système NGF (Nivellement Général de la France).

Concernant les regards, on peut également les différencier selon le type de réseau. Il y a des informations, sur leurs dimensions, leur forme (rectangulaire ou circulaire). Les altitudes de radier (fond de l'ouvrage) et tampon (couvercle, au niveau du terrain naturel), dans le système RGF93 et dans le système NGF sont aussi renseignées.

II.1.3.2 Le réseau hydrographique naturel

L'agglomération nantaise est traversée par de nombreuses rivières et cours d'eau, qui constituent les exutoires des eaux pluviales et du réseau unitaire en cas de saturation du réseau.

Les données descriptives du réseau hydrographique naturel traversant le territoire, sont issues de la BD Carthage de l'IGN. Cette dernière recense les entités ayant trait à l'hydrographie de la France Métropolitaine et des départements d'outre-mer. Elle est produite à partir des données cartographiques (BD CARTO) de l'IGN.

Elle est composée d'objets linéaires comme les cours d'eau et les tronçons hydrographiques (portion de cours d'eau), d'objets ponctuels tels que les nœuds hydrographiques (modifications de l'écoulement de l'eau : chutes d'eau, embouchures, etc.), et d'objets surfaciques tels que les régions hydrographiques (premier niveau de découpage en bassins versants élémentaires), etc. Nous nous intéresserons principalement aux tronçons hydrographiques. Les données sont disponibles à l'échelle de la région. Celles concernant le Pays de la Loire ont été mises à jour en octobre 2019. Ce sont des données vectorielles auxquelles de nombreux attributs sont liés. Ainsi on peut notamment connaître l'état d'un tronçon, sa largeur, sa nature (cours d'eau naturel, canal, chenal, etc.), s'il est navigable, et le sens de l'écoulement des eaux.

II.2 Méthodologie de définition du périmètre d'étude

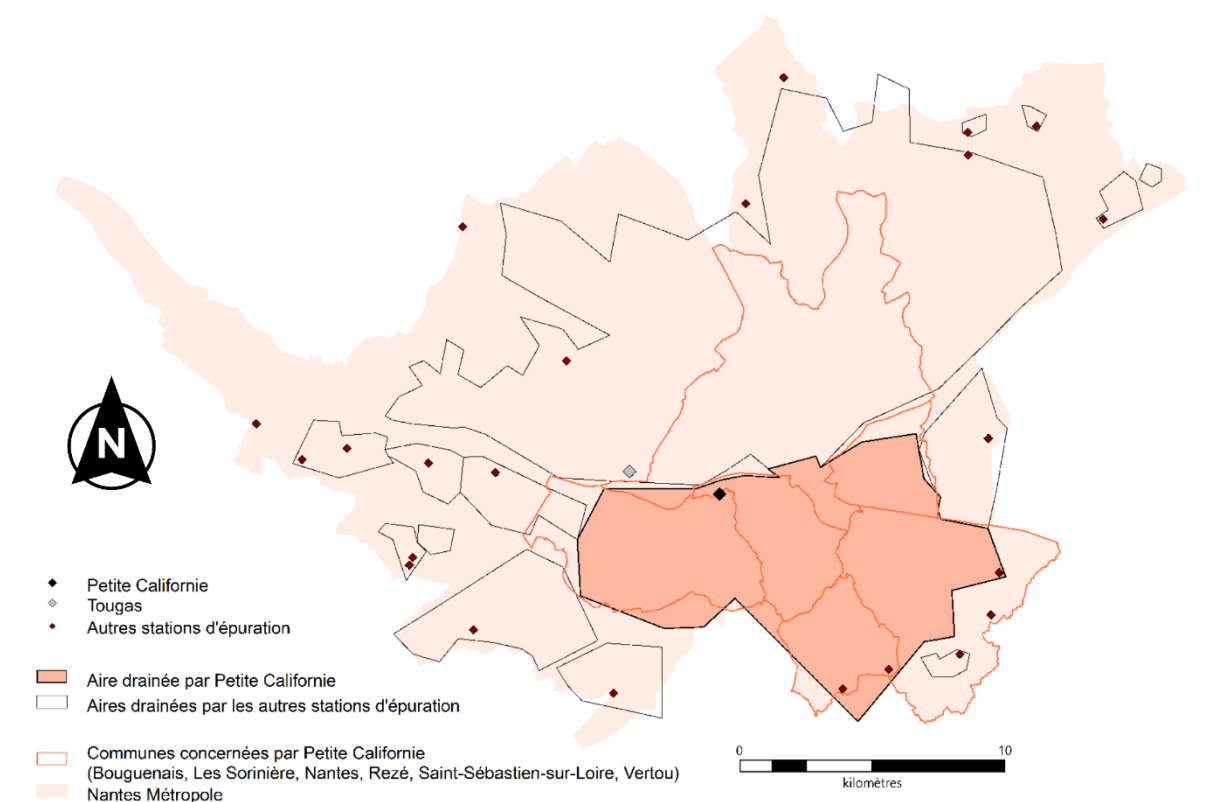
Nous avons choisi de travailler uniquement sur le sud du territoire métropolitain. Il a donc été nécessaire de définir correctement la zone d'étude. Elle a été définie en deux temps. La première étape a consisté à définir correctement l'aire drainée par la STEU Petite Californie, qui concerne les réseaux d'eaux usées et unitaires. Dans un second temps nous nous sommes intéressés aux eaux pluviales et à leur périmètre de drainage.

MapInfo est le logiciel SIG avec lequel les diverses données ont été étudiées et traitées car TOHR a été développé sous MapInfo, en langage MapBasic. Le système de coordonnées de travail est le système français Lambert 93.

II.2.1 Aire drainée par la STEU Petite Californie

La STEU Petite Californie, située dans la commune de Rezé traite les eaux usées et les eaux du réseau unitaire de diverses communes : Bouguenais, Les Sorinières, Nantes (partie sud de la commune), Rezé, Saint-Sébastien-sur-Loire et Vertou.

La table « STEP_Surf_L93 » recense quinze aires drainées (objets polygonaux) par les différentes STEU du territoire métropolitain (Carte 5) . La surface de la STEU (STEU) Petite Californie en a été extraite.

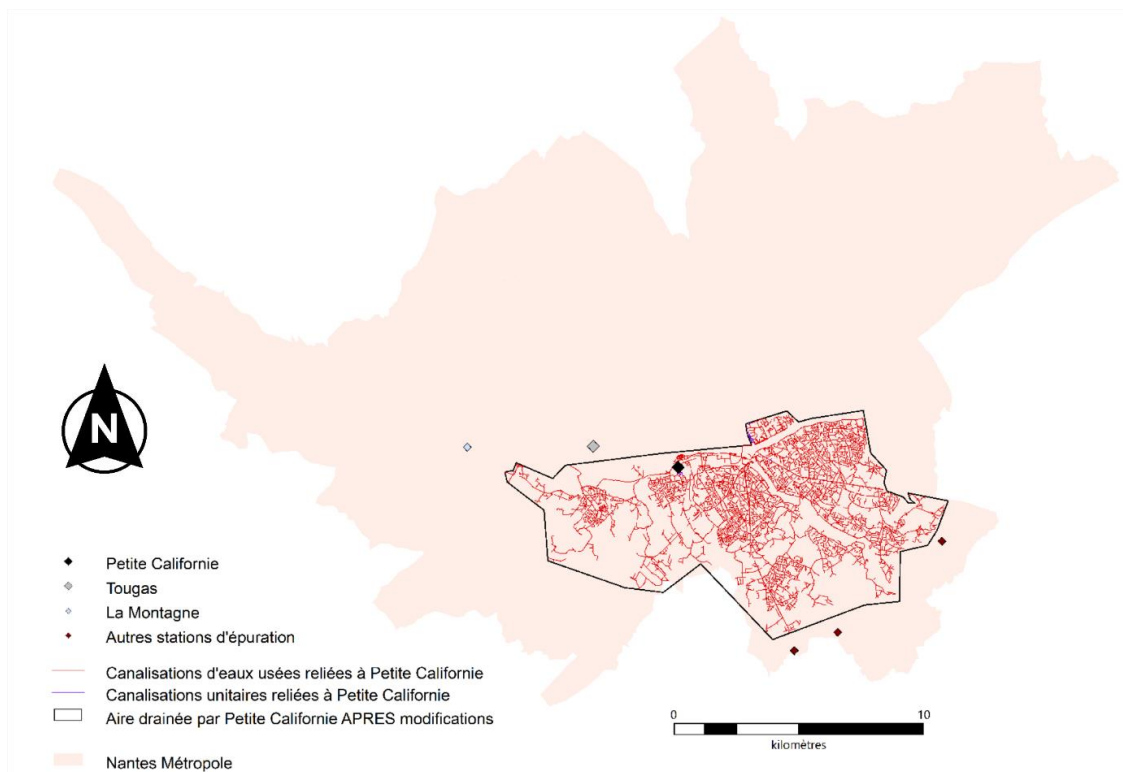


Carte 5 : Aire drainée par la STEU Petite Californie, au sud de la Loire

En premier lieu, la totalité des regards et des tronçons présents dans la surface étudiée est sélectionnée. Ces données possèdent un champ « RESEAU » qui permet de différencier les ouvrages séparatifs, c'est-à-dire d'eaux pluviales et d'eaux usées et les ouvrages unitaires. Les canalisations d'eaux pluviales n'ayant pas pour exutoire la STEU, seul les composants d'eaux usées et unitaires sont considérés dans cette partie.

L'analyse de l'aire drainée par la STEU Petite Californie a démontré que certains éléments n'y avaient pas leur place. En effet d'autres STEU, en plus de Petite Californie, sont contenues dans le périmètre. De plus, certains éléments, présents dans la zone, desservent des aires voisines. Le périmètre existant (fourni par la base de données urbaines) a donc été redélimité en fonction des divers regards d'eaux usées et unitaires de la STEU, des canalisations et des sens d'écoulements, et en fonction des autres STEU présentes. La surface a été agrandie au nord au niveau de l'Ile de Nantes et à l'ouest à la limite entre Bouguenais et La Montagne (commune voisine). Au sud et à l'est, l'aire a été réduite de manière à exclure les STEU qui étaient initialement contenues dans celle-ci (Carte 6).

Une fois l'aire drainée correctement définie, certains regards et canalisations d'eaux usées à l'ouest de la zone ont été exclus, ceux-ci étant reliés à la STEU voisine (La Montagne).



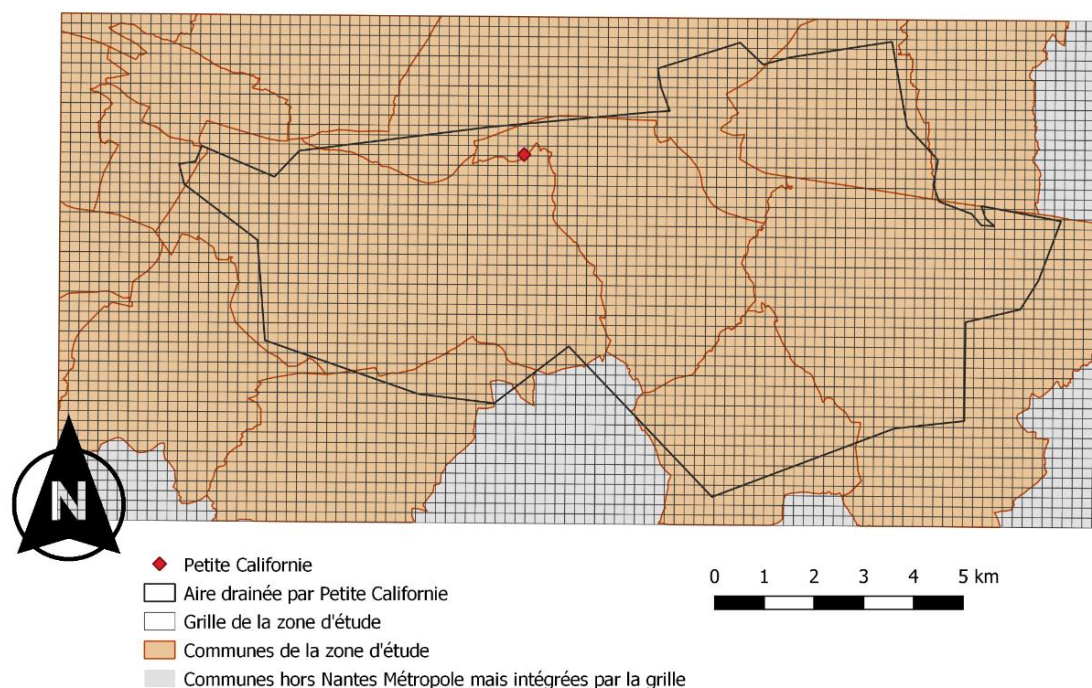
Carte 6 : Aire drainée par Petite Californie redéfinie en fonction des éléments d'eaux usées et unitaires

II.2.2 La prise en compte du réseau d'eaux pluviales

Les eaux pluviales sont prises en compte à une plus grande échelle que les eaux usées et celles du réseau unitaire. Le périmètre d'étude est donc élargi grâce à une grille de mailles régulières. Lors d'applications précédentes, une grille de résolution de 200 mètres, couvrant l'agglomération nantaise a été créée grâce à un outil SIG (logiciel MapInfo). Elle a été redécoupée en fonction de l'aire drainée par la STEU Petite Californie, du réseau hydrographique du territoire, des regards et des tronçons (sens d'écoulement) des eaux pluviales.

Ainsi d'autres communes sont englobées dans la zone d'étude (Carte 7) : La Montagne et l'Indre au nord-ouest, Bouaye et la partie nord de Saint-Aignan-de-Grandlieu au sud et une partie de Basse-Goulaine au nord-est. Il y a aussi quelques petites portions d'autres communes au nord (Brains, Couëron, etc.) Mais seuls leurs réseaux d'eaux pluviales sont concernés.

De plus, quelques fractions de territoires n'appartenant pas à Nantes Métropole sont englobées par la grille (au sud). Mais ces secteurs ne seront pas pris en considération dans les traitements, ni dans les études.



Carte 7 : Zone d'étude finale

II.3 Reconstruction du réseau d'assainissement de la zone sud de Nantes Métropole

La première étape de la reconstruction du graphe orienté du réseau d'assainissement a été de créer le semis de nœuds. Ensuite d'établir les connexions entre les nœuds d'eaux usées et unitaire. Et finalement les connexions entre les nœuds d'eaux pluviales ont été établies.

II.3.1 La préparation des données d'entrée de TOHR

Une étude des différentes données SIG dont nous disposons a été effectuée afin de comprendre le fonctionnement hydrologique (réseau d'assainissement et réseaux naturels) du secteur. Ensuite, les données d'entrée nécessaire à l'outil ont été préparées (sous formes de plusieurs tables).

La première échelle de travail est celle de l'agglomération. Et dans un premier temps, nous nous sommes intéressés au réseau d'assainissement. Les données des canalisations d'eaux de Nantes Métropole sont recensées dans une seule table. Les objets ont donc été répartis en trois tables en fonction de leur type de réseau : eaux pluviales, eaux usées, eaux du réseau unitaire. Ensuite pour les regards, la table regroupe les regards classiques, qui ont été classés en fonction du type de réseau, et les ouvrages spéciaux. Pour ces derniers plusieurs tables ont été mises en place afin de séparer STEU, déversoirs d'orages, stations de relèvement et stations de refoulement.

Seules les stations de refoulement des eaux usées sont gérées par THOR, les stations de relèvement des eaux pluviales ne le sont pas. Elles sont peu nombreuses, on en compte 14 sur toute l'agglomération (Rapport annuel sur l'eau de Nantes Métropole, 2018). Elles sont principalement regroupées au centre de Nantes.

Ensuite les tables préalablement créées ont été ajustées afin de correspondre à l'échelle de la zone d'étude. Pour cela nous avons utilisé deux tables : celle de l'aire drainée par la STEU Petite Californie et la celle de la grille maillée. Nous avons uniquement conservé les objets liés aux eaux usées et à celles du réseau unitaires contenus dans le périmètre de la STEU, et les objets liés aux eaux pluviales contenus dans la grille.

Les canalisations servent à mieux comprendre l'hydrologie de la zone d'étude mais ne seront pas utilisées en entrée pour TOHR. Les canalisations d'eaux pluviales sont superposées au réseau hydrographique naturel. En étudiant le sens d'écoulement des eaux on observe que la majorité du réseau d'assainissement d'eaux pluviales est rejeté dans la Loire et ses affluents. Et que la partie sud-est est davantage drainée par le lac de Grand-Lieu.

Le secteur d'étude n'est que très peu parcouru par le réseau d'assainissement unitaire, en effet on compte 91 objets dans la table des canalisations et 98 dans celle des regards. Ils sont majoritairement dans la partie sud de Nantes sur l'île de Nantes et, au nord-est de Bouguenais.

Les déversoirs d'orage équipent le système d'assainissement unitaire, ils permettent d'éviter la saturation du réseau lors d'évènement pluvieux et le trop plein est rejeté dans le milieu naturel. La zone comptabilise 28 de ces ouvrages spéciaux. Cependant les objets en question sont sur des canalisations d'eaux usées et permettent le déversement des eaux dans le réseau d'eaux pluviales (Figure 7).

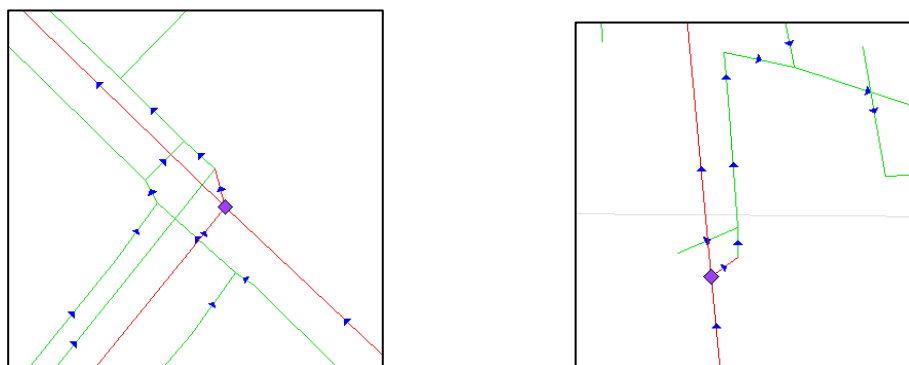


Figure 7 : Exemple de déversoirs équipant le réseau d'eaux usées et étant relié au réseau d'eaux pluviales. Les canalisations rouges représentent les eaux usées et les vertes les eaux pluviales. Le losange violet représente les déversoirs.

Il ne s'agit donc pas réellement de déversoirs d'orage, mais de déversoirs à seuil fixe (les eaux ne sont pas rejetées dans le milieu naturel mais dans des canalisations d'eaux pluviales). Ce type d'ouvrage spécial n'est pas pris en compte par l'outil TOHR. Il n'y a donc aucun déversoir d'orage à proprement parlé sur la zone d'étude.

Ensuite, les champs des différentes tables ont été examinés. Par la suite plusieurs modifications ont été apportées sur les types des champs qui ne sont pas corrects. Par exemple, le champ « Rad_ign » correspond à l'altitude de radier des regards ou canalisations et dans les données fournies il est de type « chaîne de caractères » ; nous l'avons donc modifié en nombre décimal. Ce champ est important, il renseigne l'altitude des regards et il permet la sélection d'un unique regard par maille (cf I.3.3.2)

Les altitudes de radier des regards ont aussi été étudiées afin de s'assurer de l'exhaustivité des données. Les données sont de bonne qualité, le manque d'information est faible et réparti de manière homogène sur le territoire étudié (cf II.3.3).

L'outil TOHR nécessite de nombreuses tables en entrée (Tableau 1), notamment la table des distances entre les regards d'eaux pluviales et le réseau hydrographique le plus proche. Deux tables de lignes interdites (pour les eaux pluviales et pour les eaux usées et du réseau unitaire) sont également mises en place : elles sont sur le réseau naturel et empêchent la création de connexions traversant les cours d'eau et qui n'existent pas en réalité.

Noms des tables d'entrée	Objets contenus
Regard_EP	Regards d'eaux pluviales contenus dans la grille maillée
Regard_EU	Regards d'eaux usées contenus dans l'aire drainée par Petite Californie
Regard_Unitaire	Regards unitaires contenus dans l'aire drainée par Petite Californie
Station_refoulement	Stations de refoulement contenues dans l'aire drainée par Petite Californie
Deversoirorage	Déversoirs d'orage contenus dans l'aire drainée par Petite Californie
STEP	STEU Petite Californie
STEP_Surf	Aire drainée par la STEU Petite Californie
Grille_200m	Grille maillée de résolution 200m
LignesInterdites	Lignes interdites d'eaux usées et du réseau unitaire
LignesInterditesEP	Lignes interdites d'eaux pluviales
Dist_Regard_Riviere	Distances entre les regards et les sommets du réseau hydrographique naturel

Tableau 1 : Tables initiales nécessaire à l'utilisation de TOHR

II.3.2 Méthodologie de mise à jour de l’outil de reconstruction des réseaux hydrographiques

En tout premier lieu, il y a eu un travail de compréhension : il a fallu prendre en main le code ainsi que le langage MapBasic.

La dernière version de TOHR a été utilisée dans le cadre du projet PIREN- Seine sur la région Parisienne (Lotfi et al., 2016). Plusieurs modifications ont été apportées afin de pouvoir l’appliquer à Nantes Métropole. La première constatation évidente est que les données d’entrées ne sont pas issues des mêmes bases de données. Ainsi il y avait plusieurs différences : des types et libellés de champs différents mais avec une même fonction, des champs manquants et/ou en plus. Aussi, il y a eu tout un travail d’adaptation du code à ces disparités.

II.3.3 La reconstruction des nœuds

L’outil reconstruit les nœuds d’eaux pluviales, puis après ceux unitaires et d’eaux usées, et enfin les ouvrages spéciaux.

Dans un premier temps la totalité des éléments (regards « classiques » et ouvrages spéciaux) a été utilisée : 43 912 regards d’eaux pluviales, 16 819 regards d’eaux usées, 24 regards unitaires, 118 stations de refoulement des eaux usées, la STEU Petite Californie et aucun déversoir d’orage. Suite à cette première reconstruction, 2854 regards d’eaux pluviales et 1556 regards d’eaux usées sont sélectionnés. Aucun regard unitaire n’est reconstruit. En effet, ils sont initialement très peu nombreux sur le périmètre étudié. De plus, chaque maille de la grille contient un unique type de réseau et le réseau séparatif est privilégié.

Parmi les données d’entrée de l’outil, quelques éléments ne possèdent pas d’altitude de radier (elle n’est pas connue) : 23% des regards d’eau pluviales et 14% des regards d’eaux usées sont concernés. La valeur 0,00 m a automatiquement été attribuée à ces objets (pour qu’ils puissent être traités). Donc des regards qui n’avaient pas l’altitude renseignée ont pu être reconstruits car leur altitude est plus faible que celle des autres regards de la maille (Tableau 2).

	Regards d'eaux pluviales	Regards d'eaux usées
Nœuds sélectionnés	2854	1556
Nœuds sélectionnés sans altitude	2192	844
Taux de nœuds sélectionnés sans altitude (%)	76,8	54,2

Tableau 2 : Des pourcentages élevés de nœuds sélectionnés sans altitude

Ces taux sont relativement élevés. Mais les données fournies par Nantes Métropole suite à la dernière convention (2019), sont de relativement bonne qualité. La proportion d'éléments initiaux n'ayant pas d'altitude renseignée est faible et ils sont répartis de manière homogène sur le périmètre d'étude. De plus, dans la majorité des mailles comprenant un regard sans altitude, il y a plusieurs regards d'altitude connue. La grille de la zone d'étude est composée de 5355 mailles. La totalité des regards d'eaux usées est répartie sur 1556 mailles et la totalité des regards d'eaux pluviales est répartie sur 2854 mailles. Seules 42 mailles sur 1556 contiennent uniquement des regards d'eaux usées n'ayant pas d'altitude. Et seules 310 mailles sur 2854 contiennent uniquement des regards d'eaux pluviales n'ayant pas d'altitude. Ainsi 3% des mailles qui comprennent des regards d'eaux usées n'ont aucune d'information sur l'altitude et 11% des mailles qui comprennent des regards d'eaux pluviales n'ont aucune d'information sur l'altitude.

Au regard de ces pourcentages relativement bas, il a été décidé de supprimer parmi les données d'entrée tous les regards n'ayant pas d'altitude et de relancer la reconstruction. Ainsi, en supprimant des données initiales tous les regards n'ayant pas d'altitude, il y aura une « perte d'information » de seulement 3% pour l'eau usée et de 11% pour l'eau pluviale.

Suite à cette première reconstruction, concernant les ouvrages spéciaux, la totalité les stations de refoulement est reconstruite. Cependant ces dernières posent problème puisque trois mailles de la grille contiennent chacune deux ouvrages (Figure 8). Cela provient de la position de la grille, les ouvrages se trouvant en limite. Ainsi, il est nécessaire d'ajouter une condition de sélection des stations de refoulement dans le code pour les mailles qui en contiennent plus d'une. La sélection de l'ouvrage se fera en fonction de sa distance au regard d'eaux usées reconstruit, présent dans la même maille : on garde la station de refoulement la plus proche du regard d'eaux usées reconstruit et on supprime l'autre.

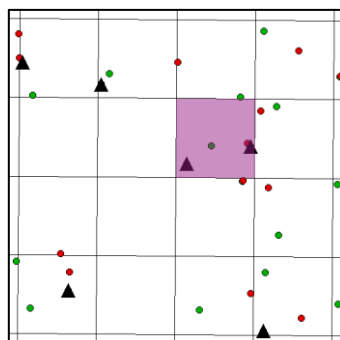


Figure 8 : Résultats de la première reconstruction : deux stations de refoulement appartiennent à la même maille. Les points verts représentent les regards d'eaux pluviales, les points rouges représentent les regards d'eaux usées et les triangles noirs représentent les stations de refoulement.

Suite aux premiers résultats obtenus, une seconde reconstruction des nœuds a été lancée en utilisant seulement les regards ayant une altitude renseignée et en ajoutant la condition de sélection des stations de refoulement. Il y a donc initialement 33 873 regards d'eaux pluviales, 14 484 regards d'eaux usées, 14 regards unitaires, 118 stations de refoulement des eaux usées la STEU Petite Californie, et aucun déversoir d'orage. Ainsi, 2544 regards d'eaux pluviales et 1515 regards d'eaux usées sont sélectionnés. Aucun regard unitaire n'est reconstruit. Et il y a 115 stations de refoulement des eaux usées reconstruites, le problème des doublons a été traité (Figure 9).

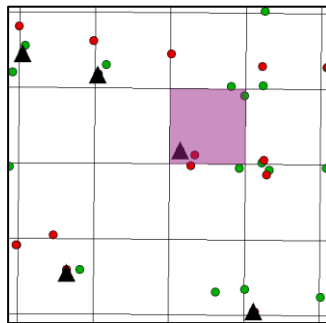


Figure 9 : Résultats de la reconstruction après ajout de la condition de sélection des stations de refoulement dans le code TOHR. Les points verts représentent les regards d'eaux pluviales, les points rouges représentent les regards d'eaux usées et les triangles noirs représentent les stations de refoulement.

II.3.4 Les arcs de connexions des réseaux artificiels

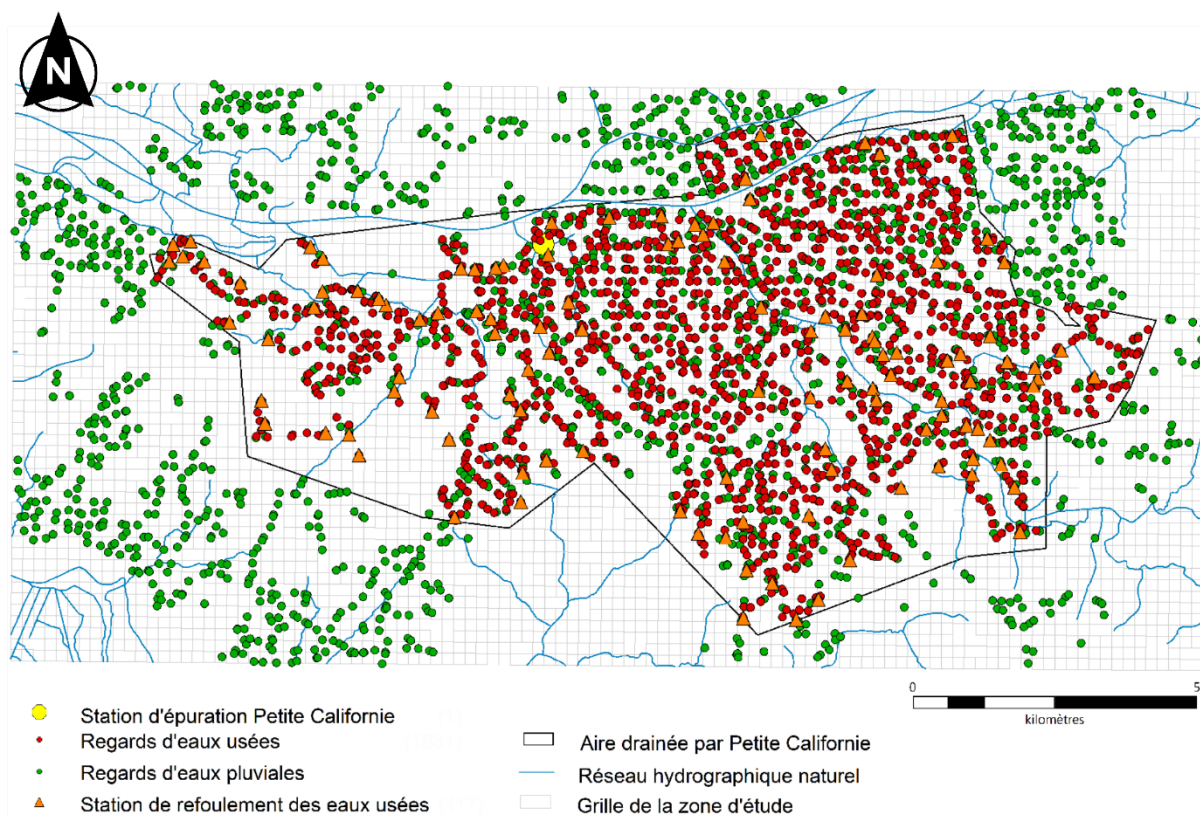
La création des arcs des eaux usées est réalisée dans un premier temps. Puis ce sont les arcs des eaux pluviales qui sont construits.

Suite à la première reconstruction des arcs d'eaux usées, il apparaît que cinq mailles de la grille contiennent une station de refoulement mais pas de nœud d'eaux usées, ainsi la connexion amont ne se fait pas correctement (en amont, la station de refoulement des eaux usées doit se connecter au regard appartenant à la même maille). Trois d'entre elles ne sont pas utiles (à cette résolution) et peuvent donc être supprimées. Les deux autres sont en limite de maille et peuvent donc être déplacées dans la maille voisine qui contient un nœud d'eaux usées. De plus une station de refoulement est automatiquement supprimée (car les conditions de connexions ne sont pas remplies). Ainsi le nombre de stations de refoulement reconstruites baisse de 115 à 111 (Tableau 3). Ainsi la sélection finale des nœuds a été faite après une première tentative de leurs connexions (Carte 8).

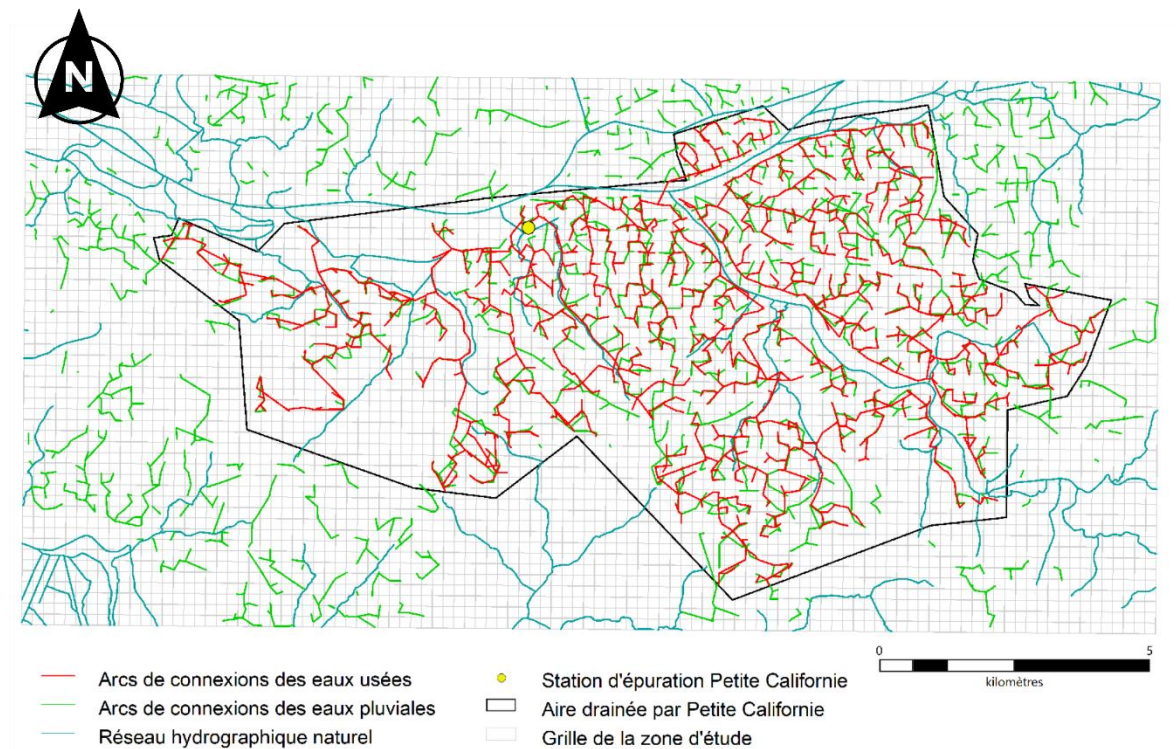
	Regards d'eaux pluviales	Regards d'eaux usées	Regards unitaires	STEU	Station de refoulement	Déversoirs d'orage
Données d'entrée	43912	16818	24	1	118	0
Nœuds sélectionnés lors de la première reconstruction	2854	1556	0	1	118	0
Nœuds sélectionnés lors de la seconde reconstruction	2544	1515	0	1	115	0
Nœuds sélectionnés lors de la troisième reconstruction	2544	1515	0	1	112	0
Résultats finaux	2544	1515	0	1	111	0

Tableau 3 : Synthèse du nombre de nœuds sélectionnés lors des diverses reconstructions

Par ailleurs, aucun arc unitaire n'a été créé puisqu'aucun regard unitaire n'a été sélectionné. Ensuite, la reconstruction des arcs d'eaux pluviales est réalisée (Carte 9).



Carte 8 : Résultats de la reconstruction finale des nœuds



Carte 9 : Résultats de la reconstruction finale des arcs

II.4 La projection du réseau sur la grille maillée

Cette étape permet d'associer à chaque maille le type de réseau qui la traverse (eaux pluviales et/ou eaux usées, ou unitaire), son exutoire direct, la distance à cet exutoire, l'exutoire aval éventuel de chaque exutoire et la distance qui les sépare.

II.4.1 La sélection des exutoires d'eaux pluviales

Le modèle hydro-climatique TEB-Hydro permet de calculer le débit au sein d'une rivière ou d'un réseau d'eaux pluviales ou unitaire (seulement la composante eau pluviale). Mais, il n'est pas possible de le calculer en tout point du réseau, c'est pourquoi un nombre fini de points est choisi qui constitueront les exutoires des bassins versants de la zone d'étude, à l'endroit desquels une chronique de débit pourra être calculée puis analysée. Les exutoires sont choisis par l'utilisateur : ils correspondent à des nœuds des réseaux artificiels sélectionnés et/ou à des nœuds du réseau hydrographique naturel. Toutefois, TEB-Hydro est un modèle d'eau pluviale, il ne prend pas en compte les eaux usées. Nous nous concentrons donc sur les exutoires du réseau d'eaux pluviales.

Les exutoires ont été choisis en fonction du réalisme des réseaux d'eaux pluviales reconstruits avec TOHR. En les comparant au réseau réel, certains réseaux ou parties de réseaux ont été écartés afin de privilégier les meilleures connexions créées.

II.4.2 Croisement avec l'analyse des documents d'urbanisme

Ce travail de fin d'étude est le préambule d'une future thèse universitaire qui aura vocation à étudier l'impact des solutions fondées sur la nature, sur les bilans hydriques et énergétiques en milieu urbain, grâce au modèle TEB-Hydro. Par ailleurs, l'expansion des structures vertes et bleues est fortement liée au cadre réglementaire urbain. Des zonages et règles d'urbanisme sont établis par les collectivités, dans le cadre de leur PLU. Ces dernières peuvent donc limiter ou au contraire favoriser l'intégration des solutions végétalisées en zone urbaine. Il sera donc nécessaire d'évaluer la compatibilité entre les documents d'urbanisme et la mise en œuvre de solutions d'adaptation à ces changements globaux.

Nantes Métropole est doté d'un PLUm (Plan Local d'Urbanisme métropolitain) qui a été instauré le 1^{er} janvier 2019. Il définit le cadre stratégique de développement à l'horizon 2030. Il s'applique sur l'ensemble du territoire métropolitain, excepté le secteur couvert par le plan de sauvegarde et de mise en valeurs du centre historique de Nantes.

Les documents d'urbanisme sont donc pris en compte dès cette étape de projection du réseau sur la grille du modèle hydro-climatique, grâce au stage de Chavez (2020) qui s'est effectué en parallèle de mon travail de fin d'étude. L'objectif étant ensuite de croiser nos travaux afin d'étudier quels secteurs sont sensibles à la mise en place de solution végétalisées et de faire des propositions d'aménagement.

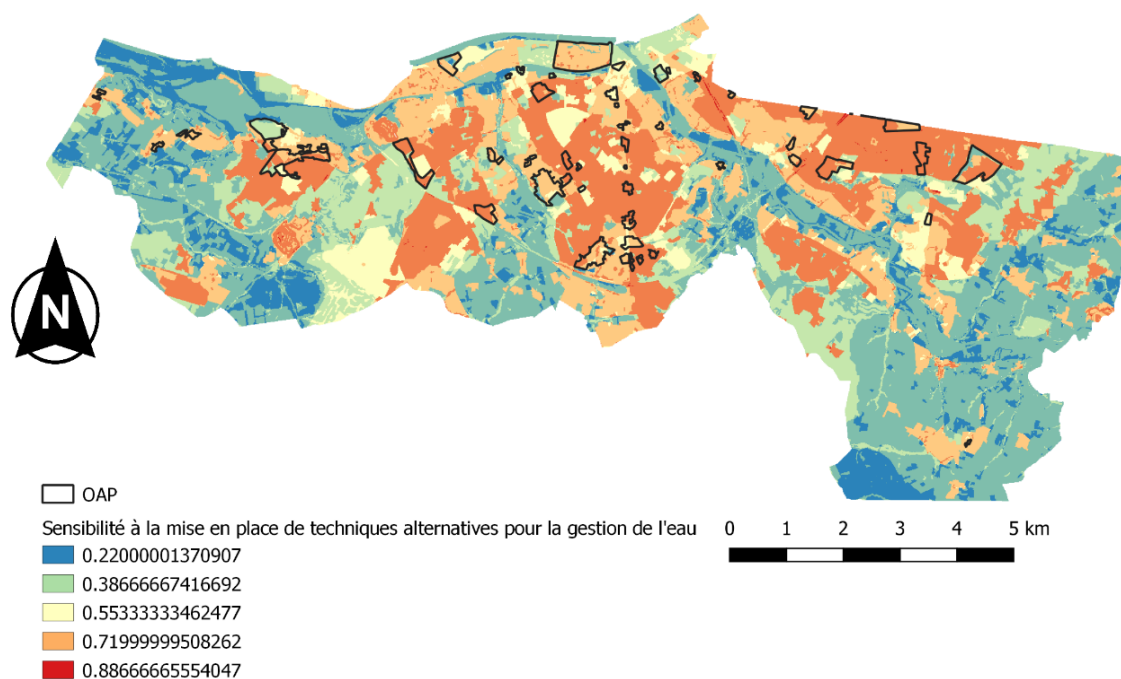
Par conséquent, les exutoires ont aussi été sélectionnés en fonction de l'analyse des documents d'urbanisme de Chavez (2020). La zone d'étude étant relativement importante, l'étude des documents d'urbanisme a été menée seulement sur certaines communes : Bouguenais, Rezé, Nantes (partie sud) et Vertou (majorité de la commune). D'après le zonage du PLUm, des évolutions urbanistiques sont prévues sur le territoire. En effet plusieurs projets sont mentionnés dans les différentes parties du PLUm, notamment dans le PADD (Projet d'Aménagement et de Développement Durable), le règlement et les OAP (Orientations d'Aménagement et de Programmation sectorielles) : des projets de densification urbaine, de développement économique, environnementaux, des OAP, etc. Et, d'après le Projet Spatialisé contenu dans le PADD, aucune construction nouvelle n'est prévue sur les autres communes (non étudiées), seules des opérations de renouvellement et rénovations sont considérées (Chavez, 2020).

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés aux OAP. Elles traduisent les objectifs du PADD à l'échelle de quartiers, de secteurs ou de portions de territoire déterminées.

Elles encadrent l'évolution de certains secteurs qui présentent des enjeux de développement et dont le périmètre est identifié dans le règlement graphique.

Les données étudiées sont issues de la base de données urbaines de Nantes Métropole et datent de 2019. Ainsi, il y a 57 secteurs d'OAP réparties sur les 4 communes précédemment citées appartenant à la zone d'étude. La plus petite fait 29 m², la plus grande fait 458 000 m² et la taille moyenne est de 50 460 m².

Ensuite, une analyse multicritères a été effectuée (Chavez, 2020), afin d'identifier les secteurs sensibles au développement urbain et à la gestion de l'eau. L'occupation du sol, la densité de population et la topographie sont les critères d'évaluation de la capacité actuelle du territoire en matière de gestion de l'eau (notamment la capacité de réguler les inondations). De plus, le zonage pluvial, le zonage d'assainissement et les zones à risques d'inondation par ruissellement permettent l'estimation de la capacité potentielle en matière d'aménagement offerte par les règles du PLUm. Et finalement, le coefficient de biotope, présent dans le zonage du PLUm a aussi été pris en compte. Il définit la part de surface éco-aménagée, c'est-à-dire végétalisée ou favorable à l'écosystème, sur la surface totale d'une parcelle considérée par un projet de construction (neuve ou rénovation). Cette analyse multicritères aura permis de produire une carte identifiant les zones favorables à la mise en place de solutions végétalisées. Les valeurs sont classées entre 0,22 et 0,88, il n'y a pas de zones totalement favorables (1) ou défavorable (0) à la mise en œuvre de techniques pour la gestion de l'eau.



Carte 10 : OAP superposées à la carte issue de l'analyse multicritères

Les réseaux d'eaux pluviales reconstruits (nœuds et arcs) ont été superposés aux cartes issues des études des documents d'urbanisme (Carte 10). Les zones les plus favorables à la gestion de l'eau et contenant des OAP se trouvent sur l'intégralité de la commune de Rezé, au centre et à l'est de Bouguenais, au nord-ouest de Vertou et dans la partie sud de Nantes.

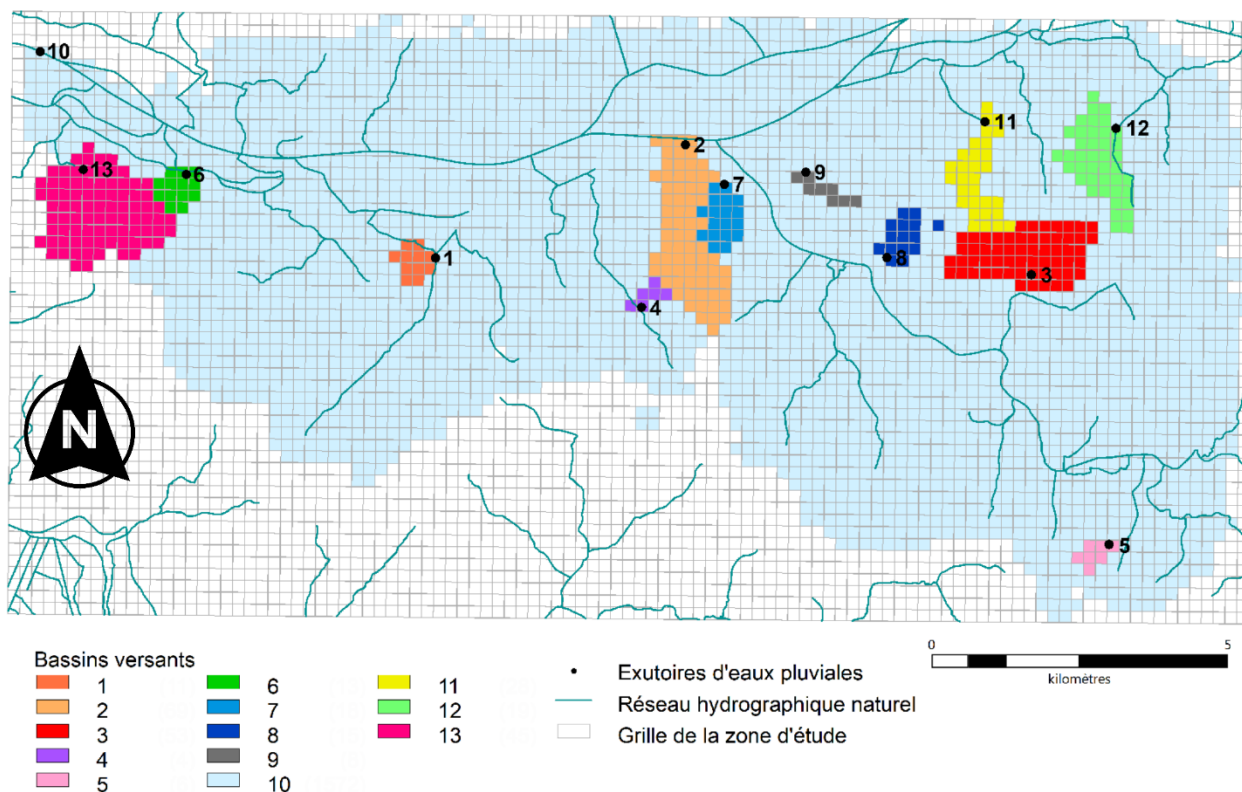
Pour résumer, les exutoires ont donc été positionnés en fonction de la reconstruction du réseau, des OAP et de l'analyse multicritères. Au nord-ouest et au nord-est sur les communes de La Montagne et de Saint-Sébastien-sur-Loire, ont également été ajoutés des exutoires afin de couvrir la grille plus largement. Au sud les eaux ne s'écoulent pas vers la Loire mais vers le lac de Grand-Lieu (au sud-ouest) qui est en dehors de la zone d'étude, aucun exutoire n'a donc été ajouté. Ainsi, 13 exutoires d'eaux pluviales ont été choisis : 12 exutoires directs et un exutoire Loire aval (Tableau 4).

Numéro	Nom		Numéro	Nom
Exutoire 1	Mandela		Exutoire 8	Ouche Catin
Exutoire 2	Ilot Mace		Exutoire 9	Mevel
Exutoire 3	La Foresterie		Exutoire 10	Loire aval
Exutoire 4	La Jaguere		Exutoire 11	Cevennes
Exutoire 5	Les Reignier		Exutoire 12	Belette
Exutoire 6	Coteaux		Exutoire 13	Belle Etoile
Exutoire 7	Lamour			

Tableau 4 : Synthèse des exutoires étudiés

II.4.3 Les bassins versants obtenus

La projection du graphe orienté sur la grille maillée, en plus de connecter les mailles de la grille entre elles, permet de délimiter les bassins versants de la zone d'étude, définis à partir des exutoires choisis (Carte 11).



Carte 11 : Bassins versants de la zone d'étude obtenus après projection

Ainsi, 12 bassins versants de tailles variables sont obtenus. Le plus petit est composé de 6 mailles, ce qui correspond à 240 000 m², et le plus grand 84 mailles, correspondant à 3 360 000 m². Le bassin versant n°10 est défini par l'exutoire Loire aval, il draine tous les autres bassins versants (qu'il contient).

II.5 Discussion des résultats

II.5.1 La reconstruction

Afin d'évaluer les résultats de la reconstruction des réseaux d'assainissement de la zone d'étude, une comparaison visuelle avec le réseau réel a été réalisée.

Il y a eu quelques erreurs de reconstruction. Dans certains cas, il devrait y avoir une connexion directement à la rivière, mais elle se fait au nœud voisin (Figure 10). Il y a une condition mise en place sur la longueur des arcs de connexions du réseau d'eaux pluviales : un arc ne peut dépasser deux fois la distance le séparant du cours d'eau du nœud à connecter. Ce problème survient ici car le réseau réel est très dense. Cette condition devrait donc peut être varier en fonction de la densité du réseau réel afin de réduire la distance dans le cas où le réseau réel est très dense (réduire à 1,5 ou à 1).

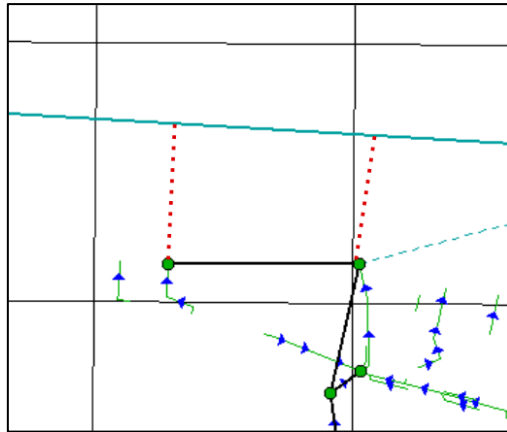


Figure 10 : Mauvaise connexion d'eaux pluviales. Les points verts sont les nœuds d'eaux pluviales sélectionnés. Les arcs noirs sont les arcs reconstruits et les arcs verts sont les canalisations du réseau réel. L'arc bleu correspond au réseau hydrographique naturel. Les arcs en pointillés rouge correspondent aux connexions qui auraient dû se créer.

Dans d'autres cas, la reconstruction est bonne même si le chemin d'écoulement de l'eau est plus long qu'il ne devrait être (Figure 11). Cependant, cela ne pose pas de réel problème. En effet, lors de l'étape de la modélisation, il est possible de jouer sur la vitesse d'écoulement par rapport à la réalité, permettant ainsi de limiter ce type d'erreurs.

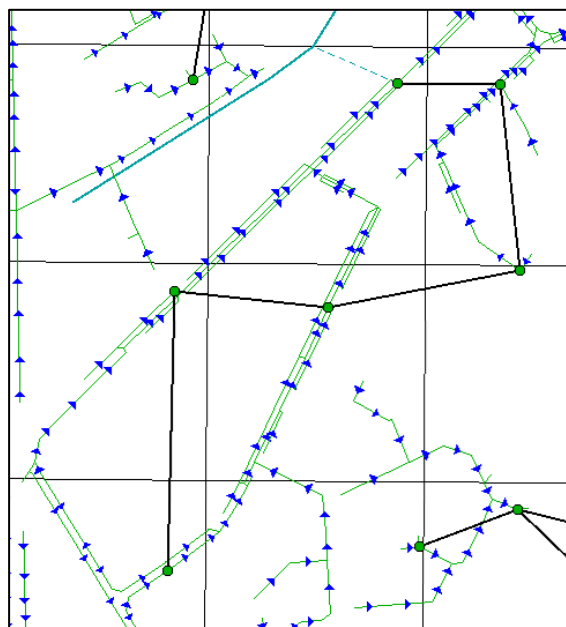


Figure 11 : Reconstruction correcte mais chemin de l'eau plus long. Les points verts sont les nœuds d'eaux pluviales sélectionnés. Les arcs noirs sont les arcs reconstruits et les arcs verts sont les canalisations du réseau réel. L'arc bleu correspond au réseau hydrographique naturel.

Par ailleurs, et donc généralement, la reconstruction est plutôt bonne (Carte 9).

II.5.2 La résolution de la grille

La résolution de 200m de la grille peut se discuter au vu de la densité du réseau d'assainissement réel de la zone d'étude. En effet la ligne de partage des eaux entre deux bassins versants (ligne de crête) peut passer au milieu d'une maille (cela s'observe grâce au sens d'écoulement des canalisations). Dans ce cas de figure, des canalisations (du réseau réel), n'appartenant pas au même réseau (n'ayant pas le même exutoire) peuvent passer dans la même maille (Figure 12). Lors de la reconstruction puisqu'un seul nœud est reconstruit par maille, l'un des réseaux va être donc être favorisé. C'est pourquoi, dans certains bassins versants, il est possible d'avoir une surestimation des eaux et dans d'autres une sous-estimation. Cette « erreur » est obligatoirement introduite par la grille. Ainsi sa résolution peut se discuter, une résolution plus fine (par exemple 100m : une maille actuelle serait divisée en quatre) aurait pu limiter l'erreur produite lorsque ce cas de figure arrive. Cependant la position de la grille rentre aussi en jeu.

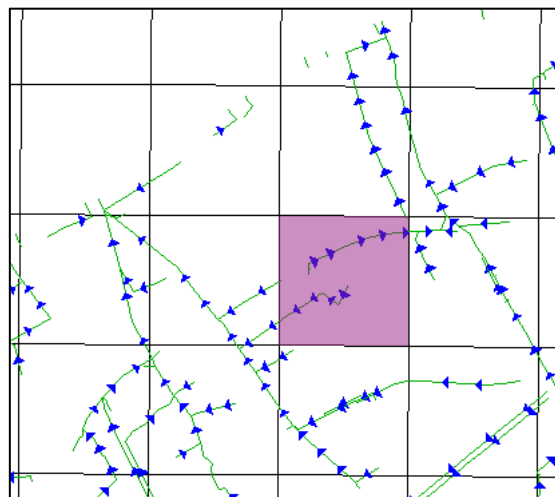


Figure 12 : Deux entrées d'eau du réseau d'eaux pluviales dans une même maille

La résolution de la grille est aussi à questionner au regard des documents d'urbanisme car les OAP présentes sur la zone d'étude sont de petites tailles et morcelées. Une maille mesure 40 000 m² et la taille moyenne des OAP est de 50 460 m² (ce qui représente 1,26 mailles). Il serait préférable de représenter une OAP par plusieurs mailles plutôt que par une seule.

Cependant, plus la résolution est fine, plus les temps de calculs avec l'outil TOHR (et le modèle TEB-Hydro) sont longs (jusqu'à plusieurs heures). Et ce travail est une étude préalable à l'application de cette méthodologie à l'échelle de toute la métropole. Des tests seraient ainsi nécessaires pour décider entre privilégier une meilleure reconstruction ou des temps de calculs raisonnables. Cependant, malgré ces quelques erreurs, l'analyse visuelle met

en évidence, pour les eaux usées, comme pour les eaux pluviales, une reconstruction du réseau globalement satisfaisante. Le réseau est simplifié et fonctionnel.

II.5.3 La projection du graphe sur la grille

Quelques données manquaient pour évaluer les divers résultats. En effet, les services de gestion de l'eau n'ont pas pu fournir les cartes de bassins versants. L'idée était de superposer les résultats obtenus suite à la projection avec les données qu'ils auraient fourni.

Les bassins versants d'eaux pluviales sont définis par le réseau d'eaux pluviales artificiel et par les écoulements en versants (algorithme D8).

Nous avons superposé le réseau reconstruit à la carte des bassins versants afin d'évaluer visuellement les résultats. Les résultats semblent corrects excepté pour celui issu de l'exutoire n°8. En effet il y a une discontinuité : une maille n'est pas prise en compte alors qu'elle devrait l'être. Dans ce cas de figure, la maille qui pose problème ne contient pas de nœud appartenant au réseau que l'on souhaite étudier. En effet, le nœud rose qui est dans cette maille, appartient à un autre réseau dont l'exutoire est différent (Figure 13). Ainsi, même si le réseau qui traverse la maille en question appartient manifestement au bassin versant de l'exutoire n°8, TOHR n'intègre pas cette maille. « L'erreur » vient donc du fait qu'il y ait un nœud d'un autre réseau. C'est donc un amélioration de l'outil qu'il faut prévoir (ajout de condition).

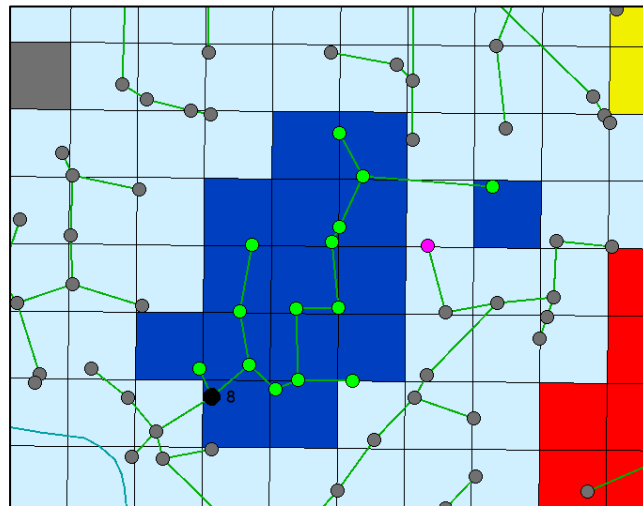


Figure 13: Bassin versant issu de l'exutoire n°8 : problème de discontinuité. Les arcs verts sont les arcs d'eaux pluviales reconstruits grâce à TOHR, le nœud noir correspond à l'exutoire n°8, les nœuds verts appartiennent au bassin versant déterminé par l'exutoire. Les mailles bleues foncées correspondent au bassin versant.

Par ailleurs les mailles vierges de tout nœud assimilées aux bassins versants, définis par les exutoires mis en place, correspondent à des écoulements en versant (Figure 14), c'est-à-dire qu'ils suivent la topographie (la plus forte pente).

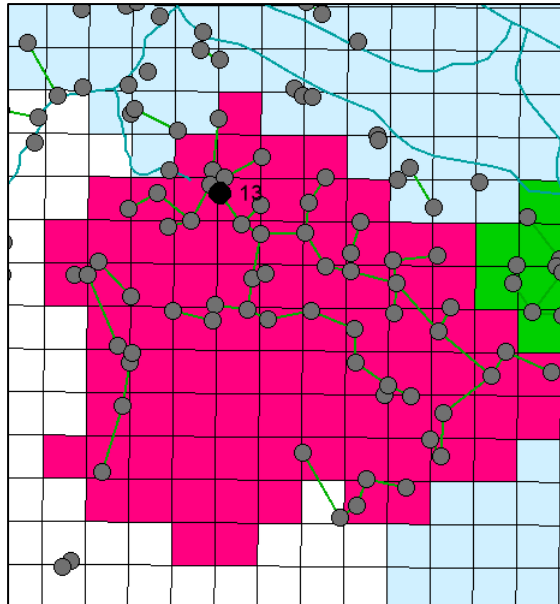


Figure 14 : Bassin versant issu de l'exutoire n°13. Les arcs verts sont les arcs d'eaux pluviales reconstruits grâce à TOHR, le nœud noir correspond à l'exutoire n°13. Les mailles roses correspondent au bassin versant

Les bassins versants obtenus vont être étudiés afin d'évaluer les risques et leurs potentiels en matière de gestion des eaux pluviales. L'objectif premier était de travailler avec le modèle TEB-Hydro. Par manque de temps cela n'a pas été possible. Nous avons donc décidé d'analyser l'occupation du sol de la zone d'étude.

III L'étude des bassins versants

Afin d'étudier les faiblesses et les potentiels des bassins versants obtenus en matière de gestion des eaux pluviales, nous allons nous intéresser à la répartition de l'occupation du sol par maille. L'objectif est de proposer ensuite la mise en place de solutions végétalisées.

Une maille de la grille de TEB-Hydro est constituée de deux fractions primaires : l'eau et la ville, qui est divisée en trois fractions secondaires : le bâti, la voirie et la végétation (cf I.3.1). Ainsi nous nous sommes intéressés à la part de bâti, de voirie, d'eau et de végétation par maille. Par ailleurs, dans la fraction ville, tout ce qui n'est pas de la voirie, du bâti ou de la végétation est considéré comme du sol nu, c'est-à-dire du sol perméable.

III.1 Les données utilisées

La banque de données urbaine de Nantes Métropole dispose d'une BD de l'occupation du sol, qui est construite à partir de l'orthophotographie 2016 de l'IGN et qui utilise les mêmes

niveaux que la BD OCS GE. Elle est constituée de 3 niveaux (du moins détaillé au plus détaillé) répartis dans les cinq grands types d'occupation du territoire suivants :

- Les territoires artificialisés,
- Les zones humides et
- Les territoires agricoles,
- Les surfaces en eau.
- Les forêts et milieux semi-naturels,

L'occupation du sol de Nantes Métropole est composée de 33 postes de légendes. L'unité minimale de collecte est de 2000 m² sauf pour les postes constituant les zones urbanisées liées à l'habitat où elle est de 500 m². La résolution géométrique est de 5 mètres.

Ainsi, la couche SIG de l'eau est construite à partir des surfaces en eau et des zones humides de la banque de données de l'occupation du sol de Nantes Métropole.

Ensuite, la végétation est établie à partir des territoires agricoles et, des forêts et milieux naturels. Elle prend aussi en compte les espaces verts artificialisés, non agricoles, et zone de loisirs. Ce sont des zones végétalisées aménagées par l'Homme. Cela englobe les parcs et jardins urbains, les équipements sportifs et de loisirs et, les zones de camping, caravaning.

Les données de bâti sont issues de la BD TOPO de 2011 qui est produite par l'IGN. La précision des éléments est métrique. Elle permet de décrire sous forme vectorielle les différents éléments du paysage tels que : le réseau routier, les équipements de transports, les cours d'eau naturels, le bâti, la végétation, etc. Le bâti est divisé en plusieurs sous-catégories : indifférencié, industriel, remarquable, résidentiel, etc.

Pour les données de voirie nous considérons à la fois les réseaux de transports et les parkings, et autres surfaces artificielles (zones commerciales, d'activités, etc.). Les données proviennent de deux bases différentes. Nous avons utilisé les données provenant de la convention établie entre l'Université Gustave Eiffel et Nantes Métropole datant de 2019 pour le réseau routier. Et la BD d'occupation des sols de Nantes Métropole nous procure les emprises ferroviaires, aéroportuaires (aéroport de Bouguenais), les zones portuaires, les surfaces commerciales, les zones d'activités et décharges. Les données de voirie de la BD d'occupation des sols de Nantes Métropole ne suffisaient pas car le réseau routier n'est pas suffisamment précis, seul les 2x2 vois sont répertoriées, et non les plus petites voies (rues, chemins, impasses, etc.).

III.2 La méthodologie

Parmi les données d'entrée, il faut fournir à TEB-Hydro les fractions des différents types d'occupation des sols par maille.

La première étape est effectuée avec QGIS (Quantum Geographic Information System), logiciel SIG libre. Elle consiste à s'assurer qu'il n'y ait pas de recouvrement entre les données. En effet, il y a un risque de superposition des données car nous utilisons des sources de données différentes. La végétation et les surfaces d'eau ne doivent pas recouvrir bâti et voirie, lorsqu'il y a des superpositions se sont les surfaces artificialisées qui sont privilégiées. Par ailleurs, la voirie ne doit pas recouvrir le bâti. Ainsi la première couche (en partant du bas) sera la végétation, ensuite viendront se superposer les surfaces d'eau, la voirie, puis les bâtiments.

Un code a été développé sous MapBasic afin d'effectuer les différents traitements des données et les calculs : il permet de découper les différentes couches suivant les mailles de la grille, puis de calculer les surfaces et les fractions d'occupation du sol : bâti, voirie, eau et végétation pour chaque maille. L'espace vierge restant est considéré comme du sol nu (sol perméable), on calcule aussi la fraction de sol nu par maille.

Une fois le découpage des données et les fractions calculées, on positionne la couche des bassins versants² (obtenus grâce à la projection), sur celle de l'occupation du sol et on somme les différentes fractions (Figure 15).

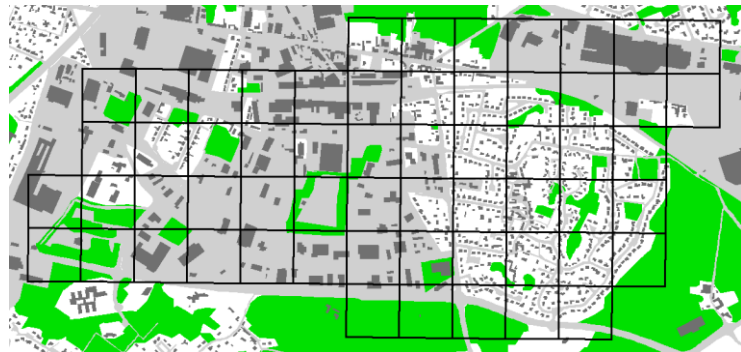


Figure 15 : Occupation du sol du bassin versant n°3. Les surfaces vertes correspondent à la végétation, les surfaces grises foncées au bâti et les surfaces grises claires à la voirie.

III.3 Les résultats de l'occupation du sol par bassin versant

Tout ce qui n'est pas de la voirie, du bâti ou de la végétation est considéré par TEB-hydro comme du sol nu, c'est-à-dire du sol perméable, comme par exemple : les carrières et sablières, les terrains vacants et friches urbaines, etc...

Une fois les fractions d'occupation du sol par maille obtenues. Nous nous sommes intéressés à l'échelle des bassins versants issus de la projection. Ainsi, des fractions totales ont

² En annexe n°2 La carte de l'occupation du sol des bassins versants

été calculées par bassin versant, qui ont ensuite été converties en pourcentage (Figure 16). Il y a très peu de surfaces d'eau dans les bassins versants étudiés, entre 0 et 4%. Les bassins versants les plus végétalisés sont les n°5 (43%) et n°13 (44%), soit à Vertou au sud-est et La Montagne au nord-est. Ce sont des bassins versants en périphérie, qui sont moins urbanisés que ceux au centre.

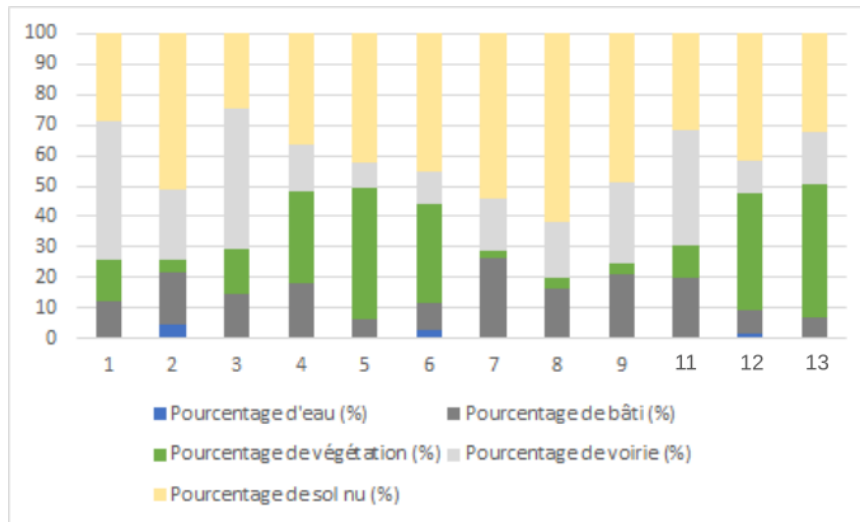


Figure 16 : Pourcentages des différentes occupations du sol par bassin versant

La part de sol nu est importante dans chacun des bassins versants. En effet, les pourcentages sont compris entre 24% et 62%. Mais ces valeurs sont très probablement inexactes. Il pourrait s'agir en partie de couverture végétale. Aujourd'hui, les données SIG de végétation ne sont pas suffisamment exhaustives pour la modélisation, notamment en ce qui concerne l'information de hauteur ; TEB-Hydro fait la distinction entre la végétation haute et basse et les traite différemment. Nous aurions pu essayer d'utiliser les données de végétation de la BD TOPO, cependant ce ne sont pas des données gratuites et nous n'y avons pas eu accès à temps. Nous ne disposons pas d'information sur la végétation du domaine privé (jardins, etc.) et les données publiques ne sont pas complètes, il manque notamment des informations sur les arbres. Ainsi, les fractions de sol nu calculées, ne correspondent pas tout à fait à la réalité, certaines zones peuvent se rapporter à de la végétation et à de la surface artificialisée récemment. Afin de confirmer cette hypothèse nous avons utilisé l'orthophotographie 2016 de Loire Atlantique. La précision est de 20 cm (soit 1 pixel = 20 cm). Et nous y avons superposé les bassins versants³.

³ En annexe n°3 La comparaison entre l'orthophotographie et l'occupation du sol du bassin versant n°3

Les bassins versant possédant les pourcentages les plus élevés de surfaces imperméabilisées (bâti et voirie) sont les n°1 (58%), 3 (61%), 9 (47%) et 11 (57%) (Figure 17). Ils sont respectivement à Bouguenais, Vertou, Nantes et Saint-Sébastien-sur-Loire. Ils sont situés au centre de la zone d'étude.

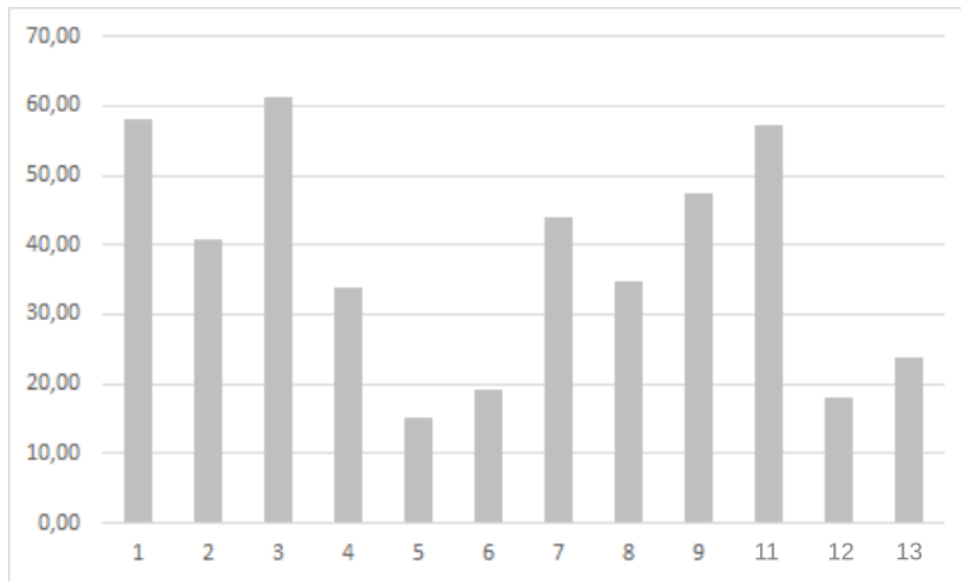


Figure 17 : Pourcentages de surfaces imperméabilisées (bâti et voirie) par bassin versant

III.4 Les faiblesses en matière de gestion des eaux pluviales et les solutions vertes pouvant être mises en place

III.4.1 Identification des bassins versants présentant des faiblesses en matière de gestion des eaux pluviales

Dans un bassin versant urbanisé, l'occupation du sol, les activités humaines et les aménagements conditionnent les cheminements des eaux et interfèrent avec les processus du cycle naturel de l'eau ; la part de ruissellement augmente fortement, et celles de l'infiltration et de l'évapotranspiration diminuent (cf I.2.1). Les risques de sécheresse ou bien de crues sont donc plus élevés dans de tels bassins dont la part de zones imperméables (toits, routes, surfaces de parking, etc.) est importante.

Afin d'estimer les bassins versants présentant des faiblesses potentielles vis-à-vis de la gestion de l'eau pluviale, nous avons mis en place plusieurs classes : les pourcentages inférieurs ou égaux à 10% correspondent à une part peu importante, les pourcentages inférieurs ou égaux à 30% correspondent à une part moyennement importante et les pourcentages strictement supérieurs à 30% correspondent à des parts importantes. Nous avons aussi cumulé surfaces de voirie et bâti afin d'obtenir le total des surfaces imperméables que nous considérons importantes au-delà de 40%.

Ainsi les bassins versants n°5, 6 et 12 ont une part de végétation importante (> 30%) et des parts de voirie et de bâti peu importantes ($\leq 10\%$). On ne considère pas que ces bassins présentent des faiblesses.

Les bassins versants n°1, 3 et 11 ont une part de voirie importante (>30%) et on des parts moyennement importantes de bâti et de végétation ($\leq 30\%$) et ont des parts de sol nu peu importantes ($\leq 10\%$). Ils sont donc considérés « à risques ». De plus, leur part de surfaces imperméabilisées dépasse, pour chacun, les 57%.

Les bassins versant n°2, 4, 7, 8 et 9 possèdent des parts de bâti et voirie moyennement importantes ($\leq 30\%$). Des parts de végétation peu importantes mais une part de sol nu importante (ce qui peut correspondre à de la végétation, comme expliqué précédemment). Les bassins versant n° 4, et 8 ont une part de surfaces imperméables de 34 et 35%. Nous les considérons donc sans réelle faiblesse. Mais les bassins versants n°2, 7 et 9 ont des pourcentage de surfaces imperméables > 40%. Ils présentent des menaces.

Le bassin versant n°13 est considéré sans faiblesse car ses parts de végétation et sol nu sont importantes. Sa part de bâti peu importante et sa part de voirie moyennement importante. Au total il ne contient que 24% de surface imperméabilisée.

Pour résumer, les bassins versants présentant le plus de faiblesses sont les n°1, 3 et 11 et dans un second temps les n°2, 7 et 9. Ils sont situés au centre de la zone d'étude, sur les communes de Bouguenais, Rezé, Nantes, Saint-Sébastien-sur-Loire et Vertou. Ils sont de tailles variables : entre 8 et 71 mailles (3 200 000 m² et 28 400 000 m²) . Les bassins versants n°2 et 7 sont contigus, tout comme les bassins versants n°3 et 11 (Carte 11).

Les bassins versants identifiés comme présentant des menaces pourront être validés lors de la phase de modélisation qui sera effectuée lors de prochains travaux (thèse universitaire). L'idée sera de faire un état des lieux du secteur d'étude défini afin d'identifier les zones à risques en matière de gestion de l'eau et proposer l'implantation de solutions vertes dans les secteurs en développement, si les règles d'urbanisme le permettent.

III.4.2 Le développement de solutions vertes dans les secteurs d'OAP

Nous avons réfléchi à la mise en place de techniques alternatives sur certains des bassins versants qui présentent théoriquement des menaces. En effet, des possibilités sont offertes car ce sont des zones en mutation : elles comprennent plusieurs secteurs d'OAP.

Nous allons particulièrement nous intéresser aux bassins versant n°2 et 7, qui sont contigus. Le premier est de taille relativement importante (71 mailles). Tous deux comprennent plusieurs secteurs d'OAP répartis de manière homogène (Figure 18). Et notamment le périmètre d'OAP située en aval du bassin versant n°2 est considérable (458 000 m²) ; ce secteur présente certainement un fort potentiel pour la mise en place de solutions vertes.

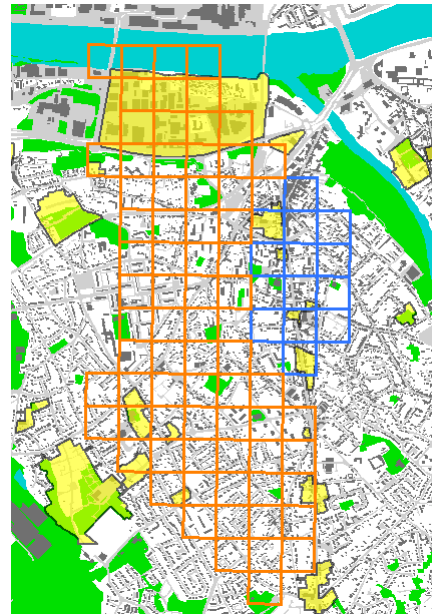


Figure 18 : Occupation du sol et secteurs d'OAP des bassins versants n°2 et 7. En jaune les secteurs d'OAP. Les mailles orange sont celles du bassin versant n°2 et les mailles bleues celles du n°7. En gris clair la voirie, en gris foncé le bâti, en vert la végétation et en bleu les surfaces d'eau.

Dans une zone où il y a beaucoup de bâti, le manque d'espace implique qu'il y a moins de marges de manœuvres pour implanter des solutions végétalisées. Les dispositifs doivent s'intégrer directement au bâti, tels que des toitures végétalisées qui permettent le stockage et l'évapotranspiration. Pour la mise en place des toitures, il faut au préalable contrôler les pentes qui doivent être nulles ou faibles (<5%) (SYMASOL, 2016). Une autre solution est de déconnecter le bâti du réseau d'assainissement d'eaux pluviales en favorisant le stockage d'eau à la parcelle (infiltration dans les jardins). On peut par exemple mettre en place des citernes d'orage dans le résidentiel unifamilial. Elles peuvent être hors sol ou enterrées. Elles ont pour rôle principal de stocker temporairement l'eau de pluie (par opposition avec la citerne de récupération qui est destinée à la récolte, conservation et utilisation des eaux de pluie). Ces types de solutions peuvent être mises en place sur tous les secteurs d'OAP du bassin versant n°7 et sur le secteur d'OAP aval du bassin versant n°2.

S'il y a beaucoup de surface de voirie, il faut favoriser les noues végétalisées et les parkings drainants. Des arbres individuels peuvent également être plantés le long des axes routiers. Ces solutions pourraient être développées sur tous les secteurs d'OAP des deux bassins versants. On peut combiner citernes d'orage et noues végétalisées, qui recevront les eaux des citernes, dans le bassin versant n°7 car les secteurs d'OAP sont composés de bâti et voirie (Figure 18).

Les bandes filtrantes sont des dispositifs de transition, elles sont placées entre une surface imperméabilisée et une autre solution verte (située en aval). Elles peuvent donc être mises en place dans les deux bassins versants en question.

Les jardins de pluie, s'adaptent à différentes échelles et peuvent être mis en place dans des zones où il y a beaucoup de voirie : ronds-points aménagés, espaces verts communs de logements collectifs ou encore sur des bermes centrales d'axes routier. Il vaut mieux favoriser plusieurs petits jardins qu'un seul jardin centralisé. Cela pourrait être mis en place dans le bassin versant n°7 par exemple qui a une part de voirie moyennement importante (18%). De plus c'est une zone majoritairement résidentielle donc la fonction paysagère et de loisir du jardin de pluie s'inscrit bien sur ce territoire (Figure 18).

Conclusion

L'amélioration de la gestion de l'eau en ville est l'un des défis majeurs actuels que l'homme doit relever afin de s'adapter au changement climatique et à l'urbanisation croissante. Plus les zones urbaines se densifient et plus les processus hydriques sont modifiés : le cycle de l'eau urbain s'éloigne du cycle de l'eau naturel ; le manque de végétation et l'augmentation de la part d'espaces imperméables provoquent une réduction de l'infiltration, du stockage en eau dans les nappes phréatiques et de l'évapotranspiration. Les volumes ruisselés des eaux de pluie sont accrus. De nombreux problèmes en découlent : l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des crues, des périodes d'étiages et de sécheresse plus longues, etc.

La réintroduction de la végétation en ville est primordiale. De nombreuses techniques alternatives à ces différentes pressions sont fondées sur la nature et sont souvent multifonctionnelles. Ces solutions peuvent être évaluées via des outils de modélisation tel que TEB-Hydro qui est un modèle hydro-climatique urbain maillé développé par Météo France et l'Université Gustave Eiffel. Concernant la composante hydrologique, il permet de reproduire petit et grand cycles de l'eau à l'échelle d'un territoire. Il n'a pas vocation à gérer au quotidien le réseau d'assainissement, mais aide à la décision d'aménagements futurs.

Lors de ce travail de fin d'étude l'outil TOHR, qui est un code informatique développé sous MapBasic pour répondre à certains besoins de TEB-Hydro, a été appliqué à un secteur de Nantes Métropole au sud de la Loire. Il a permis de reconstruire de manière fonctionnelle et uniforme les réseaux hydrographiques naturels (cours d'eau) et artificiels : les réseaux d'assainissement collectif (séparatif et unitaire) du secteur étudié. Un semis de nœuds a d'abord été mis en place et les connexions ont ensuite été créées. Le graphe orienté obtenu a ensuite été projeté sur la grille utilisée par TEB-Hydro.

Les résultats de la reconstruction et de la projection sont globalement satisfaisants. Toutefois, étant un outil récent et en cours de développement, TOHR présente encore quelques faiblesses et peut donc être amélioré. Certaines conditions de construction des arcs devraient varier en fonction de la densité du réseau réel. Pour les connexions des eaux pluviales : la distance entre deux nœuds ne doit pas excéder deux fois la distance de l'un d'entre eux au cours d'eau le plus proche. Mais dans les zones proches du réseau hydrographique naturel, lorsque le réseau réel est très dense, la reconstruction peut créer de mauvais arcs : les eaux devraient aller directement à la rivière mais une connexion se fait à un autre nœud. Dans le cas de la zone sud

Loire étudiée, on pourrait réduire cette condition de distance à 1,5 et ensuite à 1, relancer la reconstruction et comparer les trois résultats (2, 1,5 et 1).

Lors de la partie projection, TOHR définit les bassins versants des exutoires d'eaux pluviales que l'utilisateur met en place. Ces bassins versants sont définis par les réseaux artificiels et les écoulements en versants. La partie du bassin versant qui est parcourue par du réseau artificiel est définie par les nœuds présents dans les mailles. Des problèmes peuvent ainsi survenir lorsque deux réseaux artificiels différents contigus appartiennent à des bassins versants contigus. Si une des maille contient un nœud (en limite) TOHR peut attribuer la maille à l'un des bassins versants alors qu'il appartient vraisemblablement à l'autre (notamment en regardant les arcs). Les résultats peuvent donc être faussés. Il faudrait ajouter une condition sur la prise en compte des arcs.

Après l'obtention de plusieurs bassins versants, nous avons étudié leur occupation du sol et essayé d'identifier les secteurs présentant des faiblesses en matière de gestion de l'eau urbaine. Afin de proposer la mise en place de solutions vertes. La modélisation avec TEB-Hydro permettrait de vérifier les hypothèses qui ont été avancées.

Il faudrait faire une étude de la résolution de la grille à utiliser, en particulier dans les zones où le réseau est dense. La résolution de 200m ne semble pas assez fine pour un secteur similaire à la zone sud Loire étudiée.

Un travail supplémentaire sur les données d'occupation du sol peut aussi être effectué. Les données de végétation ne sont pas suffisamment précises, comme souligné dans cette étude. Il serait donc judicieux d'analyser plusieurs bases de données : la banque de données urbaines de Nantes Métropole, la BD TOPO (pour le bâti et la végétation), Corinne Land Cover (pour la végétation), etc., et de faire un comparatif des fractions d'occupation du sol obtenues. Et une fois la reconstruction et la projection effectuée, l'idée serait de faire un état des lieux de l'hydrologie avec TEB-Hydro pour ensuite pouvoir mettre en place des scénarios croisant enjeux hydrologiques et contraintes règlementaires. Une idée pourrait être de modifier les pourcentages d'occupation du sol des mailles qui sont dans un secteur d'OAP. Par exemple d'augmenter la part de végétation et de jouer sur les hauteurs (part de végétation basse et haute).

Ce projet de fin d'étude correspond à la préparation d'une thèse universitaire qui va débuter en septembre 2020 et dans laquelle TEB-Hydro sera appliqué à l'intégralité du territoire de Nantes Métropole. Le travail que j'ai effectué est prospectif, il pourra être repris lors de futures études. Par ailleurs j'ai pu mettre en lumière quelques faiblesses : j'ai donc ciblé des

notions qu'il faudrait davantage étudier et améliorer par la suite. De plus, la zone d'étude ici traitée est assez large et représentative de la majorité de l'agglomération nantaise du point de vue de l'assainissement. En effet, le réseau d'assainissement collectif du secteur sud Loire est essentiellement séparatif, tout comme le territoire métropolitain qui est parcouru par seulement 360 kilomètres de réseaux de collecte unitaires, ce qui représente 8% du réseau d'assainissement collectif total.

Bibliographie

Ouvrages électroniques

KABISCH N., KORN H., STADLER J. et al, 2017. Nature-based solutions to climate change adaptation in urban area, [en ligne]. Edition de Springer Open, 324p.

ETD, Centre de ressources du développement territorial, 2014. Planification et adaptation au changement climatique, [en ligne]. p.1-19

Chapitre dans un ouvrage électronique

GUNAWARDENA K. R., WELLS M. J., KERSHAW T., 2017. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island. Science of the total environment, [en ligne]. Volumes 584-585. Edition de Barcelo Cullerès D., Gan J., Royaume-Uni, p.1040-1055

Travaux universitaires

ALLARD A., 2015. Contribution à la modélisation hydrologique à l'échelle de la ville. Thèse de Doctorat, Université Nantes Angers Le Mans, 234p.

STAVROPULOS-LAFFAILLE X., 2019. Pour une analyse des impacts du changement climatique sur l'hydrologie urbaine : Modélisation hydro-microclimatique de deux bassins versants expérimentaux de l'agglomération nantaise. Thèse de doctorat, Université Bretagne Loire, 259p.

Travaux de recherche

CHANCIBAUT K., MOSSET A., LOTFI Z. et al., 2019. Reproduire le cycle de l'eau (petit et grand) à l'échelle de Paris et sa petite couronne. Rapport de Synthèse PIREN-Seine phase VII, Volume 3, 53p.

LOTFI Z., CHANCIBAUT K., JOANNIS C. et al., 2016. Reconstruction du réseau d'assainissement à l'échelle de Paris et sa couronne. Rapport PIREN-Seine phase VII, 26p.

Articles scientifiques

STAVROPULOS-LAFAILLE X. et al, 2018, Improvements of the hydrological processes of the Town Energy Balance model (TEB-Veg, SURFEX v7.3) for urban modelling and impact assessment. Geosci. Model Dev., [en ligne]. 11, 4175-4194. Disponible sur <https://gmd.copernicus.org/articles/11/4175/2018/gmd-11-4175-2018.pdf>

Rapports

Nantes Métropole, 2018. Rapport annuel sur l'eau. Edition de Nantes Métropole, 94p

Nantes Métropole, 2001. Neptune 3, Contrat d'agglomération pour la protection et la restauration des milieux aquatiques. Edition de Nantes Métropole, 106p.

DEUTSCH J. C., 2003. Annexe 81 : Les réseaux unitaires. In : La qualité de l'eau et assainissement en France, Rapport n°2152, OPECST. Annexe 81.

Nantes Métropole, 2014. Règlement d'assainissement collectif.

Glossaire électronique

World Meteorological Organization, 2012. International Glossary of Hydrology, [en ligne]. Mettre pages selon les définitions utilisées.

Fascicule (ou livret) électronique

Les Agences de l'eau, Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, ONEMA, 2012. Le cycle de l'eau, [en ligne]. Disponible sur : http://www.lesagencesdeleau.fr/wp-content/uploads/2012/07/3-Fiche-cycle-de-leau_web.pdf. (consulté le 31/03/20)

Sites web

Banque Mondiale. Population urbaine (% du total), [en ligne]. Disponible sur : <https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.URB.TOTL.IN.ZS>. (consulté le 09/04/20)

Eau France. Les principaux textes en vigueur, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.eaufrance.fr/les-principaux-textes-en-vigueur>. (consulté le 09/04/10)

Guide Bâtiments Durable, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/accueil.html?IDC=1506>. (Consulté le 24/06/20)

L'eau dans le bassin Rhône Méditerranée. Compétence GEMAPI, la loi et ses décrets d'application, [en ligne]. Disponible sur : <https://rhone-mediterranee.eaufrance.fr/gestion-de-leau/gestion-locale-de-leau/competence-gemapi/competence-gemapi-la-loi-et-ses-decrets-dapplication>. (consulté le 20/04/20)

Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire. Gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations (GEMAPI), [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/gestion-des-milieux-aquatiques-et-prevention-des-inondations-gemapi>. (consulté le 20/04/20)

MORENO Carlos. Urbanisation mondiale et réseaux de ville, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.latribune.fr/regions/smart-cities/la-tribune-de-carlos-moreno/urbanisation-mondiale-et-reseaux-de-villes-563504.html>. (consulté le 09/04/20)

Nantes Métropole. Nantes Métropole & ville, [en ligne]. Disponible sur : <https://metropole.nantes.fr/>. (consulté le 10/04/20)

Nation Unies. 2,5 milliards de personnes de plus habiteront dans les villes d'ici 2050, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.un.org/development/desa/fr/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>. (consulté le 09/04/20)

SYMASOL. Gestion des eaux pluviales, [en ligne]. Disponible sur : <http://www.symasol.fr/les-enjeux-et-nos-actions/gerer-les-risques-inondation/gestion-des-eaux-pluviales/>. (consulté le 24/06/20).

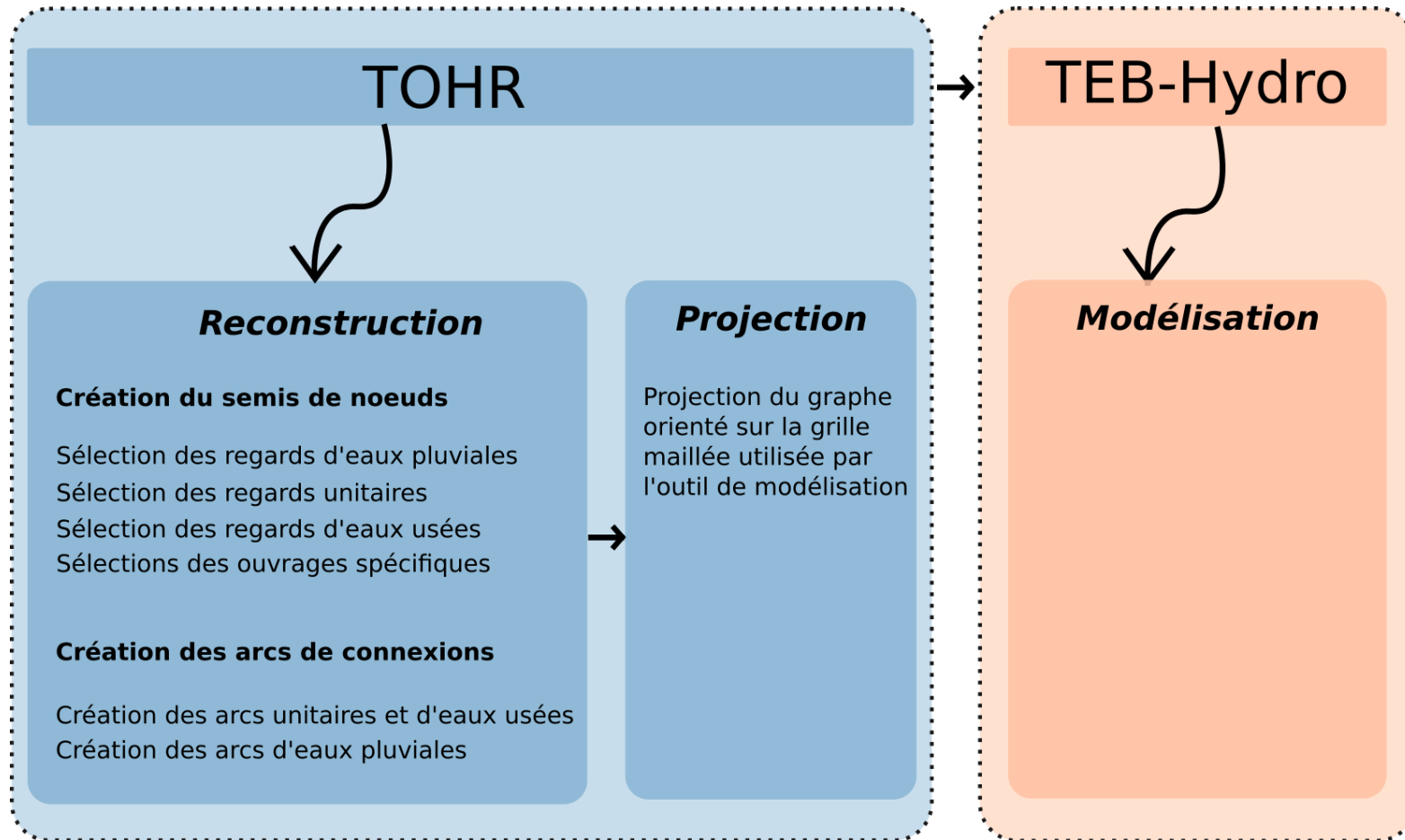
UICN Comité Français. Les solutions fondées sur la nature, [en ligne]. Disponible sur : <https://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>. (consulté le 08/06/20)

Veolia. Glossaire, [en ligne]. Disponible sur : <http://recyclage.veolia.fr/nous-connaître/glossaire.html>. (consulté le 09/06/20)

Table des annexes

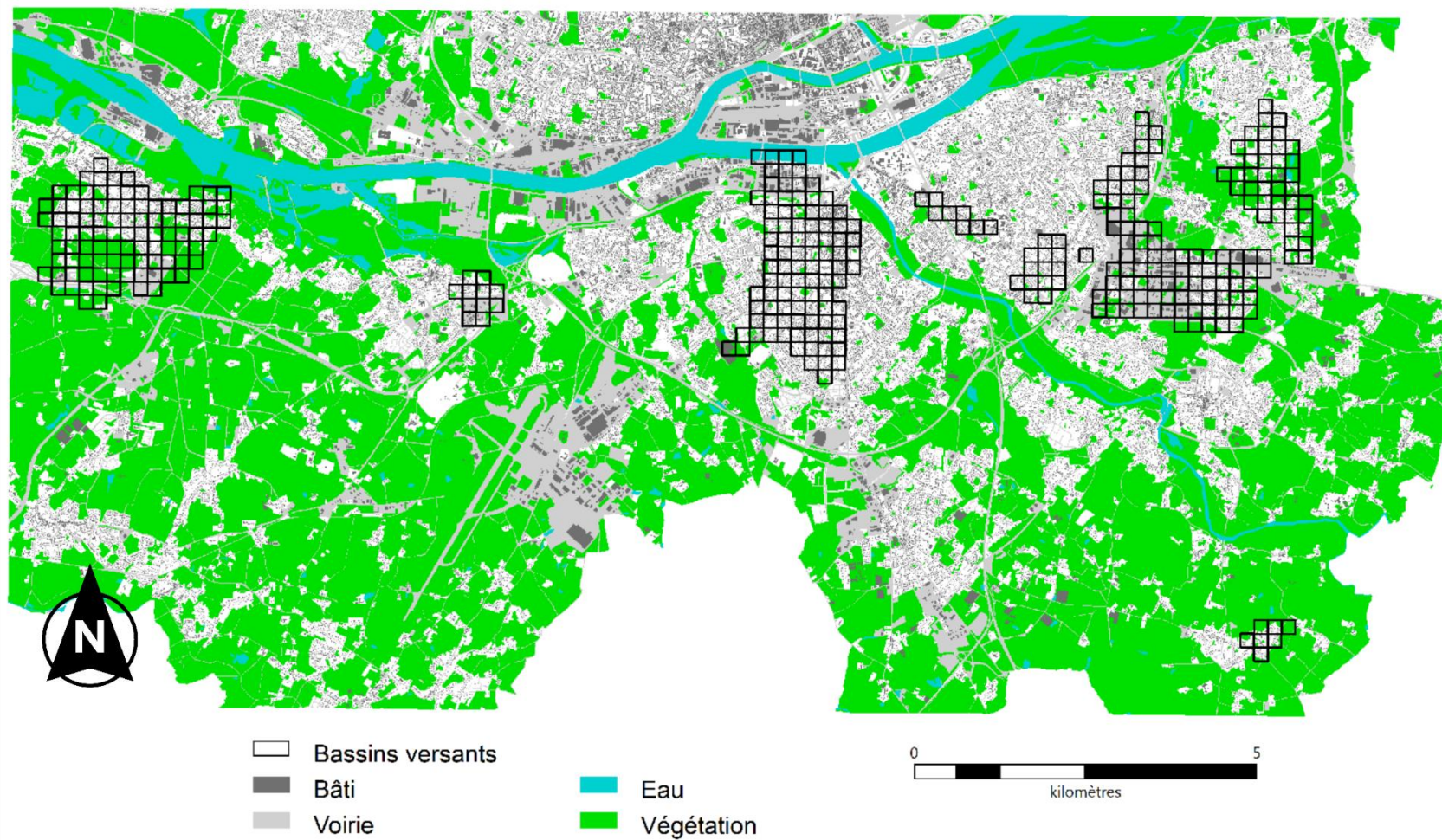
Annexe 1 : Diagramme de l'utilisation des outils TOHR et TEB-Hydro.....	59
Annexe 2 : Carte de l'occupation du sol des bassins versants	60
Annexe 3 : Comparaison entre l'orthophotographie et l'occupation du sol du bassin versant n°3 ..	61

Annexe 1
Diagramme des étapes de l'utilisation des outils TOHR et TEB-Hydro

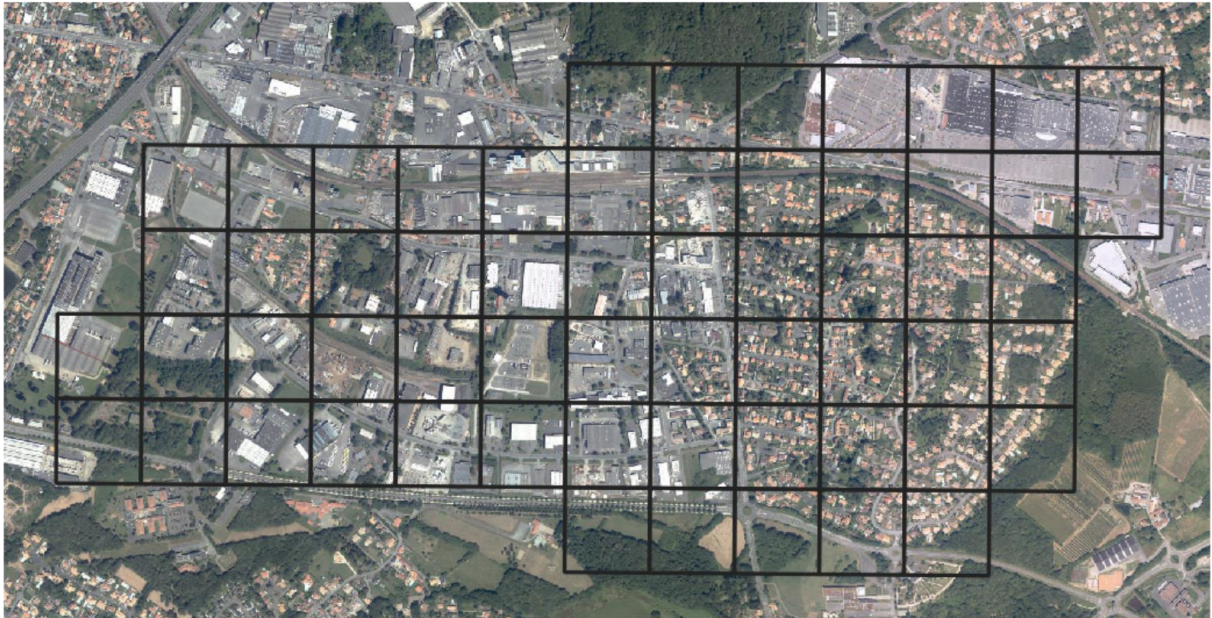
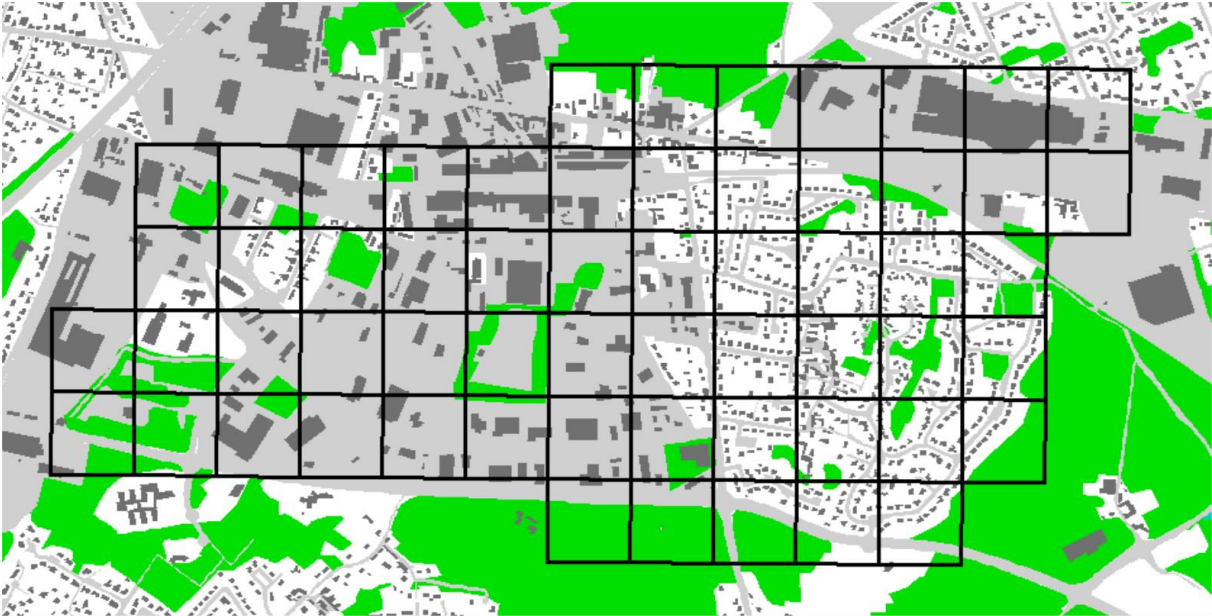


Annexe 2

Carte de l'occupation du sol des bassins versants



Annexe 3
Comparaison entre l'orthophotographie et l'occupation du sol du
bassin versant n°3



Liste des figures

Figure 1 : Comparaison du cycle de l'eau en zone naturelle et urbaine (Stavropoulos-Laffaille, 2019)	12
Figure 2 : Maille fractionnée en fonction de l'occupation du sol	16
Figure 3 : Etat initial, avant reconstruction (Lotfi et al., 2016)	18
Figure 4 : Sélection des regards du réseau d'eaux pluviales, sélection des regards du réseau unitaire, sélection des regards du réseau d'eaux usées (Lotfi et al., 2016)	19
Figure 5 : Ajout des ouvrages spéciaux (Lotfi et al., 2016)	19
Figure 6 : Schéma de calcul du cheminement de l'eau en versant avec l'algorithme D8 ..	21
Figure 7 : Exemple de déversoir équipant le réseau d'eaux usées et étant relié au réseau d'eaux pluviales	30
Figure 8 : Résultats de la première reconstruction : deux stations de refoulement appartiennent à la même maille	34
Figure 9 : Résultats de la reconstruction après ajout de la condition de sélection des stations de refoulement dans le code TOHR	34
Figure 10 : Mauvaise connexion d'eaux pluviales	41
Figure 11 : Reconstruction correcte mais chemin de l'eau plus long	42
Figure 12 : Deux entrées d'eaux du réseau d'eaux pluviales dans une même maille	43
Figure 13 : Bassin versant issu de l'exutoire n°8 : problème de discontinuité	44
Figure 14 : Bassin versant issu de l'exutoire n°13	44
Figure 15 : Occupation du sol du bassin versant n°3	47
Figure 16 : Pourcentages des différentes occupations du sol par bassin versant	47
Figure 17 : Pourcentages de surfaces imperméabilisées (bâti et voirie) par bassin versant	48
Figure 18 : Occupation du sol et secteurs d'OAP des bassins versants n°2 et 7.....	50

Liste des cartes

Carte 1 : Localisation de Nantes Métropole	22
Carte 2 : Réseau d'assainissement des eaux pluviales de Nantes Métropole	23
Carte 3 : Réseaux d'assainissement des eaux usées et unitaires de Nantes Métropole	23
Carte 4 : Petite Californie, la seconde STEU en matière de capacités à Nantes Métropole	24
Carte 5 : Aire drainée par la STEU Petite Californie, au sud de la Loire.....	27
Carte 6 : Aire drainée par Petite Californie redéfinie en fonction des éléments d'eaux usées et unitaires	28
Carte 7 : Zone d'étude finale	29
Carte 8 : Résultats de la reconstruction finale des nœuds	36
Carte 9 : Résultats de la reconstruction finale des arcs	36
Carte 10 : OAP superposées à la carte issue de l'analyse multicritères	39
Carte 11 : Bassins versants de la zone d'étude obtenus après projection	40

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tables initiales nécessaires à l'utilisation de TOHR.....	31
Tableau 2 : Des pourcentages élevés de nœuds sélectionnés sans altitude	32
Tableau 3 : Synthèse du nombre de nœuds sélectionnés lors des diverses reconstruction	35
Tableau 4 : Synthèse des exutoires étudiés.....	40