

## Reconstruction du réseau hydrographique du département des Hauts-de-Seine en vue d'une modélisation hydrologique

Carla Beauvais<sup>1</sup>, Katia Chancibault<sup>1\*</sup>, Alexandra Mosset<sup>1</sup>, Christian Roux<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IFSTTAR/LEE

<sup>2</sup> Département des Hauts-de-Seine/Direction de l'eau

\* katia.chancibault@ifsttar.fr

### Résumé

*Parmi les nombreux objectifs du projet PIREN-Seine, il est prévu d'étudier les flux hydriques urbains auxquels la Seine peut être sensible. Pour cela un modèle hydrologique urbain (TEB-Hydro) doit être appliqué à l'échelle de Paris et sa petite couronne. Le territoire visé implique une simplification des processus représentés et des objets, en lien avec la résolution spatiale choisie. La reconstruction simplifiée du réseau d'assainissement est nécessaire, pour alimenter le modèle hydrologique. Le travail présenté ici vient compléter les travaux précédemment développés. Il s'est concentré sur le département des Hauts de Seine où le réseau départemental a été simplifié et connecté au réseau interdépartemental ainsi qu'à la Seine. L'évaluation de cette reconstruction a été encourageante et a permis de produire un premier jeu de simulations hydrologiques à l'échelle du département. Même si le manque de données observées n'a pas permis de valider ces premières simulations, une étude de sensibilité a mis en évidence les paramètres auxquels le modèle est le plus sensible et qui doivent donc être calés. Ce travail a aussi montré les données observées nécessaires pour poursuivre ce travail.*

### Introduction

En 2015, la population mondiale était de 7,349 milliards d'habitants et devrait augmenter de plus d'un milliard de personnes au cours des douze prochaines années, pour atteindre 8,5 milliards en 2030 et 9,7 milliards en 2050, selon un rapport des Nations Unies (United Nations, 2015). Cette augmentation de la population est couplée à une urbanisation croissante. En effet, en 2014, 54% de la population vivait en zone urbaine, et les Nations Unies estiment que 66% de la population vivra en zone urbaine en 2050. Depuis 1950, la population urbaine a augmenté rapidement de 746 millions à 3,9 milliards en 2014 et devrait encore augmenter de 2,5 milliards d'ici 2050. (United Nations, 2014).

Cette croissance démographique se traduit par une artificialisation croissante des sols, c'est-à-dire une transformation de terres agricoles, forestières ou milieux naturels en terres destinées à l'occupation anthropique (Commissariat général au développement durable, 2015). En France, ce phénomène est majoritairement dû à l'urbanisation et à la création de zones industrielles et commerciales. En effet, entre 2000 et 2006, l'artificialisation des sols en France progressait de 3% et les surfaces urbanisées de 2,1%. De plus, sur cette période le tissu urbain s'est accru de 1,6 % (+ 33 500 ha) et les zones industrielles et commerciales de 6,8 % (+ 23 200 ha) (Commissariat général au développement durable, 2012).

L'activité humaine ainsi que l'artificialisation grandissante des sols entraînent une nouvelle morphologie de l'espace urbain qui impactent fortement le bilan énergétique et hydrologique des villes. Le bilan hydrologique est impacté par l'imperméabilisation des surfaces qui entraîne des pics de débits plus intenses et un temps de réponse plus faible (Burns et al. 2005). De plus, la présence des

réseaux d'assainissement peut influencer sur le niveaux des eaux souterraine en abaissant le niveau des nappes lors de la période d'étiage à cause de l'infiltration des eaux souterraines dans les réseaux (Burns et al. 2005). Enfin, l'urbanisation entraine des problèmes de pollution des eaux par les métaux qui proviennent des activités anthropiques en zone urbaine via le phénomène de ruissellement (Bhaduri et al. 2000).

C'est dans ce contexte que le programme PIREN-Seine (Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Eau et l'Environnement du bassin de la Seine) a orienté sa dernière phase de travail (phase 7 de 2015 à 2020) sur la recherche de solution de gestion de la ressource en eau face aux défis agricoles, environnementaux et urbains. A court terme, l'objectif est d'établir le cadre de modélisation hydrologique à l'échelle de Paris et sa petite couronne, en prenant en compte le réseau naturel, mais aussi les réseaux d'assainissement et leurs connexions. A moyen terme, il est question de coupler la modélisation hydrologique à l'échelle du Grand Paris avec la modélisation hydrogéologique de bassin de la Seine, dans le but d'étudier l'impact du milieu urbain sur le fonctionnement du bassin de la Seine. De plus, il est aussi question de coupler la modélisation hydrologique avec une modélisation de rejets de polluants dans la Seine afin d'étudier les impacts des zones urbaines sur la qualité de la Seine. Ces différents objectifs, devraient permettre à terme d'avoir à disposition une plateforme de modélisation eau-microclimat-polluants à l'échelle de Paris et sa petite couronne afin d'évaluer de façon plus systémique les stratégies d'adaptation au changement climatique.

Cette étude s'inscrit dans les objectifs à court terme de la participation de l'IFSTTAR au projet PIREN-Seine. L'objectif est d'établir un cadre de modélisation hydrologique sur le département des Hauts-de-Seine. Il s'agit ainsi de fournir les données nécessaires au modèle, en particulier un réseau hydrographique simplifié mais complet de la zone puis de réaliser une étude de sensibilité du modèle hydrologique à différents paramètres. En revanche, par manque de données hydrologiques observées, l'évaluation du modèle n'a pu être faite.

Après un état de l'art sur l'hydrologie urbaine et la reconstruction du réseau hydrographique en zone urbaine, les outils TOHR – pour la reconstruction du réseau - et TEB-Hydro – pour la modélisation hydrologique - utilisés pendant le stage seront présentés, dans une première partie. En deuxième partie sera présentée la zone d'étude ainsi que la gestion et le fonctionnement des différents réseaux d'assainissement présents dans la zone. Ensuite, les résultats de reconstruction du réseau d'assainissement puis ceux de la modélisation hydrologique au travers d'une étude de sensibilité seront discutés et analysés.

## **1. Etat de l'Art**

### **1.1. L'hydrologie en zone urbaine**

L'hydrologie en zone urbaine présente quelques spécificités par rapport aux zones rurales. Plusieurs facteurs expliquent ces phénomènes hydrologiques perturbés comme la prédominance de surfaces artificialisées en ville qui réduit l'infiltration des eaux dans les sols, ce qui augmente le pic de crue (Leopold, 1968), le volume annuel de ruissellement et réduit le temps de concentration (Fletcher et al., 2013). Ceci a été confirmé par d'autres études, notamment (Burns et al., 2005).

On peut également citer la présence en ville de contraintes pour l'écoulement des eaux de ruissellement qui modifient le cheminement de l'eau. C'est le cas des routes, autoroutes ou voies ferrées qui peuvent être surélevées par rapport aux terrains qui les bordent mais également des réseaux d'assainissement. En effet, ces derniers peuvent capter les eaux de ruissellement dans les réseaux unitaires ou dans les réseaux séparatifs de type eau pluviale (EP). Une fois captées par les réseaux, ces eaux de ruissellement vont en station d'épuration pour le réseau unitaire, ou dans le milieu naturel pour les réseaux de type EP. En cas de saturation des stations d'épuration ou des réseaux unitaires, les eaux peuvent être déversées dans le milieu naturel par des déversoirs d'orage.

De plus, le sol urbain est un élément essentiel de l'hydrologie urbaine. En effet, les sols naturels en ville comme les parcs, jardins ou toitures végétalisées, jouent un rôle primordial dans l'hydrologie urbaine car ils permettent l'infiltration des eaux pluviales dans le sol. Ceci permet de réduire les eaux pluviales qui arrivent directement dans les réseaux d'assainissement et donc de diminuer la surcharge

des réseaux. Aujourd'hui, les solutions alternatives d'assainissement qui permettent de réduire le ruissellement des eaux pluviales sont basées sur la capacité d'infiltration des sols naturels (Sauge et al., 2014)

On observe également une infiltration des eaux à travers les surfaces artificialisées comme les routes ou les chaussées. Une étude a montré que les rues pavées par exemple infiltrent 6 à 9% de la pluie totale annuelle (Ragab et al., 2003).

Une fois les eaux pluviales infiltrées dans le sol, il est important de considérer les transferts d'eau dans le sol qui peuvent être perturbés par la présence de réseaux d'assainissement. En effet, le vieillissement des réseaux peut entraîner des défauts d'étanchéité qui permettent l'infiltration des eaux du sol vers les réseaux lorsque la nappe affleure ces réseaux durant les périodes humides (généralement en hiver à nos latitudes) et l'exfiltration des réseaux vers le sol ou les nappes phréatiques. L'infiltration de l'eau du sol dans les réseaux constitue une partie des eaux claires parasites (ECP) qui sont les apports d'eau dont la présence dans les réseaux ne répond pas à la vocation initiale des ouvrages. Elles regroupent les infiltrations de l'eau du sol dans les réseaux ainsi que les mauvais branchements (De Bénédictis, 2004).

Ces ECP représentent une quantité d'eau importante puisqu'une étude réalisée par (Brombach Hansjörg et al., 2003) en Allemagne a montré que le débit journalier d'ECP peut atteindre en hiver et au printemps jusqu'à 700% du débit d'eaux usées strictes, soit une dilution des effluents bruts d'un facteur 8. Une autre étude réalisée à partir des mêmes données démontre que les eaux en entrée de stations d'épuration sont composées de 35% d'ECP, 30% d'eaux usées strictes et 35% d'eau pluviale (Weiss et al., 2002).

Enfin, des transferts d'eau entre le sol et l'atmosphère sont observés en zone urbaine via l'évapotranspiration. La présence de sols naturels en ville permet ce phénomène d'évapotranspiration qui regroupe l'évaporation du flux d'eau en surface ainsi que la transpiration des végétaux. C'est un élément essentiel du bilan en eau en zone urbaine (Fletcher et al., 2013) puisqu'elle représente 21 à 24% de la pluie annuelle totale, avec une augmentation en été (Ragab et al., 2003). Ce phénomène d'évapotranspiration peut être accru en zone urbaine à cause des îlots de chaleur urbains qui correspondent à un écart de température entre la ville et sa périphérie (Agence Parisienne du Climat, 2014).

Ainsi, les écoulements d'eau en surface et souterrains tout comme les échanges d'eau avec l'atmosphère peuvent être perturbés en zone urbaine. Il est donc important pour réaliser une modélisation hydrologique en zone urbaine, de représenter le cheminement de l'eau en prenant en compte ces différentes contraintes.

## **1.2. Les outils de reconstruction du réseau hydrographique complet**

La reconstruction du réseau hydrographique permet de connaître sur une zone définie, le cheminement de l'eau en rivière, en versant (de surface) en souterrain, depuis une unité de collecte jusqu'à son exutoire. Il existe deux types de méthodes qui permettent de décrire le réseau hydrographique : les méthodes basées sur la description du réseau hydrographique grâce aux bases de données vectorielles, et celles basées sur l'étude du relief de la zone, définit à partir d'un Modèle Numérique de Terrain.

Pour les méthodes basées sur l'étude des bases de données vectorielles, il est possible de s'appuyer sur des bases de données robustes comme par exemple la BD CARTHAGE pour le réseau hydrographique. Cette base de données mise à jour par l'IGN représente le découpage du territoire métropolitain en zones hydrographiques et leur hiérarchie (Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'eau, 2017). La hiérarchie de connexion des différentes unités de ces bases de données sur les cours d'eau peut être décrite via l'ordre de Strahler par exemple qui renseigne l'ordre d'écoulement ou de Shreve qui renseigne les connexions amont (Tarboton et al., 1991).

L'autre méthode est l'utilisation du MNT pour définir le réseau hydrographique. Cette méthode est surtout utilisée pour les zones rurales. Les MNT sont des représentations numériques spatialisées de l'altitude. La forme la plus utilisée est le MNT raster, qui renseigne les altitudes de chaque maille d'une grille régulière. Il existe différentes grilles de MNT raster plus ou moins fines. L'échelle peut

aller de 250m à un mètre pour les MNT à très haute précision (Puech et al., 2009). Grâce aux MNT, il est possible de définir les sens d'écoulement en partant du principe que les écoulements suivent la pente la plus forte. A partir de cette hypothèse, deux types d'algorithmes permettent de définir les sens d'écoulement :

- Les algorithmes unidirectionnels comme l'algorithme D8 qui définit pour chaque maille de la grille du MNT une seule direction aval parmi ses huit voisins en choisissant la pente la plus forte (O'Callaghan and Mark, 1984).
- Les algorithmes multidirectionnels comme le Digital Elevation Model Networks (DEMON) qui permettent de rendre compte de la divergence des flux en attribuant pour chaque maille du MNT plusieurs directions en fonction de la pente (Costa-Cabral and Burges, 1994).

Comme expliqué dans le paragraphe précédent, le cheminement de l'eau peut être perturbé en zone urbaine par des contraintes à l'écoulement. Ainsi, il est important de prendre en compte ces obstacles dans la reconstruction du réseau hydrographique urbain.

Pour cela, il est possible de s'appuyer également sur les bases de données vectorielles pour avoir une description des contraintes à l'écoulement comme les réseaux d'assainissement. Certaines régions ou départements mettent en libre-service ces bases de données sous forme d'« open data ». Sinon, elles peuvent être fournies par les gestionnaires des réseaux. L'exploitation de ces données peut être difficile car certaines informations peuvent être manquantes ou peu fiables comme les connexions amont et aval des tronçons ou les sens d'écoulement. Il peut donc être difficile de construire un graphe orienté à partir de ces données pour décrire le cheminement de l'eau.

Pour pallier à ces données peu fiables ou incomplètes, il est possible de décrire le réseau hydrographique en combinant les méthodes vectorielles et MNT. C'est le cas de la méthode d'incrustation de réseau (Stream Burning) qui creuse artificiellement les mailles du MNT où passe un réseau artificiel pour modifier l'écoulement en versant (Saunders et al., 2000).

Une autre méthode basée sur l'utilisation du MNT et de l'analyse vectorielle est la méthode MNT TIN (Triangular irregular network) qui permet de représenter les flux d'écoulement d'eau en fonction des contraintes comme des fossés, des réseaux d'assainissement ou des talwegs. La méthode utilise non plus une grille régulière mais des triangles de superficie irrégulière, afin d'être plus précis dans les zones délicates (Rodriguez et al., 2013).

### **1.3. L'outil TOHR**

L'outil de reconstruction (TOHR), utilisé dans cette étude, permet de reconstruire le réseau hydrographique urbain complet en utilisant à la fois les données vectorielles et des données raster. Il est largement détaillé dans Lotfi et al (2016a). Il ne sera donc pas détaillé ici. Il permet de représenter les écoulements en rivière, en versant, en souterrain et en réseau d'assainissement de manière simplifiée à une résolution définie au préalable à l'aide d'une grille à maille régulière.

La reconstruction du réseau hydrographique suit les étapes suivantes : sélection de la zone habitat, sélection des nœuds du futur réseau à partir des altitudes des regards du réseau existant, ajout des ouvrages spéciaux (déversoirs d'orage, station de pompage) et connexion des nœuds (réseaux unitaire et d'eaux usées, réseau pluvial). Ensuite les différents types de réseaux présents sur la zone sont connectés entre eux (unitaire, eaux usées, eau pluviale, rivières) selon les ouvrages présents. Enfin, les écoulements en versant sont déterminés sur les zones sans rivière ni réseau d'assainissement, à l'aide de la méthode D8.

### **1.4. Modélisation hydrologique en zone urbaine**

#### **1.4.1. Les différents modèles hydrologiques en zone urbaine**

Il existe des modèles globaux, comme les modèles PURRS ou SLAMM qui considèrent le bassin versant comme une unité et ses caractéristiques (occupation du sol, type de sol, précipitation ...) sont uniformes sur l'ensemble de l'unité (Elliott and Trowsdale, 2007).

D'autre part, il existe des modèles semi-distribués comme les modèles CANOE, MOUSE, MUSIC, SWMM et P8 qui découpent le domaine de modélisation en sous-éléments homogènes d'un

point de vue hydrologique. L'échelle temporelle de ces différents modèles varie de l'heure (P8) à des pas de temps plus fins (MOUSE, MUSIC, SWMM) (Elliott and Trowsdale, 2007). Ces modèles simulent les écoulements en réseau d'assainissement, l'infiltration et la saturation du sol et représentent les liens entre la surface et les réseaux de drainage (Giangola-Murzyn, 2013). Il existe cependant une grande différence de concept entre ces modèles, comme par exemple entre le modèle CANOE qui utilise des équations complexes pour résoudre la partie hydraulique des écoulements et le modèle conceptuel MUSIC qui représente le système sous forme de réservoirs (Fletcher et al. 2013).

Aujourd'hui, grâce aux bases de données plus facilement disponibles et complètes sur l'occupation des sols, de plus en plus de modèles hydrologiques urbains sont spatialement distribués afin d'identifier les surfaces perméables et imperméables (Jacobson, 2011). Le modèle URBS par exemple est un modèle distribué qui s'appuie sur les bases de données de l'occupation du sol pour définir les flux d'eau à l'échelle de la parcelle, en identifiant pour chaque parcelle la part de sol naturel, de voirie et de bâtiment (habitation) (Rodriguez et al., 2005).

L'autre tendance observée est le développement des modèles à échelle temporelle très fine ou les modèles à simulation continue, qui permettent d'avoir des résultats plus précis et plus d'informations sur les débits, ce qui est nécessaire par exemple pour modéliser la qualité des eaux (Fletcher et al., 2013).

#### **1.4.2. Le modèle TEB-Hydro**

Le modèle TEB-Hydro a été développé au cours d'un partenariat entre le CNRM (Météo France et CNRS), et le laboratoire Eau et Environnement de l'IFSTTAR. Il s'inscrit dans la plate-forme SURFEX qui comprend le schéma de surface TEB dont les dernières évolutions sont présentées.

#### **1.4.3. Plateforme SURFEX**

La plateforme SURFEX (SURFaces Externalisées) décrit les flux de surface grâce à différents modèles pour chaque type de surfaces :

- Les zones urbaines avec le modèle TEB (Masson, 2000)
- Les zones naturelles avec le modèle ISBA (Boone, 2000; Noilhan and Planton, 1989)
- Les mers et les océans
- Les zones d'eau douce intérieure (FLAKE)

SURFEX découpe la zone d'étude en un maillage régulier. Pour chaque maille, on attribue une fraction d'occupation du sol suivant les 4 types de surface (urbaine, naturelle, eau douce intérieure, ou mers/ océans). Les flux de surfaces sont calculés de manière indépendante (sans interaction) pour chaque fraction par le modèle qui lui correspond. Les flux de la maille entière sont ensuite calculés grâce aux flux de chaque type de surfaces agrégés en fonction de la fraction qu'ils représentent au sein de la maille (Masson et al., 2013).

#### **1.4.4. Le modèle TEB (Town Energy Balance)**

Le modèle TEB permet de calculer les flux de surfaces et les échanges avec l'atmosphère en zone urbaine. Le modèle utilise la représentation rue canyon pour représenter l'espace. La rue canyon est séparée en trois compartiments : les toits, les murs et la route. Elle est de longueur infinie, et on renseigne certaines informations pour caractériser la rue, comme la hauteur des bâtiments, les caractéristiques thermiques et radiatives des différentes surfaces qui la composent (Masson, 2000).

Le modèle TEB a connu des évolutions pour prendre en compte des processus particuliers afin de s'adapter aux nouveaux aménagements urbains comme la représentation des systèmes CVC des bâtiments (Chauffage, Ventilation et Climatisation) grâce au module BEM (Bueno et al., 2012), l'introduction de toiture végétalisée grâce au module GREENROOF (Munck et al., 2013), ou encore l'introduction de la végétation en ville grâce au module GARDEN (Lemonsu, 2012). L'utilisation de ce module dans TEB donne lieu au modèle TEB-Veg. Pendant mon stage, seul le module GARDEN a été utilisé. C'est donc ce dernier que je détaillerai dans la suite du rapport.

### 1.4.5. Le modèle TEB-veg

Dans le modèle TEB-Veg, il y a un nouveau compartiment : le jardin qui s'ajoute à la voirie et au bâtiment. Les calculs de surface se font en tenant compte des interactions entre les trois compartiments. Les surfaces bâties sont traitées en prenant en compte l'impact de la végétation sur le bilan radiatif. Le bilan de la partie jardin est traité en prenant en compte les conditions atmosphériques au sein de la rue canyon et les effets d'ombrage du bâtiment sur le jardin.

Dans TEB-veg il n'y a pas de sous-sol sous le bâtiment et la voirie. L'hydrologie dans TEB-Veg consiste à calculer l'évaporation des réservoirs de surface en eau de la voirie et du bâtiment, car ce processus impacte directement le bilan en énergie. Le ruissellement de surface est calculé mais aucun bilan en eau n'est effectué. Cette variable n'est pas mémorisée. Ainsi, pour prendre en compte les phénomènes hydrologiques en zone urbaine, un module HYDRO a été ajouté au modèle TEB-veg (TEB-Hydro).

### 1.4.6. TEB-Hydro

Dans TEB-Hydro, la représentation de l'espace sous forme de rue canyon est conservée, ainsi que les trois compartiments (bâtiment, voirie et jardin) afin de prendre en compte les interactions jardin/bâtiments dans le calcul du bilan radiatif et du bilan en eau. Les compartiments bâtiment et voirie possèdent chacun réservoir de surface d'une capacité constante (en mm) qui intercepte une partie de la pluie nette. Pour la partie jardin, le réservoir de surface dépend de l'indice foliaire (LAI) qui varie selon les saisons. Une fois la capacité de ces réservoirs dépassée, on observe un phénomène de ruissellement.

Dans TEB-hydro, le bilan en eau s'exprime par l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (Lemonsu et al., 2007) :

$$P + I = E + R + D + \Delta W \left[ \text{kg} * \text{m}^{-2} * \text{s}^{-1} \right]$$

Avec  $P$  la précipitation totale,  $I$  l'apport en eau anthropique (irrigation),  $E$  l'évapotranspiration,  $R$  le ruissellement total,  $D$  le drainage profond et  $\Delta W$  la variation du stockage de l'eau en surface et en sous-sol pendant la période d'étude.

Le bilan en énergie s'exprime par l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (Lemonsu et al., 2007) :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \left[ \text{W} * \text{m}^{-2} \right]$$

Avec  $Q^*$  le rayonnement net incident,  $Q_F$  le flux anthropique,  $Q_H$  le flux de chaleur sensible,  $Q_E$  le flux de chaleur latente,  $Q_S$  le stockage du flux de chaleur et  $Q_A$  le flux de chaleur d'advection.  $Q_E$  flux de chaleur latente comprend l'évapotranspiration selon l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (Lemonsu et al., 2007) :

$$Q_E = \frac{E}{L_v} \left[ \text{W} * \text{m}^{-2} \right]$$

Avec  $E$  l'évapotranspiration, et  $L_v$  la chaleur latente de vaporisation.

Une des nouveautés du modèle TEB-Hydro est l'introduction d'un sous-sol sous le bâtiment, et la voirie. En effet, comme cité précédemment, une étude a montré que la voirie en ville n'est pas totalement imperméable puisque 6 à 9% de la pluie totale annuelle peut être infiltrée à travers une rue pavée (Ragab et al., 2003). Le sous-sol des trois compartiments bâtiment, voirie et jardin sont communs afin de faciliter les échanges d'eau dans le sol entre les différents compartiments. (Chancibault et al., 2015).

Dans tous les compartiments, les transferts d'eau et de chaleur dans la colonne de sols, entre les différentes couches du sol, mais aussi les échanges entre le sol et l'atmosphère (évapotranspiration notamment) sont représentés par le modèle ISBA-DF. Le nombre de couches est à paramétrer. Les écoulements dans le sol sont représentés dans l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (Boone, 2000) :

$$F = -k \frac{\partial}{\partial z} (\psi + z) - \frac{D_{v\psi}}{\rho_w} \frac{\partial \psi}{\partial z} - K_d$$

Avec  $F$  le flux vertical d'eau dans le sol ( $\text{m.s}^{-1}$ )  $k$  la conductivité hydraulique ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $\Psi$  le potentiel matriciel du sol (m)  $z$  la profondeur du sol (m)  $D_{v,\psi}$  la conductivité de vapeur isothermale ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ )  $\rho_w$  la densité de l'eau liquide ( $1000 \text{ kg.m}^{-3}$ ),  $K_d$  un terme additionnel de drainage profond ( $\text{m.s}^{-1}$ ).

L'infiltration de l'eau dans le sol des jardins est fonction du type de sol qui présente des caractéristiques particulières comme la teneur en eau au point de flétrissement, sa capacité au champ et à saturation.

De plus, le drainage de l'eau du sol par les réseaux d'assainissement a été ajouté dans TEB-Hydro via l'**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (Laffaille, 2017) :

$$I_{sew} = k(W_g) * I_p * D_{sew}$$

Avec  $I_{sew}$  le taux d'infiltration dans le réseau ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $k(W_g)$  la conductivité hydraulique de la couche du réseau, fonction de la teneur en eau dans la couche ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $I_p$  le paramètre décrivant l'état d'étanchéité du réseau (-), et  $D_{sew}$  la densité du réseau sur une maille.

Enfin, une fonction de transfert entre les mailles a été développée dans le modèle TEB-Hydro (Allard, 2015). Cette fonction de transfert est basée sur la construction d'hydrogrammes unitaires pour chaque maille du modèle pour une pluie nette uniformément répartie dans l'espace et d'intensité constante. L'hydrogramme unitaire est défini pour chaque type d'écoulement : le ruissellement de surface, l'écoulement en réseaux d'assainissement, l'écoulement souterrain et l'écoulement en rivière. Grâce au principe de proportionnalité (la réponse du bassin est proportionnelle à la hauteur d'eau de la pluie), on peut obtenir un hydrogramme total aux exutoires de la zone d'étude en additionnant les hydrogrammes unitaires par le principe de convolution des mailles contributives au débit des exutoires (Hingray et al., 2009). Différentes méthodes sont disponibles pour obtenir un hydrogramme unitaire. Les méthodes de transfert empirique ou systémique permettent de déduire des débits à partir des pluies observées. Ces méthodes supposent un calage important, ainsi que l'obtention de données sur les bassins versants (Hingray et al., 2009). La méthode utilisée dans le modèle TEB-Hydro est la méthode géomorphologique : le chemin parcouru par une goutte d'eau pour chaque maille jusqu'à son exutoire est calculée par le modèle TOHR, ce qui permet d'en déduire les temps de parcours à l'aide de vitesses constantes prescrites par type d'écoulement (Allard, 2015)..

## 2. Présentation du cas d'étude

La zone d'étude du projet PIREN-Seine s'étend sur Paris et sa petite couronne. Cependant, au début de cette étude nous disposons seulement des données des Hauts-de-Seine et nous avons donc concentré nos travaux sur cette zone. De plus l'année 2014, est celle pour laquelle nous disposons du plus de données de gestion des réseaux d'assainissement qui permettent de valider nos résultats. Ainsi, le paragraphe suivant se concentrera essentiellement sur la description du département des Hauts-de-Seine et de l'année 2014.

### 2.1. Paris et sa petite couronne

#### 2.1.1. Localisation

La zone d'étude du projet PIREN-Seine est constituée de Paris et sa petite couronne, qui représente une zone composée de 4 départements (Paris, les Hauts-de-Seine, Seine-Saint-Denis et le Val-de-Marne) et 124 communes pour une superficie de  $762 \text{ km}^2$  (Sénat, 2017). Cette zone est aujourd'hui très densément peuplée, notamment Paris qui compte  $20\,569 \text{ habitants/km}^2$ . Ses départements limitrophes ont une densité de population de  $8\,724 \text{ hab/km}^2$  pour les Hauts-de-Seine,  $6\,287 \text{ hab/km}^2$  pour la Seine-Saint-Denis et  $5\,277 \text{ hab/km}^2$  pour le Val-de-Marne (Sénat, 2017).

### 2.1.2. Le climat

Paris et sa petite couronne se situent dans une zone au climat de type océanique altéré car l'écart des températures annuelles est plus important que pour la bordure océanique, mais également car les précipitations y sont moindres (Météo France, 2016).

Le Tableau 1 renseigne les normales annuelles de 1981 à 2010 pour les variables climatiques telles que la température, la hauteur des précipitations ou l'ensoleillement.

Tableau 1 : Normales annuelles entre 1981 et 2010. Source (Météo France 2017)

Témpérature minimale (1981-2010)	8,9 °C
Témpérature maximale (1981-2010)	16,0 °C
Hauteur de précipitations (1981-2010)	637,4 mm
Nb de jours avec précipitations (1981-2010)	111,1 j
Durée d'ensoleillement (1991-2010)	1661,6 h
Nb de jours avec bon ensoleillement (1991-2010)	51,45 j

L'année 2014 a été particulièrement chaude pour Paris et sa petite couronne. Sa température moyenne annuelle était de 13,6°C soit 1,1°C de plus que la normale calculée entre 1981 et 2010, qui est de 12,5°C. On remarque que presque tous les mois de l'année présentent des températures supérieures aux normales, à l'exception du mois d'août, qui présente une moyenne mensuelle inférieure de 0,4°C par rapport à la moyenne mensuelle calculée entre 1961 et 1990. Les mois de mai et juin ont été les moins chauds par rapport à la moyenne mensuelle (Infoclimat, 2014).

### 2.1.3. Pluviométrie et caractéristiques hydrologiques

Les pluies sont plus importantes en hiver sur Paris et sa petite couronne qu'en été. Sur la période de 1981 à 2010, la normale annuelle est de 637,4 mm d'eau pour une moyenne de 111 jours pluvieux sur la même période comme le montre la Figure 2.

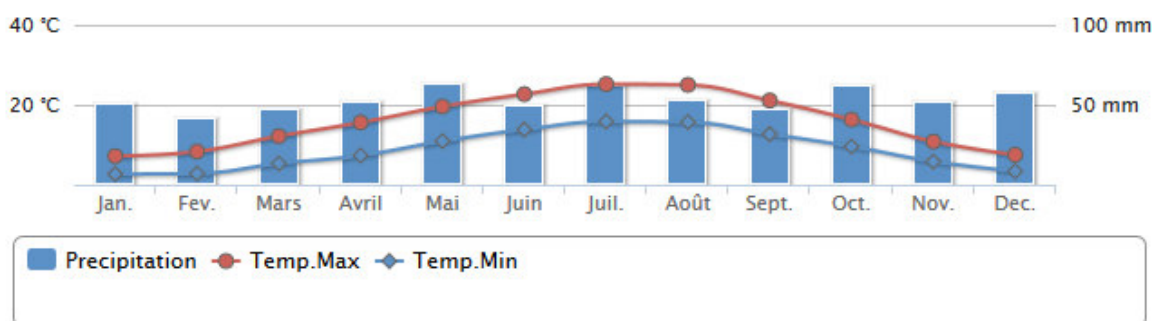


Figure 1 : Bilan des normales annuelles de température et de précipitation sur Paris pour la période 1981-2010. Source (Météo France 2016)

Pour l'année 2014, le cumul des précipitations a été plus important par rapport à la moyenne annuelle calculée entre 1981 et 2010 (637mm). En effet, il est tombé en 2014 700,2mm de pluie, soit 62,8 mm de plus que la normale.

En 2014 le printemps et l'été ont été plus pluvieux que le reste de l'année. Les mois d'avril, mai, juin et juillet et août présentent le plus important cumul de précipitation mensuel. Le mois d'août a été le plus pluvieux de l'année avec un cumul mensuel de 107,3 mm. Le mois de Septembre a été le plus sec de l'année 2014 (Infoclimat, 2014).



#### **2.1.4. Ensoleillement**

Paris et sa petite couronne présente un ensoleillement plus important en été qu'en hiver, avec une normale annuelle, calculée entre 1991 et 2000, de 1661 heures d'ensoleillement. L'année 2014 a connu un été moins ensoleillé que la normale, sauf pour le mois de juin qui était au-dessus de la normale. Les mois de septembre et mars ont été également plus ensoleillés que la normale.

#### **2.1.5. Géologie de la zone**

Paris et sa petite couronne font partie du bassin parisien, est un des plus grands des trois bassins sédimentaires du territoire français, qui s'étend sur le tiers nord du territoire sur une superficie de 110 000 km<sup>2</sup> environ.

Le bassin parisien repose sur un socle cristallin d'âge hercynien. Les roches sédimentaires sont disposées en auréoles concentriques avec les plus récentes au centre et les plus anciennes en périphérie (Delmas et al., 2002).

Paris et sa petite couronne se situent au cœur du bassin parisien. On y observe différents terrains sédimentaires : calcaires, marnes, argiles, sables, gypse, meulière. Ils correspondent à différents étages géologiques (Sparnacien, Lutétien, Ludien et Stampien). On observe également des alluvions de la Seine et de la Marne. *Rapport d'activités*, 2015)

#### **2.1.6. Occupation du sol**

Les surfaces urbanisées dans la zone de Paris et sa petite couronne sont largement majoritaires puisqu'elles représentent 84,5% du territoire. Parmi ces espaces urbanisés, on observe la présence de parcs, jardins, et terrains de sports. Ils représentent 16,7% pour Paris et sa petite couronne, soit 9 points de moins que la moyenne nationale (25,7%). Le type d'habitat est principalement collectif au centre de la zone (Paris) tandis que les départements de la petite couronne mélangent des habitats collectifs et des habitats individuels denses. Cependant, on observe un recul des surfaces affectées à l'habitat individuel dans les départements limitrophes depuis les années 1990 pour les Hauts-de-Seine et la Seine-Saint-Denis, et depuis 1994 pour le Val-de-Marne (IAU, 2001).

Le réseau hydrographique de Paris et sa petite couronne est situé dans le bassin de la Seine, l'un des huit plus grands bassins hydrographiques français. La zone est traversée par la Seine ainsi que ces deux affluents principaux, la Marne et l'Oise. On observe également des cours d'eau canalisés principalement en Seine-Saint-Denis (La vieille Mère, la Morée) et dans les Hauts-de-Seine (la Bièvre). Des canaux sont également présents dans le département de Seine-Saint-Denis et dans le nord des Hauts-de-Seine vers la zone portuaire (Tabuchi et al., 2016).

Dans cette zone, on observe également la présence d'espaces naturels, agricoles ou boisés à hauteur de 15,5%. Ces zones naturelles sont majoritairement présents à l'ouest du département des Hauts-de-Seine (forêt de Malmaison, de Fausses repos, de Meudon) et à l'est de Paris (bois de Vincennes) (IAU, 2001).

## **2.2. Fonctionnement du réseau d'assainissement de Paris et sa petite couronne**

### **2.2.1. Historique du réseau d'assainissement**

Historiquement, le centre de Paris possède un réseau de type unitaire, qui récolte à la fois les eaux pluviales et les eaux usées. En effet, le premier égout parisien voit le jour en 1370 rue Montmartre, et récupère les eaux pluviales ainsi que les eaux usées pour les acheminer vers le ruisseau Ménilmontant. Le réseau se développe ensuite très lentement au fil des siècles. C'est en 1850 que sa construction connaît un véritable essor avec l'arrivée du Baron Haussmann, et l'ingénieur Eugène Belgrand. Ce dernier fait construire un réseau d'assainissement qui atteint 600km de long en 1878 (Ville de Paris, 2017). C'est en 1875 qu'apparaît la nécessité d'épurer les eaux usées se concentrant en un point à l'aval de Paris. Les eaux sont alors épandues sur un terrain adopté par la ville de Paris. Un nouveau programme d'assainissement en 1929 prévoit la construction de la station d'épuration d'Achères, et préconise la création d'un réseau séparatif. La réorganisation administrative de la ville de Paris en 1964 entraîne la création d'une administration de l'assainissement parisien, le SIAAP, créée en 1970 (APUR, 2015). Ainsi, historiquement et en liaison avec l'urbanisation des zones autour de

Paris, on observe que les communes proches de Paris possèdent un réseau unitaire et que les communes plus éloignées ou plus récentes possèdent du réseau séparatif (Lotfi et al. 2016a).

Depuis les années 1970, pour faire face à la démographie croissante qui entraîne une densité de population élevée à Paris et dans ses départements limitrophes, de nouveaux ouvrages sont construits, et de nouveaux outils sont utilisés pour optimiser la gestion du réseau comme la télédétection dès les années 80.

### **2.2.2. Les contraintes majeures**

Le premier enjeu est de maîtriser et diminuer les rejets d'eaux usées dans la Seine lors d'événements pluvieux. Sur Paris et sa petite couronne on recense 250 points de rejets dans le milieu naturel. Ces rejets unitaires (via les déversoirs d'orages) ou d'eaux pluviales peuvent passer de  $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  à  $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  lors d'un épisode pluvieux (APUR, 2015). Ces rejets peuvent présenter un risque de pollution pour le milieu naturel. La construction de nouveaux équipements de stockage ainsi que l'automatisation des déversoirs d'orage ont permis de réduire ces déversements (de 19 millions de  $\text{m}^3$  en 1999 à 2 millions en 2012 pour la ville de Paris) et de limiter les rejets dans le milieu naturel. Ainsi, la Seine a retrouvé ses qualités physico-chimiques qu'elle n'avait plus depuis deux siècles (APUR, 2015).

Le deuxième enjeu consiste à éviter les débordements en réseau, dus au drainage des eaux pluviales par les réseaux unitaires, ce qui entraîne un fort volume d'eau en réseau lors d'épisodes pluvieux.

### **2.2.3. Gestion du réseau d'assainissement**

Le réseau d'assainissement de Paris et sa petite couronne est complexe de par son fonctionnement et le grand nombre de gestionnaires du réseau. De la plus petite échelle à la plus grande, le réseau d'assainissement de la ville de Paris est constitué des réseaux communaux, des réseaux départementaux et du réseau interdépartemental (géré par le SIAAP).

#### *Le réseau communal*

Ce réseau est géré par la commune ou une par des Etablissements Publics Territoriaux (EPC), qui assurent la collecte des eaux usées et pluviales et le transport jusqu'au réseau départemental. Le réseau communal n'étant pas pris en compte dans notre étude, son fonctionnement ne sera pas détaillé.

#### *Le réseau départemental*

Le réseau départemental est géré par les 4 départements de manière distincte mais concertée, grâce à des services d'assainissement en régie: la Section de l'assainissement de Paris (SAP75), le Service départemental de l'assainissement des Hauts de Seine, la Direction de l'Eau et de l'Assainissement du Conseil Départemental de Seine-Saint-Denis (DEA93), la Direction des Services de l'Environnement et de l'Assainissement du Conseil Départemental du Val de Marne (DSEA94) (Lotfi et al., 2016b).

Ce réseau assure le transport des eaux du réseau communal vers le réseau interdépartemental et représente un équivalent de 5 millions d'habitants (SIAAP, 2013). Il assure également, à titre dérogatoire, la collecte des eaux des riverains, qui pour des raisons de topographie ou de géographie, ne peuvent se raccorder sur un réseau communal. Le réseau départemental peut également transporter des effluents qui proviennent d'activités non domestiques (i.e. industriels, restaurants, pressing, etc.) qui doivent impérativement éliminer leur pollution spécifique avant rejet à l'égout. Le département des Hauts-de-Seine estime à 3,5 millions de  $\text{m}^3/\text{an}$  les rejets industriels dans son réseau Tarb (Conseil Départemental des Hauts-de-Seine, 2007).

Cette étude s'intéresse essentiellement au département des Hauts-de-Seine. Ainsi, la suite de la présentation du réseau départemental traitera exclusivement des Hauts-de-Seine.

Le réseau départemental des Hauts-de-Seine est constitué de 67% de réseau unitaire et de 33% séparatif, principalement situé dans le sud du département. Son réseau est visitable à 63%. Il comprend 85 points de rejet en Seine via 126 déversoirs d'orage, dont 24 seuils de régulation et 75 instrumentés. Il est également composé de 9 ouvrages de rétention des eaux, d'un volume cumulé d'environ 55 000  $\text{m}^3$  (Lehoucq and Pister, 2016). On observe à l'ouest du département, une zone sans réseau

d'assainissement. L'assainissement de cette zone est géré par la société Hydreaulys et non par le département. De ce fait nous n'avons pas de données disponibles pour cette zone.

Le département a défini un schéma départemental d'assainissement pour la période de 2005 à 2020 en se fixant deux objectifs afin d'orienter sa gestion de l'assainissement (Conseil Départemental des Hauts-de-Seine 2006) :

- Améliorer la qualité des milieux naturels aquatiques par la diminution des rejets en Seine, la gestion des flux et une exploitation optimisée des réseaux
- Réduire les inondations liées aux orages par la limitation à la source du ruissellement et la gestion optimisée des réseaux

Plusieurs actions sont mises en place par le département pour répondre à ses objectifs. Par exemple, la gestion des eaux en amont du réseau est une des priorités du département pour éviter la saturation du réseau et les potentiels rejets dans le milieu. Pour cela, le département encourage les collaborations entre l'urbanisme et les spécialistes de l'assainissement pour réduire le ruissellement des eaux via les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales.

D'autre part, il est important de sensibiliser les particuliers et les communes afin de réduire les rejets et la pollution des eaux usées.

Enfin, le département étant sensible aux risques de débordement il est primordial de réduire le risque d'inondation. Ainsi, la construction d'ouvrages de rétention ou de régulation sur le réseau départemental est prévue.

Pour gérer son réseau en temps réel, le département dispose d'un outil de Gestion Assistée par Informatique de l'Assainissement (GAIA) qui est composé d'équipements qui collectent les données sur le terrain (mesure de pluie, de niveau d'eau, de vitesse, de débit ...) puis les répertorient dans un système central. Ces mesures permettent en temps réel de connaître l'état du réseau et de prendre des décisions de gestion, et en temps différé, de créer une base de données pour établir les bilans de gestion et de fonctionnement et pour caler le modèle du département. Ce modèle permet de calculer le ruissellement de surface et les écoulements en réseau afin de reproduire les débits en tout point du réseau et en tout instant pour un événement donné (Conseil Départemental des Hauts-de-Seine 2006).

#### *Le réseau interdépartemental*

Le réseau interdépartemental est géré par le SIAAP qui assure le transport des eaux jusqu'aux stations d'épurations. Le SIAAP gère 2,5 millions de m<sup>3</sup> par temps sec d'eaux usées chaque jour, sur un territoire de 1 800km<sup>2</sup> qui comprend 9 millions d'usagers (APUR 2015).

Le réseau du SIAAP est constitué de 440km de collecteurs et d'émissaires d'eaux pluviales, eaux usées et unitaire qui acheminent les eaux usées et eaux pluviales jusqu'aux stations d'épuration où elles sont traitées. Le réseau du SIAAP possède 6 stations d'épurations réparties sur le territoire (SIAAP, 2017).

Concernant la gestion du réseau, les opérateurs du SIAAP gèrent le réseau en temps réel, en fonction des ouvrages en chômage pour maintenance, des limitations des STEP et des conditions météorologiques. Cependant, pour gérer au mieux les effluents arrivant dans son réseau, le SIAAP possède plusieurs outils et ouvrages détaillés ci-dessous.

Le SIAAP possède un outil MAGES (Modèle d'Aide à la Gestion des Effluents du SIAAP) d'aide à la décision qui permet une gestion globale du réseau d'assainissement. L'outil permet de communiquer entre les différents acteurs du réseau de Paris et sa petite couronne pour une gestion optimisée en temps réel du réseau. (SIAAP, 2012).

En temps de pluie, le SIAAP est également doté de 16 déversoirs d'orage qui peuvent rejeter les eaux directement dans le milieu naturel pour soulager les réseaux saturés. Il existe près de 250 points de rejet en Ile-de-France dans le périmètre d'intervention du SIAAP. La grande majorité des rejets en temps de pluie correspondent à des rejets d'eau unitaire. Bien que les rejets aient diminué, ils représentaient en 2012 2 117 000m<sup>3</sup> d'eau. Les déversoirs d'orage de Clichy et la Briche sont les plus importants, et représentent 80% du volume déversé (7,43 Mm<sup>3</sup> pour Clichy et 4,03 Mm<sup>3</sup> pour la Briche) (APUR, 2015).

Le SIAAP et ses partenaires disposent également de 9 bassins de stockage et 6 tunnels réservoirs pour réduire les déversements dans le milieu naturel et soulager les STEP en temps de pluie. Ces ouvrages totalisant une capacité de rétention de plus de 930 000 m<sup>3</sup>.

Dans cette étude nous avons choisi de nous intéresser uniquement aux réseaux départementaux et interdépartementaux. Cette décision fait suite au choix de l'échelle de résolution choisie (250m) pour la modélisation dans le cadre des travaux de (Lotfi et al., 2016b). En effet, considérer le réseau communal serait trop précis pour notre échelle de représentation. De plus, cette décision permet de gérer plus facilement dans un premier temps, les données car il y a moins de gestionnaires concernés.

### **3. Reconstruction du réseau hydrographique urbain complet des Hauts-de-Seine**

Pour alimenter le modèle hydrologique (TEB-Hydro) utilisé par la suite, il est nécessaire de représenter le réseau hydrographique complet de la zone, grâce à l'outil TOHR (cf I. 3)) mais de façon simplifiée car adaptée à la résolution de la grille utilisée pour la modélisation. Cette reconstruction se fait à une résolution de 250m. Dans le cadre de cette étude, le département des Hauts-de-Seine a été choisi comme zone d'étude. Avant toute reconstruction du réseau, il est primordial de bien comprendre le fonctionnement complexe du réseau d'assainissement du département. M. Roux, Chef de l'unité d'étude à la Direction de l'eau du département des Hauts-de-Seine nous a ainsi aidé lors de deux rencontres.

#### **3.1. Compréhension du réseau d'assainissement des Hauts-de-Seine**

Le but de la reconstruction du réseau des Hauts-de-Seine, est de représenter de manière la plus réelle possible en s'adaptant à l'échelle de résolution de notre modèle, le fonctionnement du réseau d'assainissement en temps de pluie courante ainsi que ses connexions avec le réseau interdépartemental du SIAAP. En effet, le réseau départemental peut avoir une configuration tout à fait différente en cas de pluie importante, suivant l'état initial du réseau et encore plus en temps de crue. Pour cela, nous avons eu à disposition des bases de données SIG en format shape des réseaux d'assainissement interdépartemental par le SIAAP, et du réseau départemental par le Conseil Départemental des Hauts-de-Seine. Ces bases de données renseignent la localisation et la cote radier des tronçons des réseaux d'assainissement ainsi que des regards du réseau, la localisation des stations de pompage et des déversoirs d'orage. Ces informations sont nécessaires à l'outil TOHR pour reconstruire le réseau. Le Conseil Départemental des Hauts-de-Seine a également fourni un fichier excel résumant la fréquence et les volumes de déversement des déversoirs du département pour l'année 2016 afin d'évaluer les déversoirs d'orage les plus importants à conserver dans notre reconstruction.

De plus, la présence d'ouvrages électromécaniques qui permettent de réguler en temps réel la gestion du réseau rend difficile la représentation du fonctionnement du réseau de manière précise. Cependant, la rencontre avec la Direction de l'eau du département des Hauts-de-Seine a permis de clarifier quelques points de fonctionnement du réseau.

Comme précisé dans le paragraphe précédent, le réseau d'assainissement des Hauts-de-Seine est majoritairement unitaire, mais possède une partie séparative dans le sud du département. Les eaux usées de la partie séparatives sont envoyées vers la station d'épuration de Valenton, et les eaux unitaires sont envoyées vers l'usine Seine Aval. Dans cette zone séparative, les eaux usées sont envoyées vers Valenton, et les EP sont délestées dans la Seine via les deux collecteurs du réseau interdépartemental, le Fresnes-Choisy et l'émissaire de Villejuif. Cependant, pour la zone du Ru des Blagis, située dans la partie séparative du département les eaux pluviales sont envoyées vers les égouts profonds qui longent la Bièvre à destination de l'usine de Valenton. Au-delà d'un certain débit, le bassin de stockage de l'Hay-les-Roses intercepte le surplus d'eau, puis les restituent vers l'égout profond. En cas de pluie très importante, les eaux pluviales peuvent être rejetées directement dans le milieu naturel (la Bièvre). Ce dispositif permet de réduire les risques de débordement de la Bièvre et les risques de pollution du milieu naturel par les eaux du Ru des Blagis qui véhiculaient des flux importants d'eaux usées dû à des mauvais branchements. Ainsi, pour la suite de notre reconstruction, nous avons décidé de passer cette zone en réseau unitaire, puisque son comportement se rapproche

plus du réseau unitaire (les eaux usées et pluviales sont envoyées en stations d'épuration) que d'un réseau séparatif.

Concernant les déversoirs d'orage (DO) dans le département, 115 points nous ont été fournis. En comparant ces DO avec les données de déversement annuel pour l'année 2016 (volume, fréquence de déversement) ainsi qu'après discussion avec M. Roux, nous avons sélectionné les 21 déversoirs les plus importants dans notre reconstruction. En effet, il a été décidé de ne pas conserver les déversoirs d'orage de la partie séparative, puisque la surface contributive à ces DO est réduite (du fait de la présence d'un réseau séparatif), ces déversoirs ne représentent qu'une petite partie des déversements sur une année.

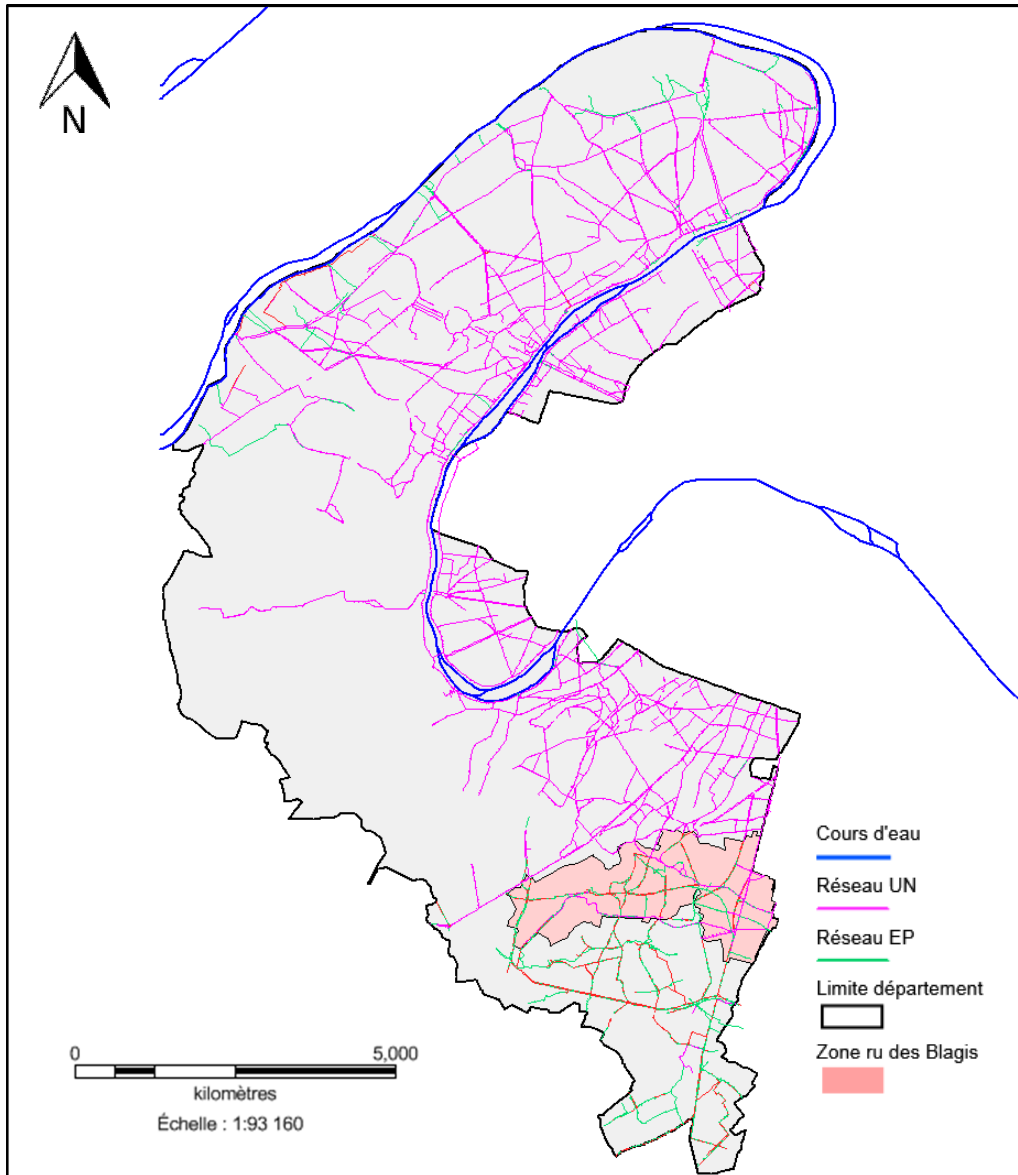


Figure 2 : En rose la zone du Ru des Blagis dans le département des Hauts-de-Seine. Le réseau d'assainissement exhaustif est aussi représenté (en rose UN, en vert EP et en rouge EU)

### 3.2. Evaluation du réseau reconstruit simplifié

Il est difficile d'évaluer la reconstruction du réseau car nous ne disposons pas de graphe orienté pour le réseau réel. De ce fait, d'autres méthodes permettent d'évaluer les résultats de reconstruction des réseaux. Tout d'abord nous pouvons évaluer visuellement la reconstruction en identifiant les différences entre les arcs réels et reconstruits. Pour approfondir cette reconstruction, il est également possible d'évaluer la différence entre les surfaces drainées par des exutoires spécifiques entre le réseau réel et construit. Enfin, il est possible d'étudier la distribution des distances aux exutoires.

#### 3.2.1. Analyse visuelle

La reconstruction du réseau du SIAAP a été réalisée par Lotfi et al. (2016a) Sa reconstruction finale du réseau du SIAAP a été validée par le SIAAP.

Les réseaux réels et reconstruits sont présentés respectivement dans les Figures 4 et 5. On rappelle que la zone du ru des Blagis, initialement en réseau séparatif a été transformée en zone unitaire du fait de son fonctionnement.

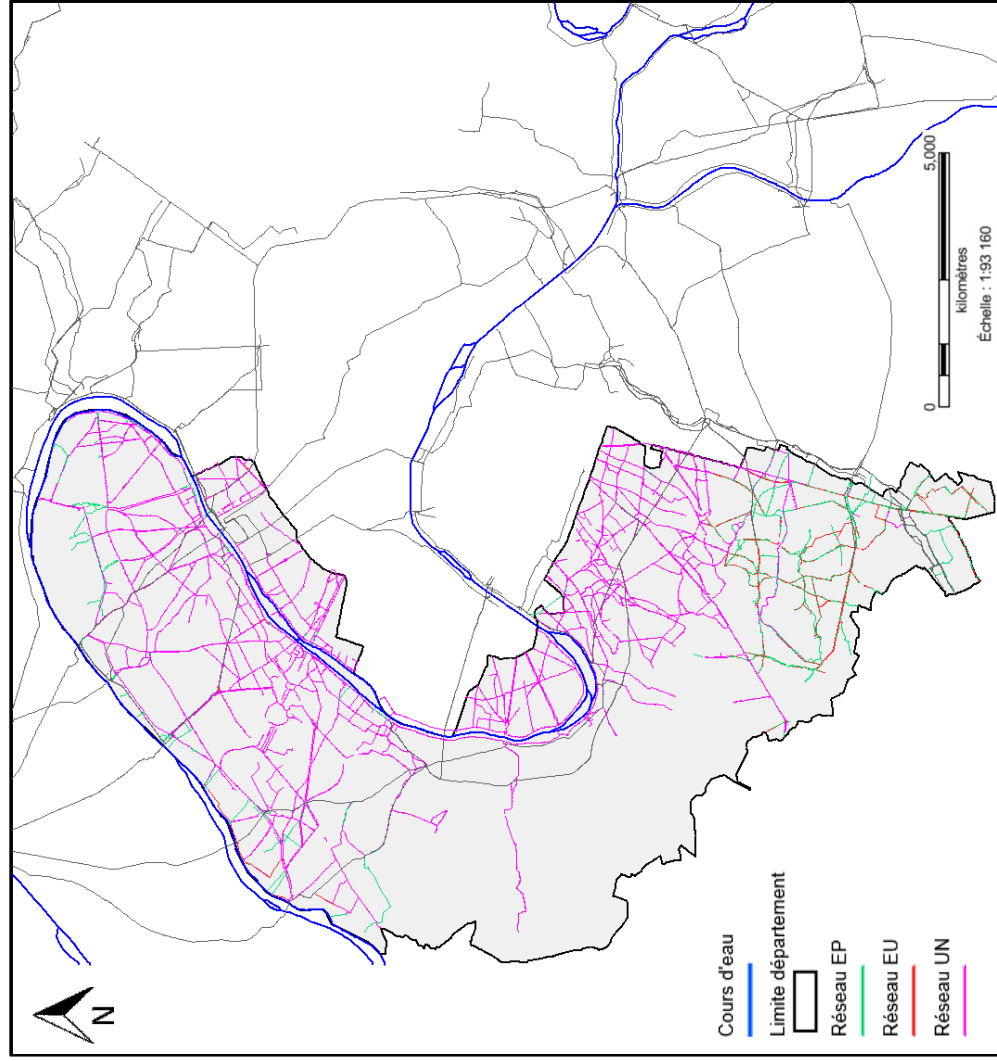


Figure 4 : Réseau d'assainissement interdépartemental (en gris) et départemental (Hauts-de-Seine) réel fourni par respectivement le SIAAP et les Hauts-de-Seine.  
Source : (Conseil Départemental Hauts-de-Seine 2017 ; SIAAP 2016)

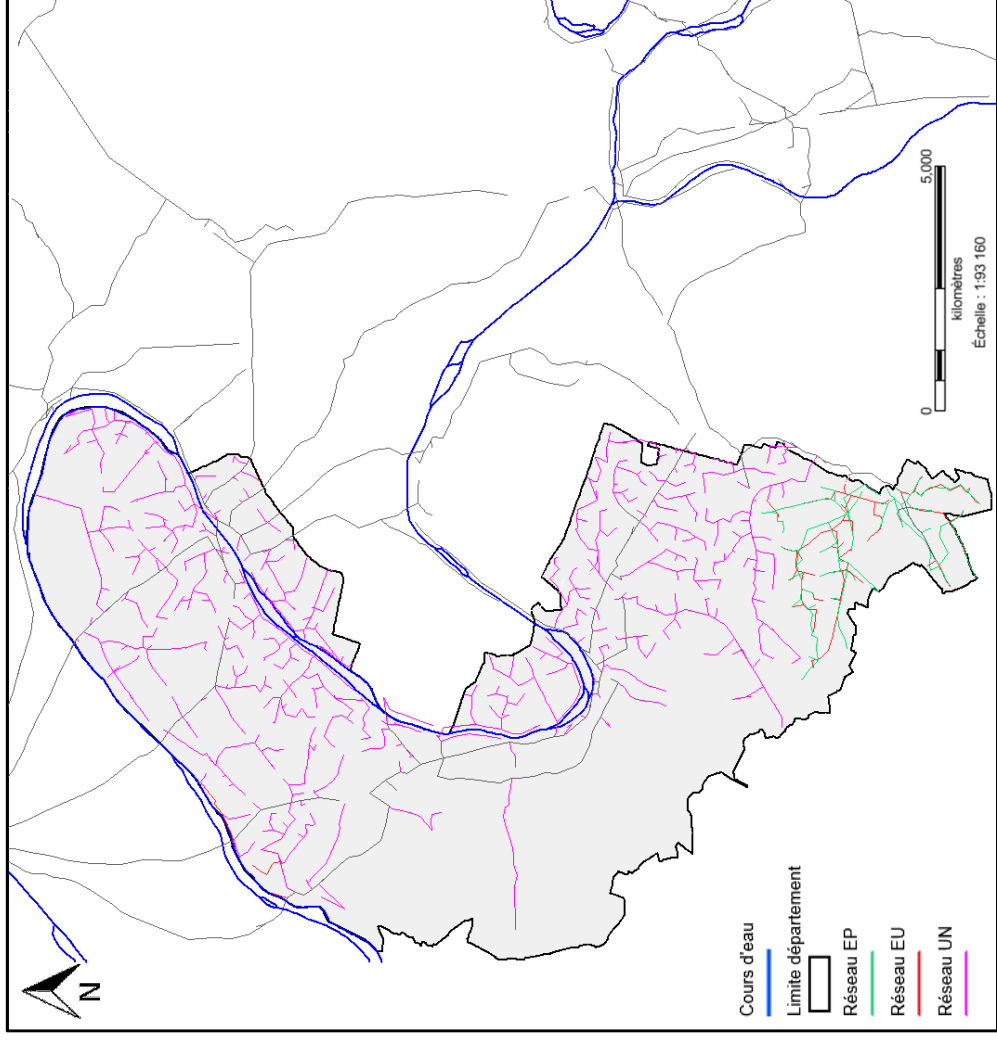


Figure 5 : Réseau d'assainissement interdépartemental (en gris) et départemental (Hauts-de-Seine) reconstruit par l'outil TOHR à une résolution de 250m.

Pour les stations de relevage, 38 stations de pompage nous ont été indiquées. Les stations ont plusieurs rôles, elles peuvent servir à remonter les eaux usées, les eaux pluviales, ou elles peuvent avoir un rôle de défense de crue (en changeant l'exutoire des eaux pluviales en cas de crue de la Seine). Dans notre reconstruction nous nous intéressons seulement aux stations qui relèvent les eaux usées. Notre échelle de résolution étant de 250m, il a été nécessaire de ne sélectionner que les stations de pompage qui ont un impact significatif à notre échelle. Ainsi, seulement 10 stations ont été conservées dans notre reconstruction.

La reconstruction étant simplifiée, on obtient un réseau reconstruit moins dense que le réseau réel. Visuellement, le réseau reconstruit semble être plus arborescent que le réseau réel. Ceci est dû à l'outil TOHR qui reconstruit le réseau de manière à n'avoir qu'un seul exutoire aval pour chaque nœud du réseau. Cet aspect plus arborescent du réseau reconstruit est également dû au fait que nous avons choisi de ne pas représenter les quelques maillages du réseau. La Direction de l'eau du département nous a en effet indiqué que les maillages étaient peu nombreux sur le réseau et qu'ils ne modifient pas l'exutoire final des eaux usées. Cependant, pour pouvoir faire face aux besoins d'exploitation, le département cherche à accroître les capacités de maillage de son réseau.

On observe également que les tronçons de type eau pluviale présents dans le réseau réel dans le nord du département n'ont pas été représentés dans le réseau reconstruit. En effet, ces tronçons représentent seulement les déversements des déversoirs d'orage. De ce fait, ils n'ont donc pas besoin d'être représentés.

### 3.2.2. Analyses des surfaces drainées par les exutoires

Pour aller plus loin dans l'évaluation de la reconstruction, il est possible de comparer les aires drainées en certains points du réseau. Pour cela nous disposons des zones de collecte fournies par le département. Elles correspondent aux aires dont les eaux usées communales et départementales sont drainées par les nœuds de connexion du réseau départemental avec le réseau interdépartemental. Nous avons choisi d'examiner les zones les plus significatives. Lorsque les points de raccordement étaient sur le même collecteur interdépartemental (CAA, CAB, ES1B ou SAN), nous avons regroupé les zones et avons conservé un seul exutoire, celui le plus en aval. Les zones de collecte fournies par le département sont présentées en Figure 6.

Les aires de ces zones de collectes sont ensuite comparées avec les surfaces drainées par les mêmes exutoires dans le réseau reconstruit. Ces surfaces sont représentées en Figure 6. Pour les zones traversées par un réseau séparatif, les surfaces drainées comprennent seulement les mailles drainées par un réseau de type eaux usées. Pour les zones de type unitaire, les surfaces drainées comprennent les écoulements en réseau et en versant.

Tableau 2 : Tableau comparatif des surfaces réelles et reconstruites drainées par les exutoires des zones de collecte

Nom de l'exutoire	Surfaces drainées du réseau reconstruit ( $S_{sim}$ ) (km <sup>2</sup> )	Surface de la zone de collecte associée ( $S_{obs}$ ) (km <sup>2</sup> )	% écart $(\frac{S_{sim}-S_{obs}}{S_{obs}}) * 100$
BLR	11,06	9,24	19,77
ES1B	29,75	27,31	8,94
SUR7	18,06	16,76	7,75
SAN1	36,81	7,74	375,4
SAN2	4,13	2,86	44,25
CAB	14,56	13,55	7,51
CAA	23,88	23,54	1,4
ANT1	5,94	11,09	-46,46
ANT2	3,44	6,01	-42,76
<b>Total</b>	<b>141,25</b>	<b>118,09</b>	<b>19,61</b>



De manière générale, on observe que la reconstruction surestime les surfaces drainées par les exutoires définis. En effet, la superficie totale de notre département drainée par les différents exutoires est plus grande que la valeur exacte (29,18 km<sup>2</sup> d'écart soit 19,61%). La zone SAN1 est très largement surestimée avec 375% d'écart par rapport à la surface réelle. Ceci s'explique par une contribution importante de l'écoulement en versant dont une partie provient de l'extérieur du département. Cependant dans la réalité, les eaux pluviales hors du département sont drainées par les réseaux d'assainissement du département ou des communes limitrophes. Pour avoir une surface plus cohérente avec la réalité, il aurait donc fallu ne pas tenir compte de ces contributions hors zone dans la reconstruction du réseau hydrographique.

A l'inverse, la reconstruction a minimisée les bassins versants des zones ANT1 et ANT2 par rapport aux surfaces initiales avec respectivement -46,46% et -42,76% d'écart. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces zones sont de types séparatif. Ainsi, seules les mailles drainées par le réseau d'assainissement EU sont comptabilisées dans le calcul de la surface reconstruite. On peut supposer que le reste de la zone est traversée par un réseau communal, et que la sous-estimation du bassin versant provient de la non reconstruction de ce réseau.

### 3.2.3. Fonction largeur

Afin de valider notre reconstruction, nous avons calculé une fonction largeur en comparant les données de reconstruction du réseau à la résolution de 250m et le réseau reconstruit sans simplification. La fonction largeur permet de comparer la distribution des distances aux exutoires entre les deux réseaux. En effet, la distance aux exutoires est un élément essentiel dans notre modélisation hydrologique car associée à une vitesse, elle permet de se rapprocher de l'hydrogramme utilisé pour la fonction de transfert sous l'hypothèse d'une vitesse constante. La fonction largeur calcule pour chaque intervalle de distance à l'exutoire allant de 0m à 8 km tous les 500m, le nombre de valeurs correspondant. Nous avons calculé notre fonction largeur sur les distances aux exutoires en réseau pour les réseaux EP et UN.

Le temps de calcul étant très long pour reconstruire le réseau sans simplification, nous ne nous sommes concentrés que sur la zone sud du département. La comparaison entre le réseau ainsi reconstruit et le réseau initial fournit par le département est en Figure 7. On observe quelques arcs de longueurs significatives reconstruits et non existants dans le réseau initial (traits verts) et à l'inverse quelques arcs du réseau initial non reconstruits.

#### *Distances en réseau à l'exutoire pour les eaux pluviales*

Les résultats de la fonction largeur pour les distances à l'exutoire montrent une forte sous-estimation pour les distances entre 3 et 4km ainsi que pour la classe 6.5 km et une forte surestimation pour les distances entre 4.5 et 6.5km (Figure 8).

Les moyennes des distances à l'exutoire des deux reconstructions du réseau sont respectivement 4,15 km pour le réseau simplifié et 4km pour le réseau à l'échelle réelle. Les écarts types des deux moyennes sont également proches, respectivement 1,36 et 1,39.

Ainsi, d'un point de vue hydrologique, le débit total ne semblerait pas être impacté car les distances à l'exutoire sont en moyenne égales. Cependant, les écarts significatifs observés pour différentes classes de distance auront un impact sur l'hydrogramme à l'exutoire. En effet, la sous-estimation des distances à l'exutoire accélère l'écoulement et peut entraîner des pics de débit plus précoces tandis qu'une surestimation retarde l'écoulement et peut entraîner des pics de débits plus tardifs.

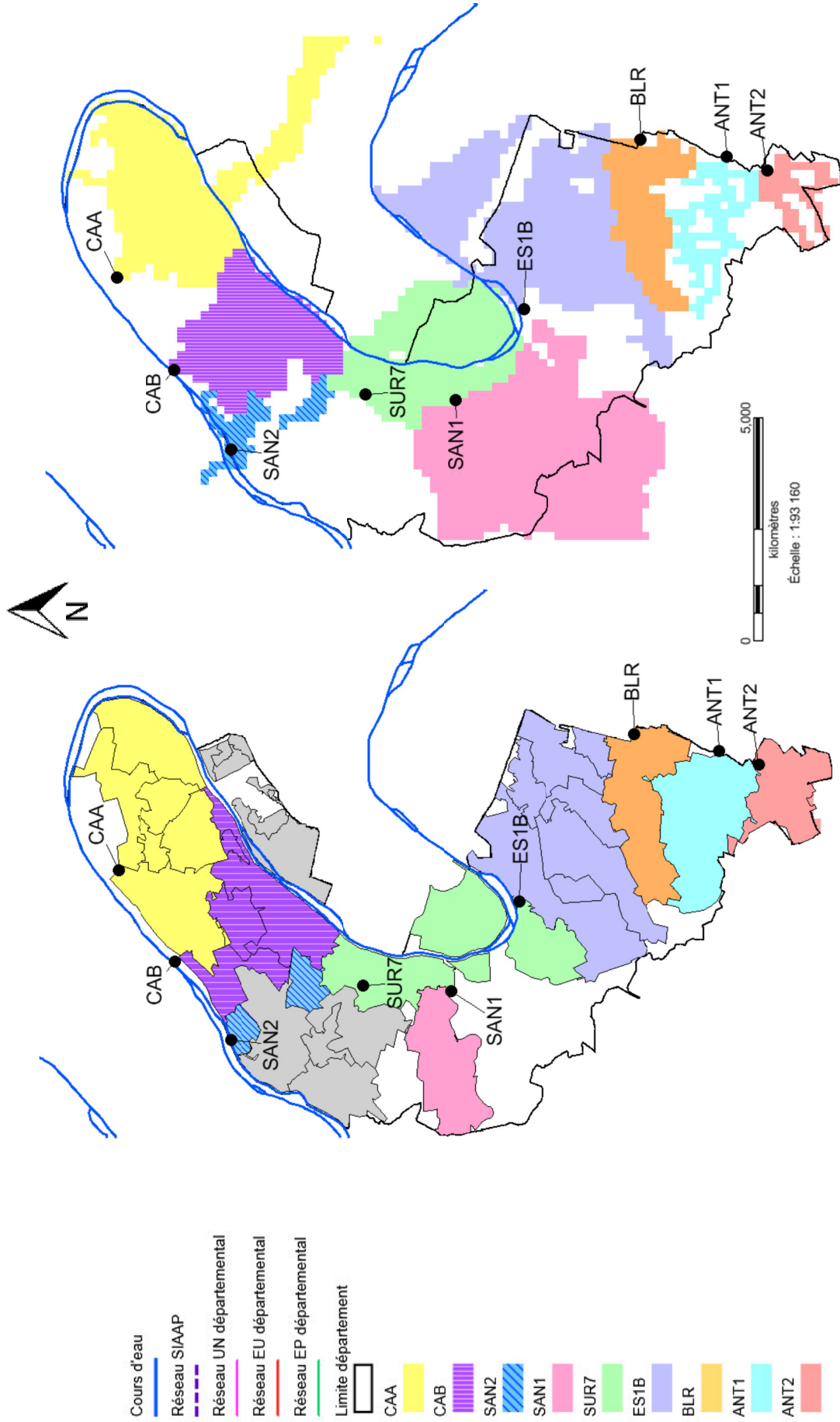


Figure 4 : Représentation (à gauche) des zones de collecte d'eaux usées fournies par le département des Hauts-de-Seine (Conseil Départemental, 2017) et (à droite) des bassins versant eaux usées reconstruits et étudiés.

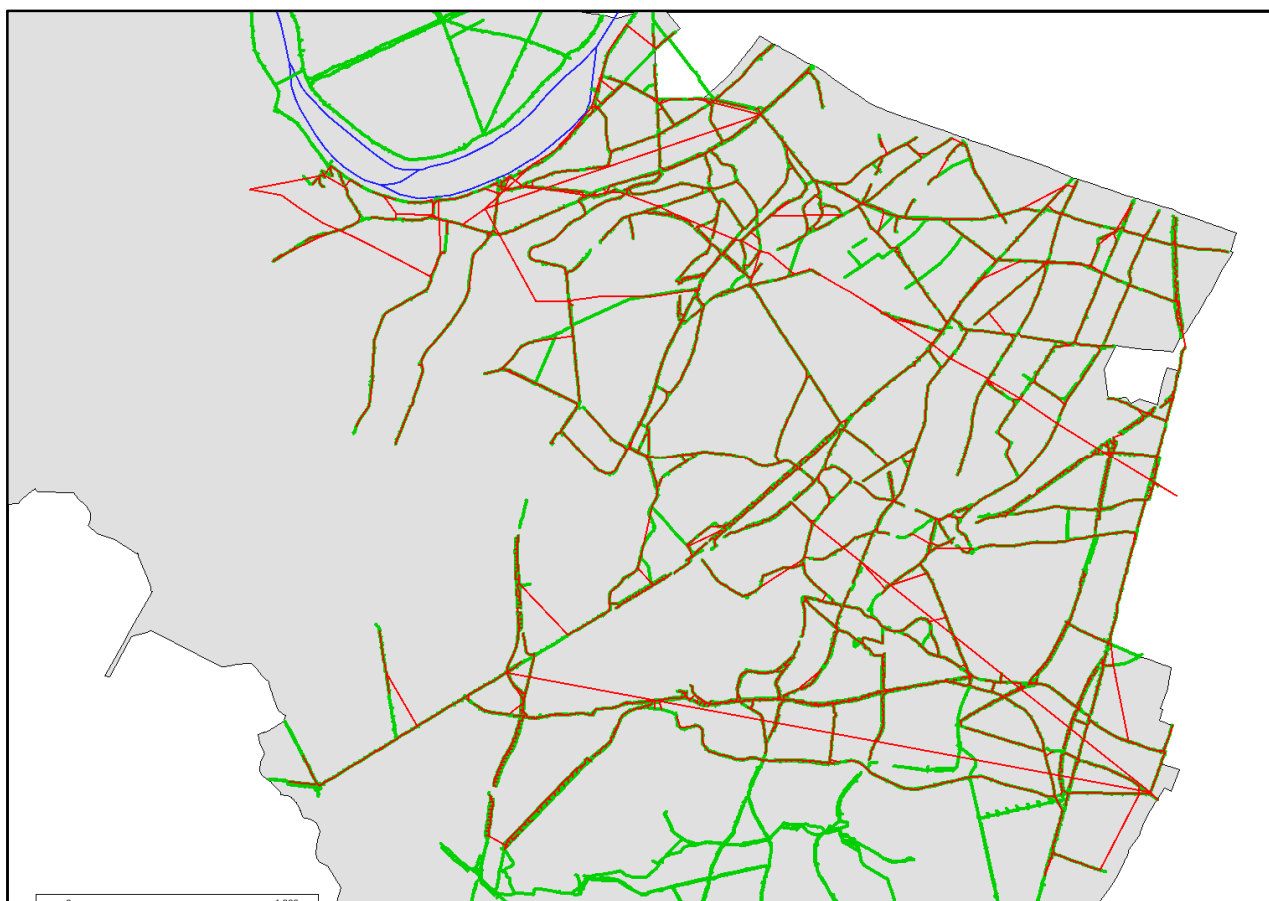


Figure 7 : Comparaison entre le réseau initial fourni par le département des Hauts-de-Seine (en rouge) et le réseau reconstruit non simplifiée (en vert). L'encadré à gauche situe les zones reconstruites dans le département.

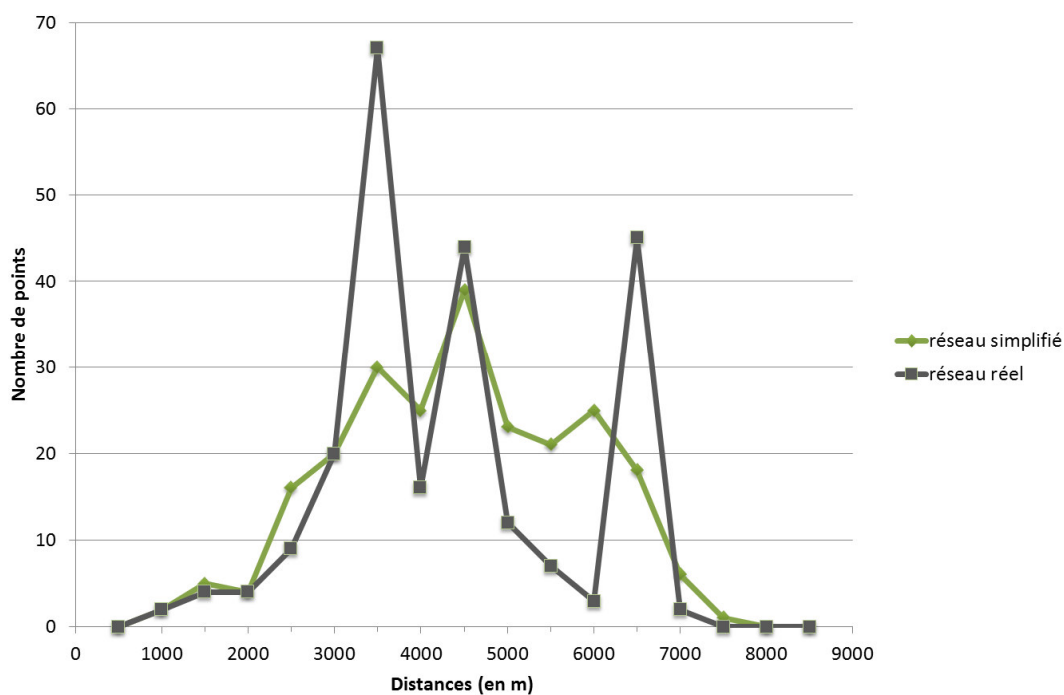


Figure 8 : Comparaison entre les réseaux reconstruits à l'échelle réelle (réseau réel) et à une résolution de 250m (simplifié) des distances aux exutoires pour les eaux pluviales

*Distances en réseau à l'exutoire pour les eaux usées*

Pour les eaux usées, on observe que les distances en réseau à l'exutoire entre le réseau reconstruit réel et simplifié ont des écarts moins importants que pour les eaux pluviales (Figure 99). La moyenne des distances pour les réseaux non simplifiés et simplifiés sont respectivement de 3,6km et 3,5km avec un écart type de 1,3km pour les deux réseaux. Ainsi, les distances aux exutoires étant cohérentes entre les deux réseaux, les hydrogrammes issus de notre modèle seraient représentatifs de la réalité.

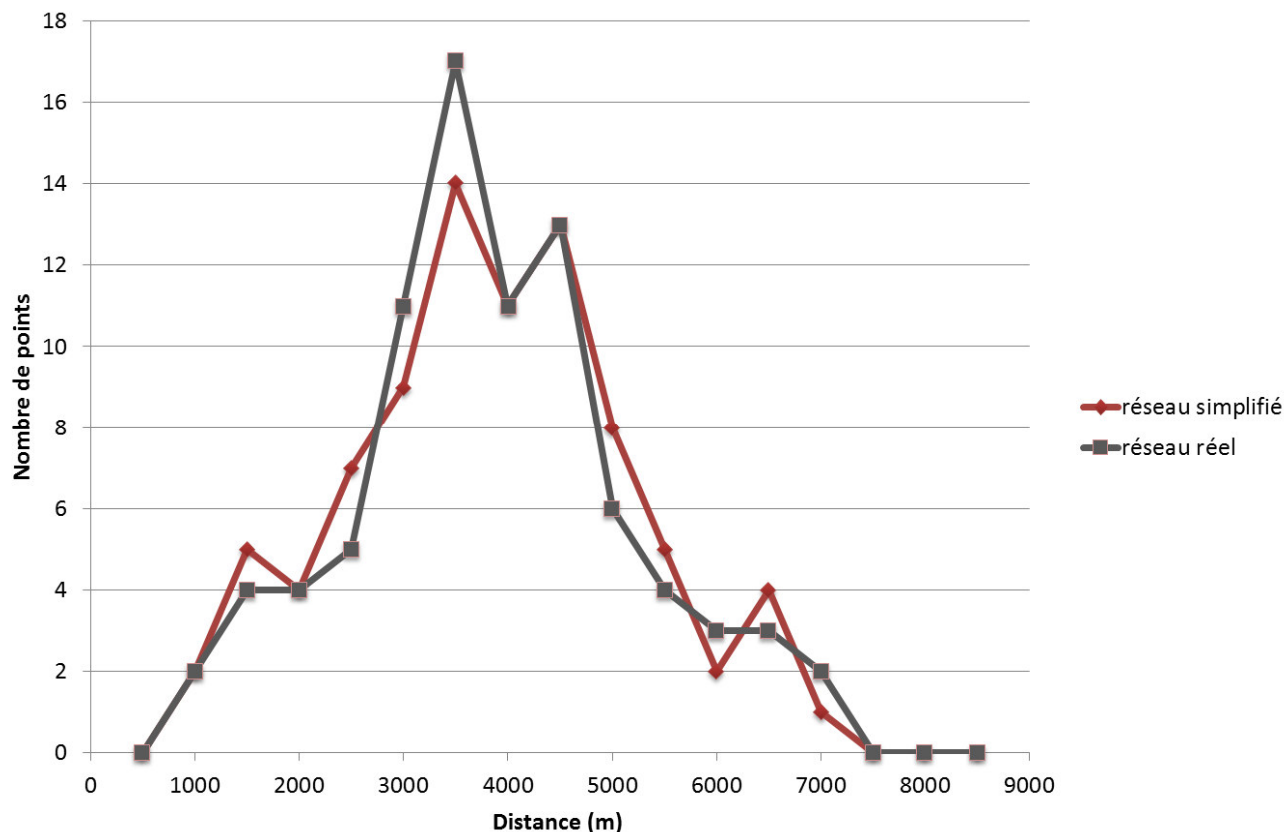


Figure 5 : Comparaison entre les réseaux reconstruits à l'échelle réelle (réseau réel) et à une résolution de 250m (simplifié) des distances aux exutoires pour les eaux usées

## 4. Modélisation hydrologique

### 4.1. Cadre de la simulation

#### 4.1.1. Zone d'étude

Lors de précédents travaux, le département de Seine-Saint-Denis a été reconstruit grâce à l'outil TOHR (Lotfi et al., 2016a). Cependant, pour économiser les temps de calcul, nous avons réalisé la modélisation hydrologique uniquement sur le département des Hauts-de-Seine, en utilisant les résultats de reconstruction du réseau présentés précédemment. La zone de modélisation représente 7410 mailles de 250m de côté, soit une superficie de 436 km<sup>2</sup>, ce qui représente 43% de la superficie de Paris et sa petite couronne.

#### 4.1.2. Données d'entrée du modèles

##### *Données physiologiques*

Les données physiologiques permettent de décrire l'occupation du sol de la zone d'étude. Elles sont fournies à partir de la base de données MUSCADE. Les informations utilisées de cette base de données concerne l'occupation du sol et la caractéristique des bâtiments. Cela permet de connaître pour une maille, la fraction de ville, de cours d'eau, de jardin, de voirie ou de bâtiment dans une maille. Concernant les bâtiments, les caractéristiques comme l'âge, la hauteur des bâtiments, la fraction de toit et de murs sont renseignés dans chaque maille qui possède une part de bâtiment.

##### *Données de réseau hydrographique*

La reconstruction du réseau hydrographique complet sur la zone d'étude est nécessaire au modèle pour deux raisons. Tout d'abord, cela permet de définir les bassins versants drainés par chaque exutoire ainsi que les distances à l'exutoire pour chaque type d'écoulement. Ces informations sont nécessaires à la construction des hydrogrammes aux exutoires. Ensuite, la reconstruction du réseau d'assainissement est utile au modèle afin de calculer les infiltrations parasites de l'eau du sol dans les réseaux.

##### *Données de forçage*

Les données de forçage météorologique ont été fournies par le modèle AROME<sup>1</sup> de Météo France. AROME a une résolution de 2,5 kilomètres de côté. Le modèle AROME fournit les informations suivantes au pas de temps horaire :

- Le vent méridien et le vent zonal (à 10m en m.s<sup>-1</sup>)
- La pression en surface (Pa)
- La température de l'air en surface (à 2m en K)
- La pluie (mm)
- Le rayonnement solaire direct (en W.m<sup>-2</sup>)
- L'humidité relative de l'air (kg.kg<sup>-1</sup>)
- Le rayonnement infra-rouge (W.m<sup>-2</sup>)
- Le rayonnement solaire diffus (W.m<sup>-2</sup>)
- La concentration en CO<sub>2</sub> (kg.m<sup>-1</sup>)
- La neige (mm)

#### 4.1.3. Résolution temporelle et spatiale

Le pas de temps choisi pour la modélisation est 1h afin de correspondre avec les données de forçage météorologiques fournies par Météo-France (AROME). Comme cela a déjà été précisé, il a été décidé que la modélisation hydrologique à l'échelle de Paris et sa petite couronne porterait sur l'année 2014, année pour laquelle nous disposons du plus grand nombre de données observées sur toute la zone. Malheureusement, pour le département des Hauts de Seine, nous disposons de peu de données à cette période.

La base de données MUSCADE, utilisée est à une résolution de 250m. De ce fait, pour faciliter son utilisation, nous avons choisi la même résolution pour la modélisation.

---

<sup>1</sup> <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/la-prevision-du-temps/le-modele-a-maille-fine-arome>

## 4.2. Comparaison des données pluviométriques observées et simulées par AROME

Le département des Hauts-de-Seine nous a fourni les données de pluviométrie au pas de temps horaire de l'année 2014 observées sur 8 pluviomètres répartis sur toute la zone. Nous avons pu ainsi comparer les valeurs simulées par le modèle AROME, et utilisées comme données d'entrée du modèle, aux données de pluviométrie observées, fournies par le département des Hauts-de-Seine pour l'année 2014. Pour chaque pluviomètre nous avons comparé la valeur observée ainsi que la valeur de la maille AROME correspondante.

La moyenne spatiale des cumuls est de 789,7 mm avec un écart type de 30,7 mm pour le modèle AROME et 650,5 mm pour les données observées avec un écart type de 37,3mm. Le modèle AROME utilisé surestime donc globalement la pluie et sous-estime la variabilité spatiale par rapport aux données observées. On peut noter que certains événements, comme ceux du 21 mai et du 20 juillet, présentent des différences significatives entre la pluie observée et les données AROME. En effet, le modèle AROME présente des phénomènes beaucoup plus importants que les données observées, respectivement 36,5 et 781% de plus.

Si nous comparons les données entre les différents pluviomètres, on remarque que la variabilité entre les données simulées par le modèle AROME et les données observées par les Hauts-de-Seine est différente aussi selon les pluviomètres (Tableau 3).

Tableau 3 : Comparaison des données pluviométriques simulées par le modèle AROME et observées par le département des Hauts-de-Seine entre les différents pluviomètres

		I0001	Y0001	E0001	Q0002	Q0001	A0001	V0002	X0001
Moyenne (mm/h)	AROME (simulée)	0,093	<b>0,097</b>	0,092	0,089	0,089	0,088	0,092	0,095
	HDS (observée)	0,083	<b>0,077</b>	0,076	0,073	0,073	0,071	0,076	0,077
Moyenne sur l'année 2014 des différences entre les valeurs observées et simulées (mm/h)		0,105	<b>0,146</b>	0,099	0,099	0,098	0,093	0,099	0,104

Selon ces chiffres, l'écart entre les données observées et simulées est le plus important pour le pluviomètre Y0001. En effet, la moyenne de l'écart entre les valeurs observées et simulées est 0,146 mm/h. On peut donc supposer que les événements pluvieux importants et localisés au pluviomètre Y0001 n'ont pas bien été représentés par le modèle AROME.

## 4.3. Résultats de simulation

### 4.3.1. Simulation de référence

Une étude bibliographique a permis de renseigner les valeurs de référence des paramètres du modèle TEB-Hydro (Allard, 2015; Berthier and Creutin, 1999; Dupont, 2001; Furusho, 2011; Morena, 2004). Le Tableau 4 résume les valeurs choisies. Très peu de bibliographie sur la pédologie des Hauts-de-Seine est disponible. Ainsi, la texture du sol serait à améliorer si des données de pédologie étaient disponibles à l'avenir.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des valeurs des variables de la simulation de référence

Paramètres	Description	Unité	Valeur
SROAD	Capacité maximale du réservoir de surface de la route	mm	1,0
SROOF	Capacité maximale du réservoir de surface de la route	mm	1,5
SOIL CLAY	Fraction d'argile dans le sol	-	0,47
SOIL SAND	Fraction de sable dans le sol	-	0,22
IP	Définit l'état d'étanchéité du réseau	-	0.01
CONN	Taux de surface imperméables effectivement connecté au réseau	-	0.8

### Le bilan hydrologique

Le modèle représente le bilan hydrologique afin de connaître les proportions d'eau évapotranspirée, ruisselée et stockée dans le sol pour les différents compartiments jardin, bâtiment, voirie. Les résultats de ce bilan sont exprimés en pourcentage de la pluie nette. Le ruissellement de surface du compartiment jardin et l'infiltration de l'eau du sol par les réseaux étant négligeables par rapport aux autres contributions, ils n'ont pas été représentés sur le graphique. Pour la simulation de référence, le bilan hydrologique est représenté dans la Figure 10.

On observe ainsi que l'évapotranspiration représente la majeure partie du bilan hydrologique. Elle est largement majoritaire sur le compartiment jardin (83%), par rapport aux compartiments voirie et bâtiment ce qui est conforme aux attentes. Concernant le ruissellement les parts les plus importantes proviennent de la voirie et du bâtiment qui sont des surfaces imperméabilisées (respectivement 10% et 4%). Concernant le stockage de l'eau dans le sol, le compartiment jardin stocke plus d'eau (13%) que les surfaces imperméabilisées et le bâtiment en stocke moins (2,4%).

L'étude du bilan hydrologique montre que la contribution la plus importante au ruissellement de surface provient de la voirie. Plusieurs facteurs expliquent ceci. Tout d'abord le choix de la capacité des réservoirs de surface du bâtiment et de la voirie de respectivement 1,5 mm et 1 mm implique que le compartiment voirie ruisselle plus que le compartiment bâtiment.

Ensuite, l'occupation du sol dans la zone d'étude est composée majoritairement de voirie par rapport au bâtiment comme le montre la Figure 10. On observe sur cette figure une part plus importante de voirie au nord du département. En effet, la part de bâtiment représente 14,8% et la part de voirie 31,9% sur notre zone d'étude.

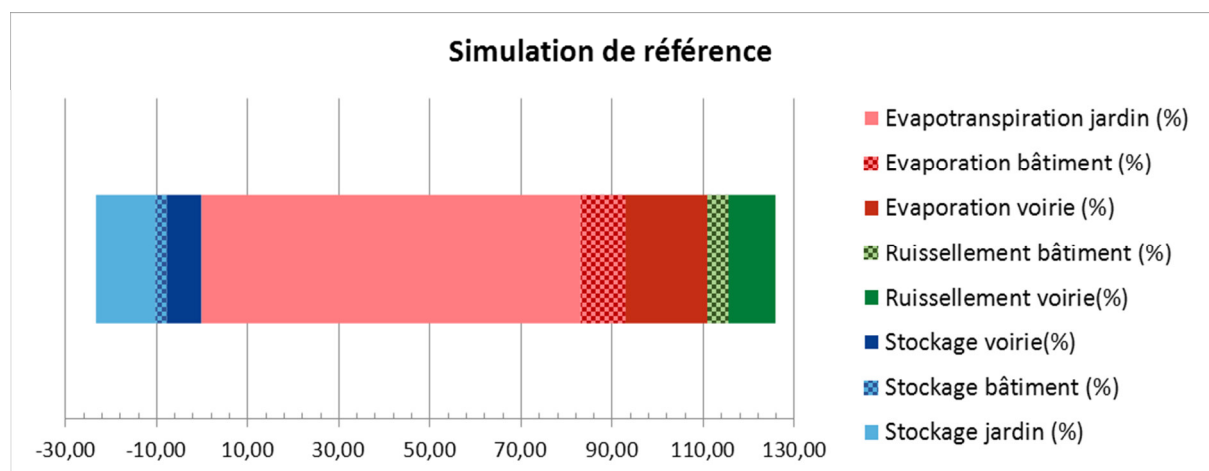


Figure 60: Représentation de la contribution de chaque terme du bilan hydrologique pour chaque compartiment sur tout le domaine, pour l'année 2014, pour la simulation de référence. Les termes « Stockage » renvoient au stockage d'eau du sol dans chaque compartiment.

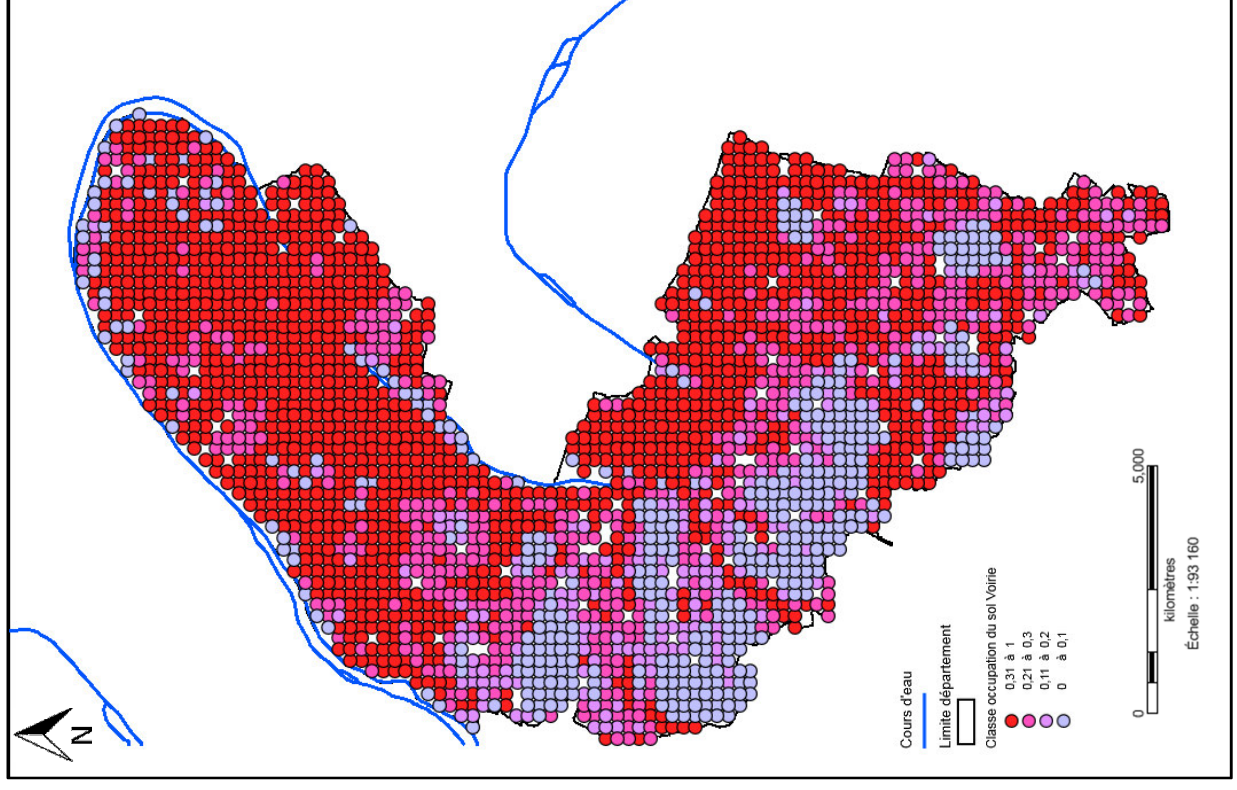
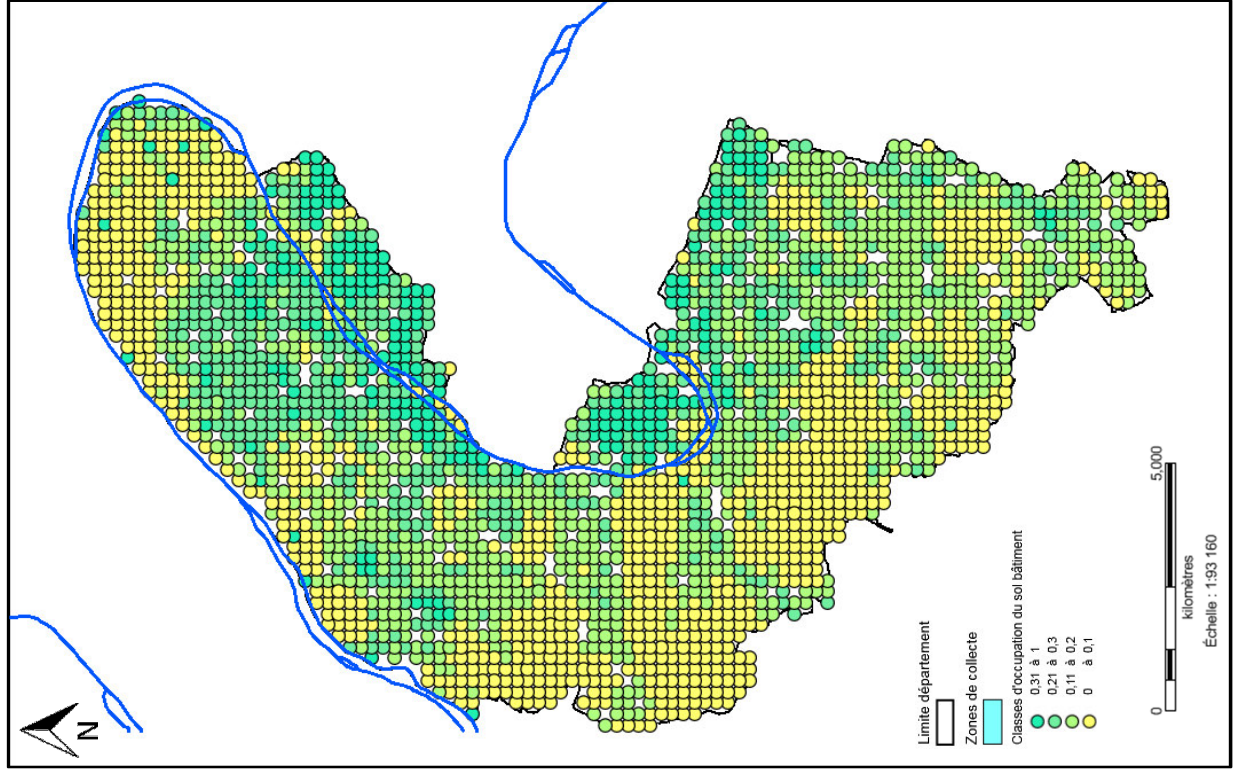


Figure 71 : Comparaison de la densité surfacique du bâtiment (à gauche) et de la voirie (à droite) par maille de la zone d'étude.



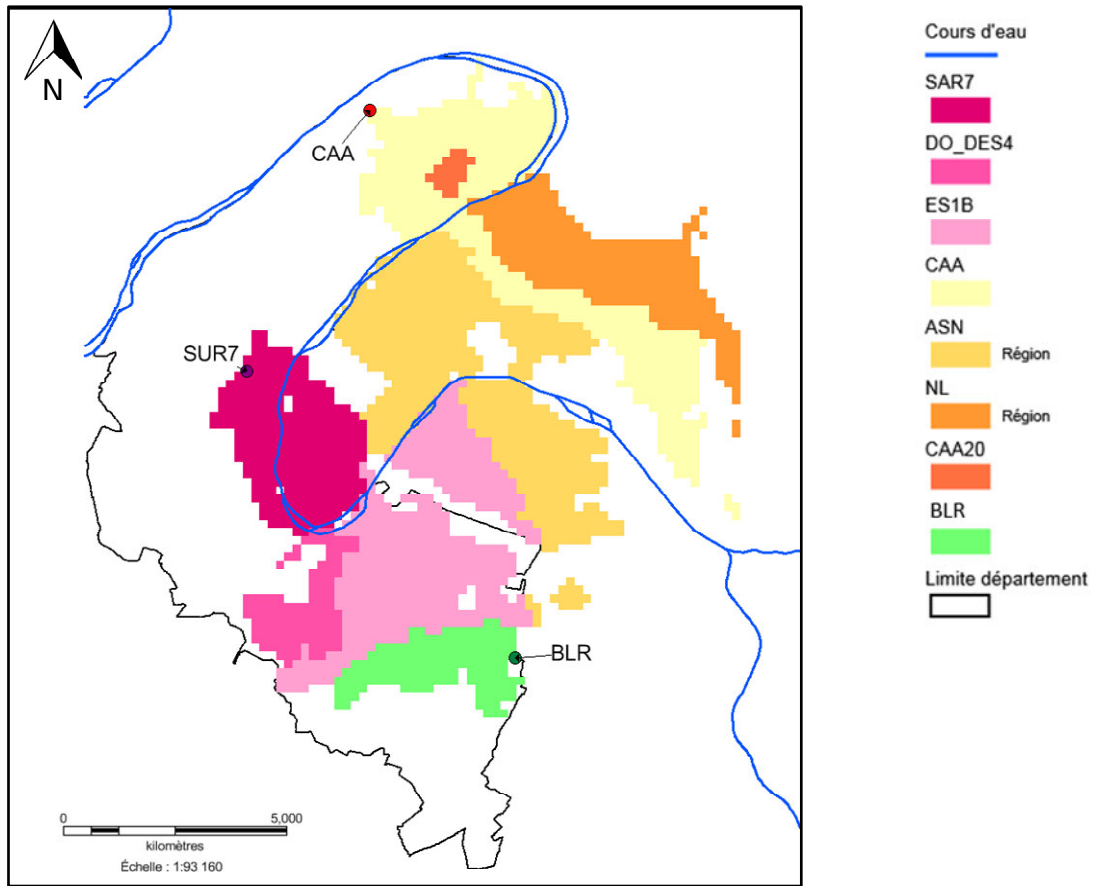


Figure 8 : Représentation des bassins et sous-bassins versants étudiés

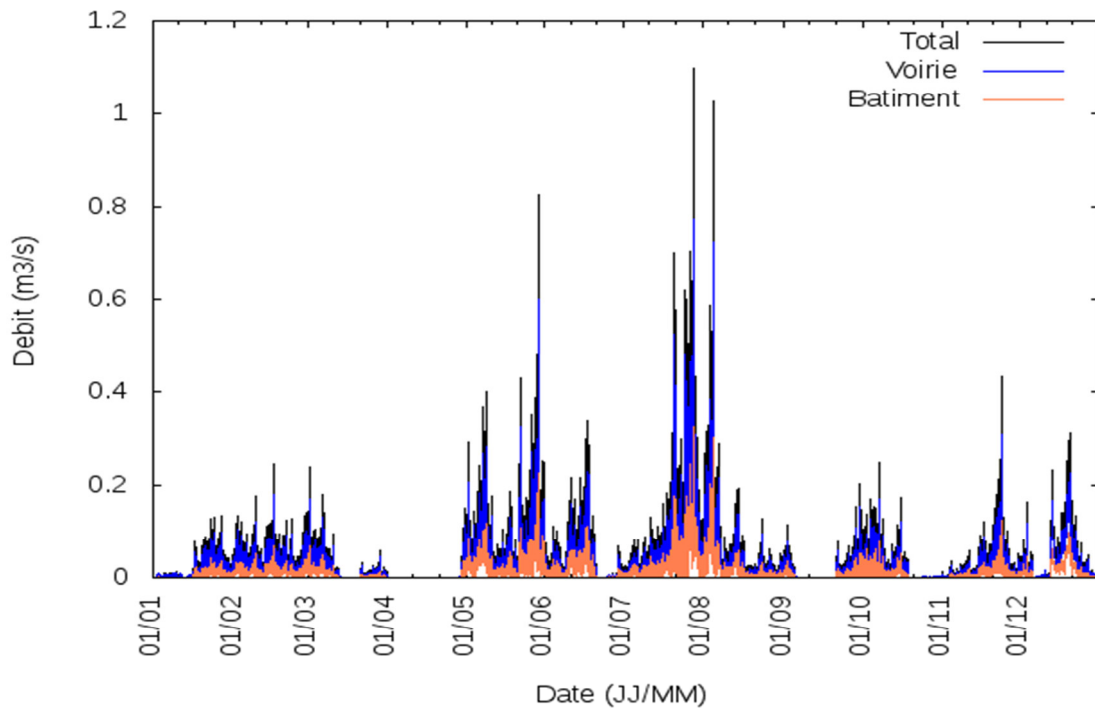


Figure 93 : Comparaison des débits totaux aux exutoires BLR et CAA pour l'année 2014

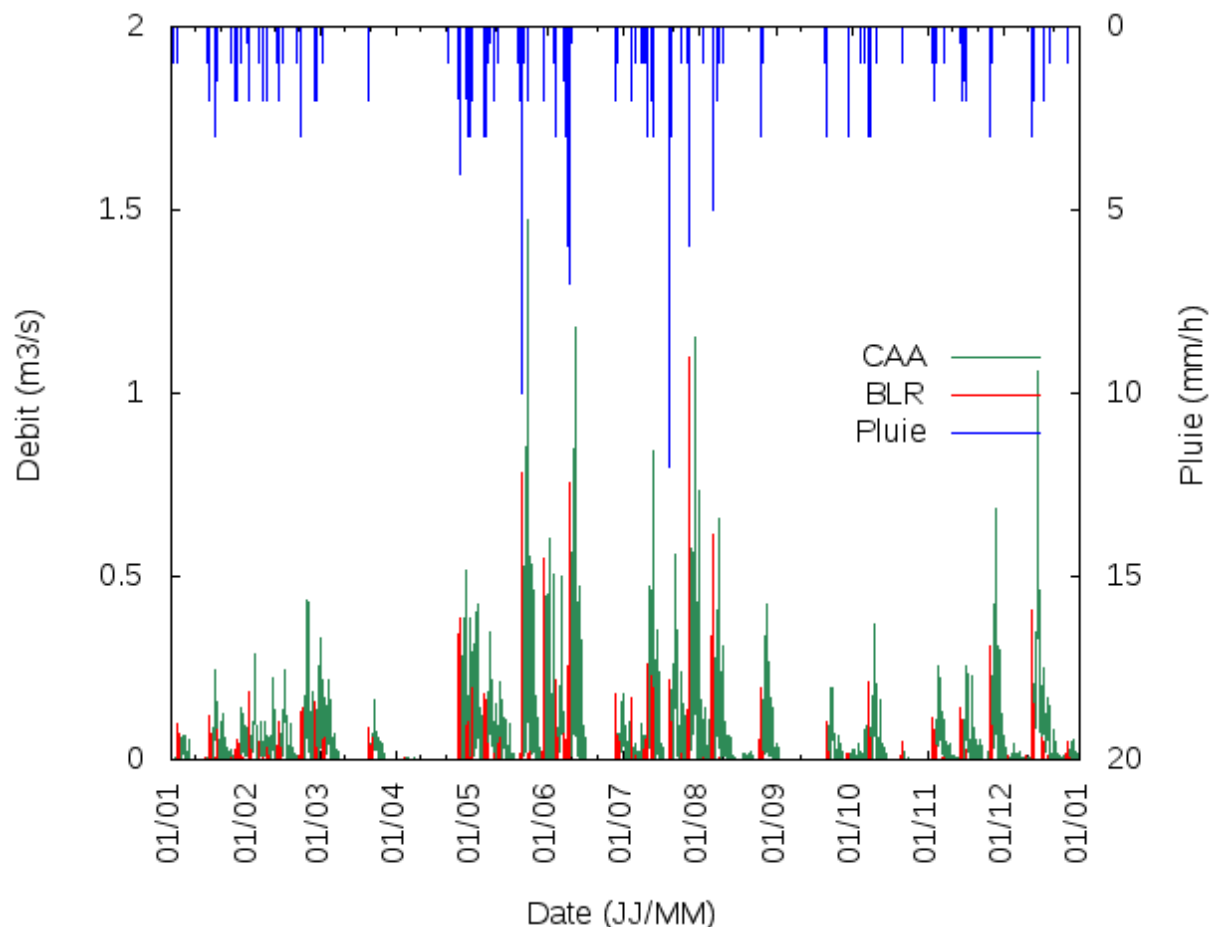


Figure 114 : Comparaison des débits totaux aux exutoires BLR et CAA pour l'année 2014

#### 4.4. Analyse de sensibilité

Ne disposant pas de données observées de débits ou de déverses par les DO, sur le territoire du département des Hauts de Seine, il n'est pas possible de caler les paramètres du modèle puis d'évaluer les débits simulés. Nous pouvons cependant réaliser une étude de sensibilité afin de mieux comprendre les variables qui influent le plus sur la réponse du modèle.

Cette analyse de sensibilité se base sur le principe OAT (One Factor at a Time). Le temps de modélisation sur une année avec le pas de temps horaire étant de plus de 18h, nous avons sélectionné 3 paramètres (la capacité du réservoir de surface des voiries (SROAD), le taux d'étanchéité des réseaux (IP) et le taux effectif de connexion des surfaces imperméabilisées au réseau d'assainissement (CONN)). Une étude bibliographique a permis de répertorier les valeurs maximales et minimales de ces 3 variables d'étude (Allard, 2015; Berthier and Creutin, 1999; Dupont, 2001; Furusho, 2011; Morena, 2004). A partir de cette étude nous avons choisi les nouvelles valeurs pour l'étude de sensibilité qui sont répertoriées dans le Tableau 5.

##### *Bilan hydrologique*

Les résultats du bilan hydrologique pour chaque simulation sont présentés en Figure 15. On observe que le modèle est sensible à l'augmentation de la capacité du réservoir de surface de la voirie (SROAD4), puisqu'en l'augmentant, le bilan hydrique est différent de la simulation de référence. En effet, la part de l'évaporation issue de la voirie est plus importante (27% de plus). La part de ruissellement provenant de la voirie est de plus diminuée par rapport à la simulation de référence (-41%).

Le modèle est également sensible au taux de connexion des surfaces imperméabilisées (CON90), puisqu'en l'augmentant à 90%, on observe que la part de ruissellement provenant de la voirie et du bâtiment est augmentée par rapport à la référence de 12% pour chaque compartiment.

Enfin, on observe que le bilan hydrique n'est pas fortement modifié par l'augmentation du facteur d'infiltration parasite dans les réseaux. En effet, ce facteur augmente l'infiltration de l'eau du sol dans les réseaux. Ceci influe donc sur le ruissellement provenant des réseaux qui augmente de  $8,4.10^{-4}$  pour la simulation de référence à  $4,2.10^{-3}$  pour la simulation au facteur IP augmenté. Cependant, cette variation est infime et négligeable dans le bilan hydrologique par rapport aux autres composants. De ce fait, le bilan hydrologique ne semble pas impacté par le paramètre IP, pour les valeurs des autres paramètres choisies.

Tableau 5 : Valeurs de référence utilisées pour l'analyse de sensibilité pour chaque variable d'intérêt. Par extension, les simulations correspondantes prendront le nom du paramètre modifié.

Paramètres (et nom de la simulation)	Unité	Valeurs	
		REF	MAX
SROAD (SROAD4)	mm	1,0	4,0
IP (IP5)	-	$10^{-2}$	$5,0^{-2}$
CONN (CON90)	-	0,8	0,9

#### Etude des débits : connexion 90%

La comparaison des débits simulés avec la simulation de référence (REF) et la simulation avec un taux de connexion à 90% (CON90) montre que les débits totaux aux exutoires sont plus importants avec un taux de connexion à 90%, comme on pouvait l'attendre. Cela confirme le bilan hydrologique qui indique une augmentation du ruissellement provenant des surfaces imperméabilisées. La Figure 166 montre que pour chaque évènement le débit est plus important pour la simulation CON90 que pour la simulation REF.

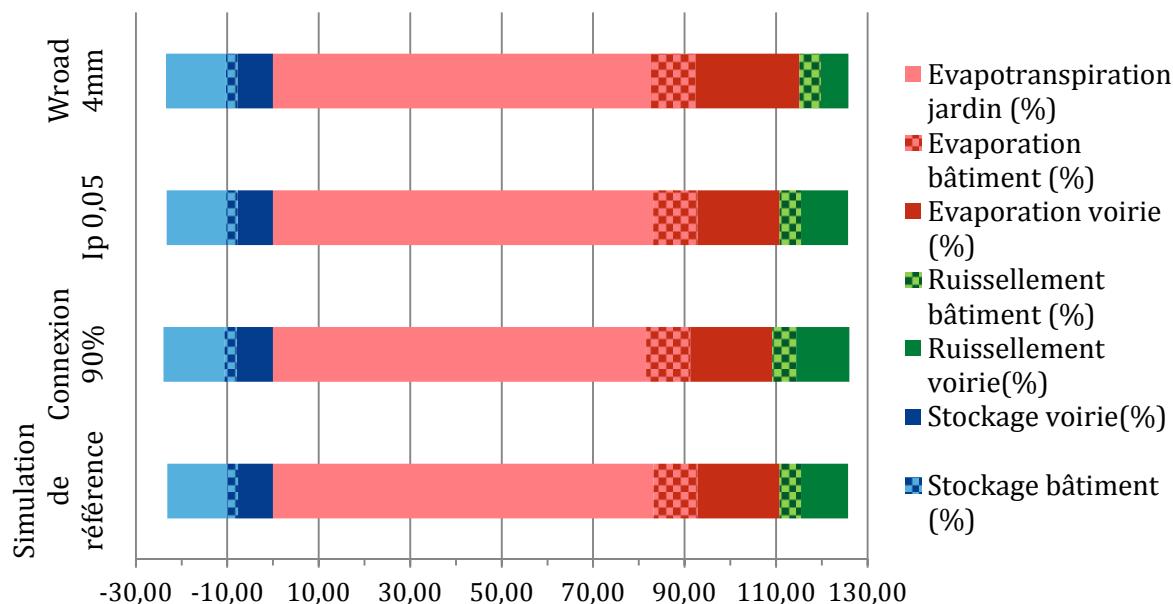


Figure 12: Représentation du bilan hydrique pour chaque simulation

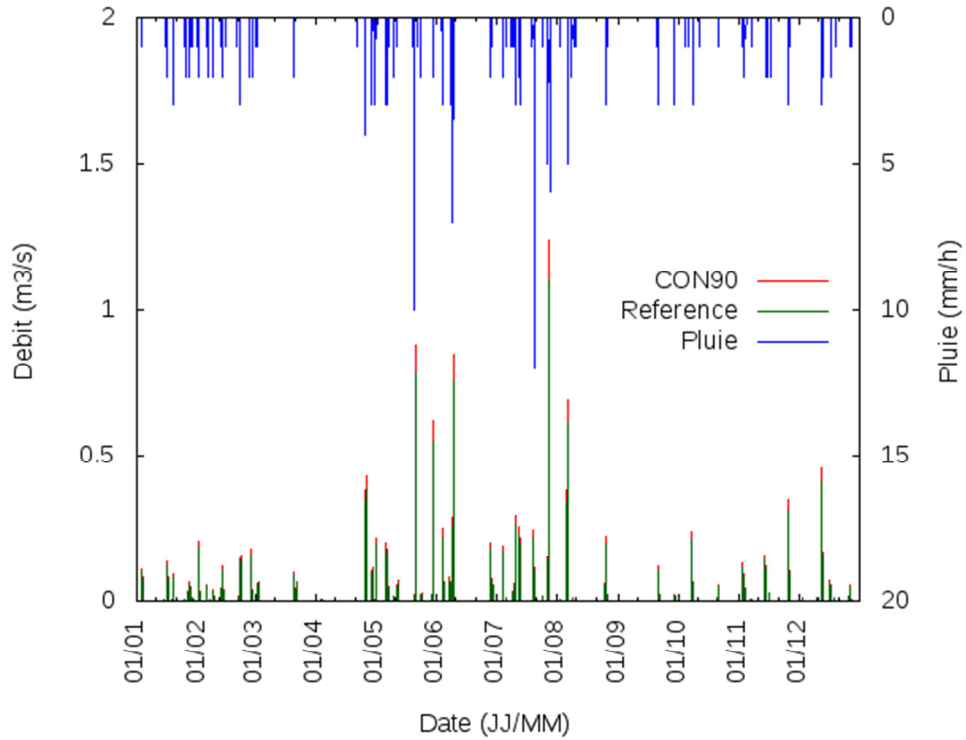


Figure 13 : Représentation des débits totaux simulés à l'exutoire BLR pour les simulations REF (vert) et CON90 (rouge) pour l'année 2014

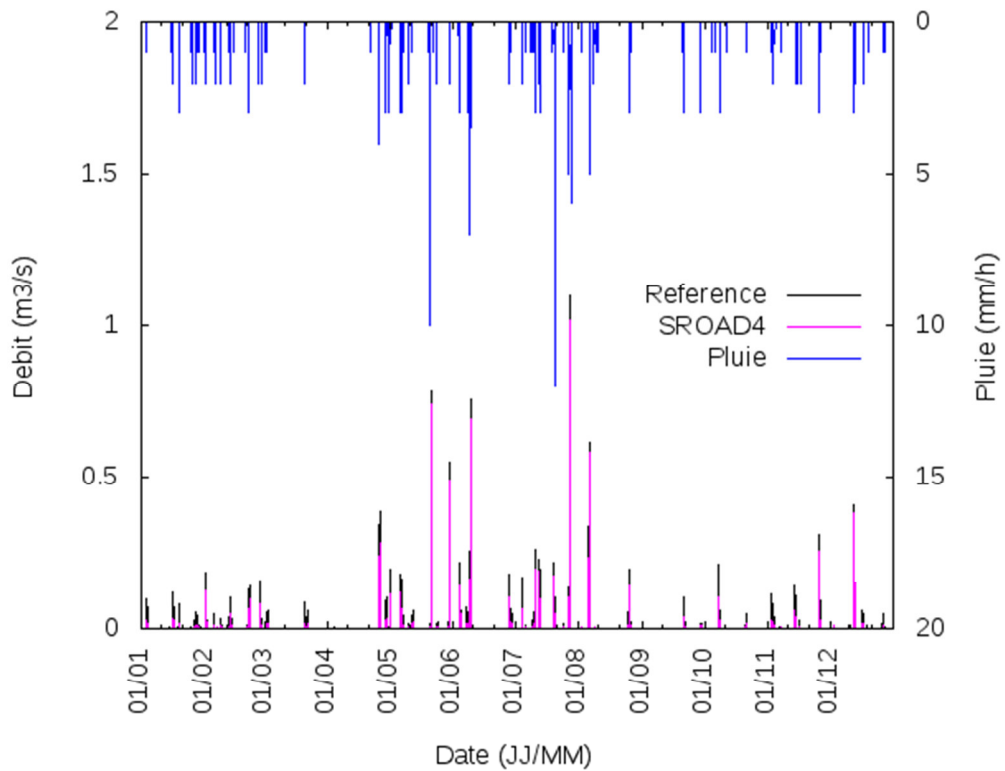


Figure 147 : Comparaison des débits totaux simulés à l'exutoire BLR pour les simulations REF et SROAD4 augmenté pour l'année 2014

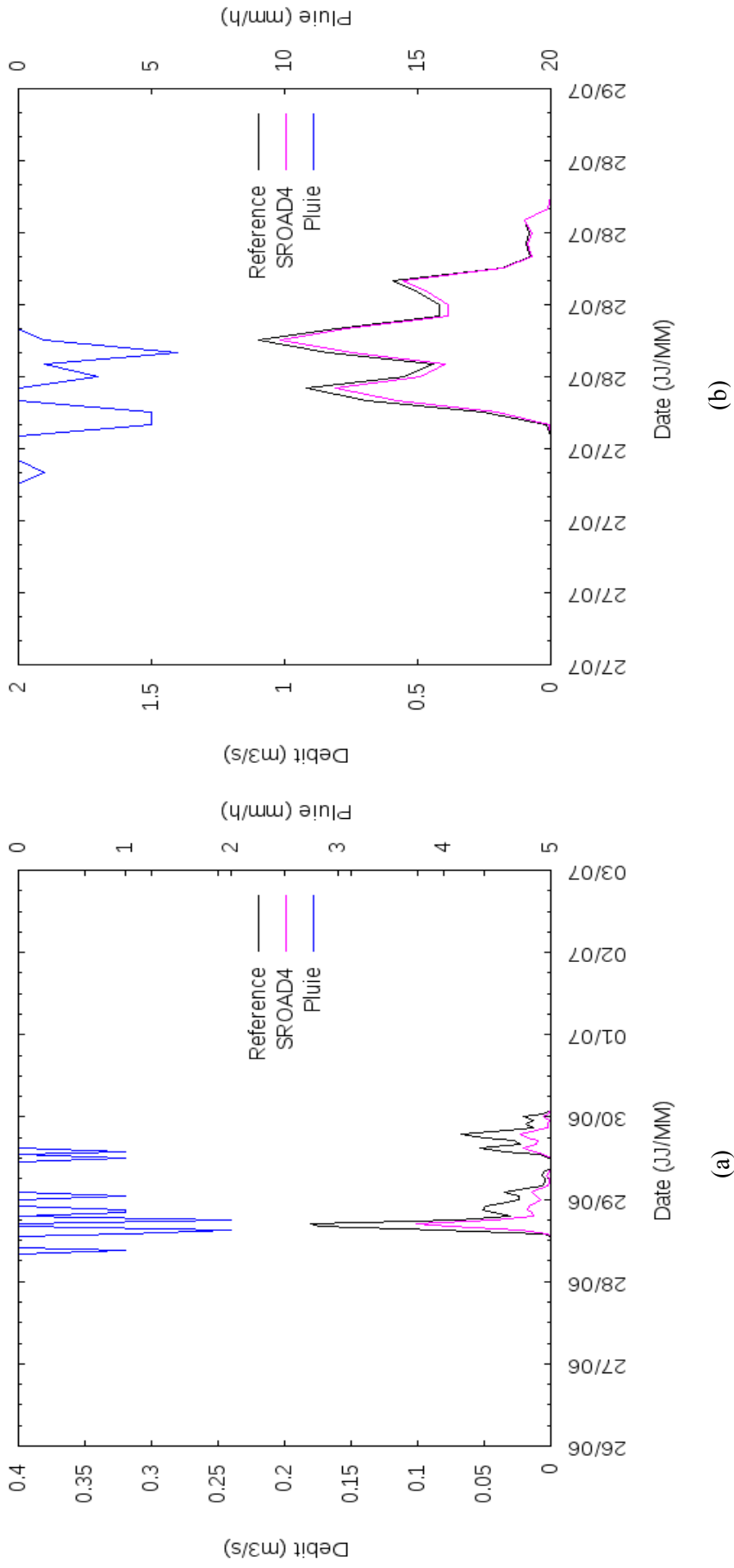


Figure 18 : Débits totaux simulés à l'exutoire BLR pour les simulations REF et SROAD4 (a) lors d'un petit événement pluvieux, et (b) lors d'un événement pluvieux plus important.

#### 4.5. Analyse de l'impact des débits seuils des DO sur les débits

Nous avons également étudié l'impact de l'augmentation des débits seuils des DO sur les débits aux exutoires aval de ces DO. En effet, dans la simulation de référence, le débit seuil des DO était à 0, ce qui signifie que les DO rejetaient dans le milieu naturel toutes les eaux qui leur parvenaient (ce qui n'est pas très réaliste, mais nécessaire pour déterminer une plage réaliste du débit seuil permettant quelques déversements durant l'année). Pour cette simulation, nous avons changé le débit seuil des DO en fonction du débit total arrivant au DO (Tableau 6). Nous avons choisi des seuils relativement élevés, de manière à ce que les DO ne déversent que très peu dans le milieu naturel et que le débit dans les réseaux en aval des DO soient augmentés significativement. Ceci peut être observé sur la Figure 19, où sont comparés les débits simulés à l'exutoire SUR7 avec la simulation REF et la simulation DO.

L'augmentation du débit seuil du DO DES4, permet d'augmenter le débit total à l'exutoire SUR7 de 1,291 m<sup>3</sup> pour la totalité de l'année 2014 à 3,361 millions de m<sup>3</sup>.

Cependant, pour l'exutoire CAA, l'augmentation des débits seuil des DO Argenteuil et Rue Victor Hugo contribuant à l'exutoire n'impacte pas le débit de la même manière (Figure 17). En effet, le débit total à l'exutoire CAA augmente de 1,5 millions de m<sup>3</sup> pour l'année 2014 pour la simulation de référence à 1,7 millions de m<sup>3</sup> pour la simulation avec une augmentation des débits seuils.

Les différents impacts des DO sur les débits aux exutoires peuvent s'expliquer par la différence de surface drainée par les DO. En effet, les DO de la zone CAA draine une petite surface (0,1 km<sup>2</sup>). Ainsi, la contribution des DO au débit total de l'exutoire CAA n'est pas significative. A l'inverse, le DO DES4 draine une surface de 7 km<sup>2</sup>. Il a donc une contribution plus importante sur le débit total de son exutoire, SUR7.

Ces résultats montrent la sensibilité de la simulation à ces valeurs seuils déclenchant les déversements. Ce sont donc autant de valeurs à caler pour se rapprocher d'un fonctionnement réaliste des rejets du système d'assainissement dans le milieu naturel.

Tableau 6 : Débits seuils identifiés pour les DO étudiés sur la zone

DO	Débit seuil (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )
DES4	0.6
Argenteuil	0.2
Rue Victor Hugo	0.1

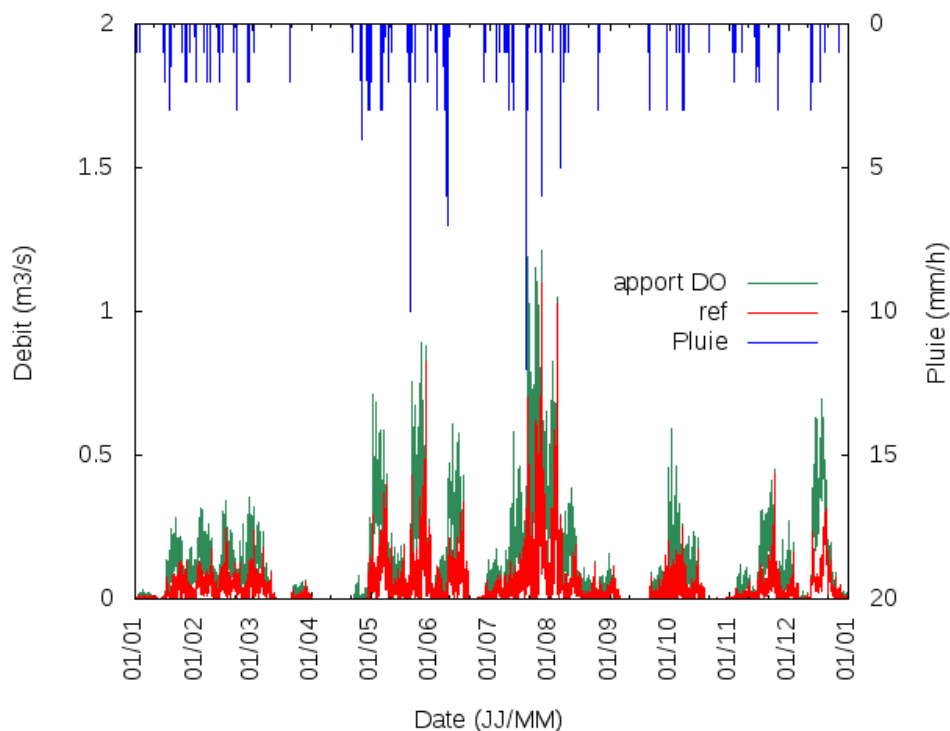


Figure 19 : Représentation du débit total simulé à l'exutoire SUR7 sans contribution des DO (REF en rouge) et avec une contribution de la part des DO (débit seuil du DO DES4 à  $0.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en vert).

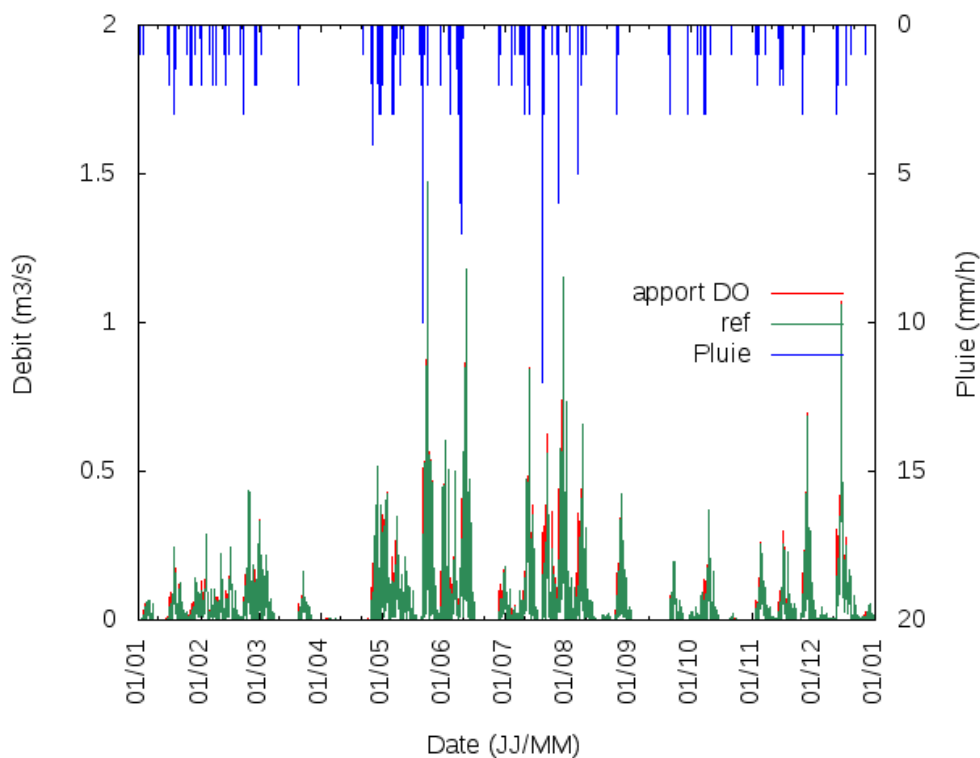


Figure 15 : Débit total simulé à l'exutoire CAA sans contribution des DO (REF, en vert) et avec une contribution de la part des DO Argenteuil et Rue Victor Hugo (en rouge)

## 5. Conclusions et perspectives

Pour réaliser une modélisation hydrologique à l'échelle d'un département avec une résolution de 250m, il est nécessaire de simplifier au préalable les données d'entrée du modèle. C'est le but de l'outil TOHR qui permet de simplifier le réseau hydrographique complet, tout en créant un réseau hydrographique fonctionnel, connectant les mailles d'une grille entre elles.

Cette simplification du réseau hydrographique a été produite à l'échelle du département des Hauts de Seine. Elle n'a été possible qu'après une analyse et une compréhension du fonctionnement global du réseau d'assainissement et de ses connexions avec le réseau naturel, via les déversoirs d'orage. La mise en œuvre de l'outil TOHR a nécessité un long travail sur les données descriptives des réseaux d'assainissement au travers d'une analyse de la topologie du réseau ainsi que d'échanges indispensables avec le service qui a fourni les données (Direction de l'eau du Conseil Départemental des Hauts de Seine). Les résultats de reconstruction sont encourageants, en particulier l'évaluation à l'aide de la fonction largeur, même si certaines différences existent.

En effet, cette simplification entraîne des biais et des pertes d'informations qu'il est important de prendre en compte dans l'exploitation des résultats de la modélisation.

Tout d'abord, cette étude démontre que la simplification du réseau hydrographique peut entraîner des perturbations dans le calcul des distances d'écoulement à l'exutoire ou dans le calcul des bassins versants drainés par les exutoires. Ensuite, dans le but d'être cohérent avec la résolution du modèle, il a été décidé de ne pas reconstruire le réseau communal. Pourtant, ce réseau est très dense et sa non-représentation entraîne une perte importante de données, notamment dans le drainage de l'eau du sol par les réseaux. Ceci est surtout vrai aux endroits où le réseau départemental est très peu dense.

Pour la suite des travaux il serait intéressant de développer la prise en compte des capacités de stockage des réseaux départementaux et interdépartemental lors de la reconstruction réalisée par l'outil TOHR. En effet, ce facteur impacte forcément la simulation des écoulements dans le réseau et en particulier les déversements dans le milieu naturel. De plus, l'étude réalisée démontre que les différents réseaux étudiés possèdent d'importantes capacités de stockage, qui devraient augmenter particulièrement dans le département des Hauts-de-Seine.

Concernant la modélisation hydrologique sur le département des Hauts de Seine, le cadre de modélisation avec le modèle TEB-Hydro a été établi, par la mise en forme et le calcul des données de forçage et des données physiographiques nécessaires au modèle. L'introduction dans TEB-Hydro, du réseau hydrographique reconstruit a permis une connexion des mailles de la grille pour simuler les écoulements d'eau en surface et en réseau, permettant le calcul du débit en un nombre défini d'exutoires. Les connexions entre sous bassins versants ont été discutées. Une première étude de sensibilité a permis de mettre en évidence quelques paramètres déterminants du modèle (taux de connexion des surfaces imperméabilisées au réseau d'assainissement, débits seuils de déversement).

Cependant, le manque de données de gestion pour l'année 2014 n'a pas permis le calage du modèle sur les paramètres auxquels il est le plus sensible, ni d'évaluer les débits simulés. Des informations de gestions supplémentaires seraient de ce fait utiles pour caler le modèle.

Pour le département des Hauts-de-Seine, ces renseignements concernent les déversements des déversoirs d'orage du département pour l'année 2014 et les surfaces imperméables réellement connectées aux points de raccordement afin de valider la reconstruction des écoulements en versant. Pour le réseau interdépartemental, il serait utile de connaître l'apport des réseaux départementaux au réseau du SIAAP par des données de débit à des points stratégiques.

Dans notre étude, les eaux usées n'ont pas été prises en compte dans la modélisation hydrologique. Pour être plus réaliste concernant la simulation des déversements, il serait également intéressant d'introduire la contribution des eaux usées aux débits. Des données journalières permettraient de voir dans quelle mesure l'outil est capable de reproduire les déversements journaliers. Ces données pourraient être fournies par les gestionnaires si elles sont connues au moins en certains points, sinon elles pourraient être reconstruites à partir des équivalents habitants.



## Bibliographie

- Agence Parisienne du Climat, 2017. Bulletin climatique annuel ville de Paris - année 2016.
- Agence Parisienne du Climat, 2014. L'îlot de chaleur urbain à Paris, un microclimat au coeur de la ville.
- Allard, A., 2015. Contribution à la modélisation hydrologique à l'échelle de la ville: Application sur la ville de Nantes. Ecole Centrale de Nantes.
- APUR, 2015. Préservation et valorisation de la ressource en eau brute - Une gestion métropolitaine des eaux pluviales.
- Berthier, E., Creutin, J.D., 1999. Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain : élaboration du modèle et première évaluation = Contribution to a hydrological physically based model in urban area : development of the model and primary evaluation.
- Bhaduri, B., Harbor, J., Engel, B., Grove, M., 2000. Assesing Watershed-Scale, Long-Term Hydrologic Impacts of Land-Use Change Using, a GIS-NPS Model. *Environnemental Manag.* doi:10.1007/s002670010122
- Boone, A., 2000. Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA: inclusion d'un réservoir hydrologique, du gel et modélisation de la neige. *ups.*
- Brombach Hansjörg, Weiss Gebhard, Lucas Steffen, 2003. Temporal Variation of Infiltration Inflow in Combined Sewer Systems. *Glob. Solut. Urban Drain., Proceedings.* doi:10.1061/40644(2002)125
- Bueno, B., Pigeon, G., Norford, L.K., Zibouche, K., Marchadier, C., 2012. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. *Geosci. MODEL Dev.* 5, 433–448. doi:10.5194/gmd-5-433-2012
- Burns, D., Vitvar, T., McDonnell, J., Hassett, J., Duncan, J., Kendall, C., 2005. Effects of suburban development on runoff generation in the Croton River basin, New York, USA. *J. Hydrol.* 311, 266–281. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.01.022
- Chancibault, K., Lemonsu, A., Brun, J.M., Munck, C.D., A. Allard, Masson, V., Andrieu, H., 2015. Improving the water budget in the urban surface scheme TEB for a better evaluation of green infrastructures for adaptation purposes, in: 9th International Conference on Urban Climate. Toulouse, France.
- Commissariat général au développement durable, 2015. L'occupations des sols en France : progression plus modérées de l'artificialisation entre 2006 et 2012.
- Commissariat général au développement durable, 2012. La Revue du CGDD - Urbanisation et consommation de l'espace, une question de mesure.
- Conseil Départemental des Hauts-de-Seine, 2007. Convention Spéciale de Déversement d'eaux usées non domestique de la société Grenelle service dans le réseau public d'assainissement.
- Conseil Départemental des Hauts-de-Seine, 2006. Schéma départemental d'assainissement.
- Costa-Cabral, M.C., Burges, S.J., 1994. Digital elevation model networks : a model of flow over hillslopes for computaion of contribution and dispersal areas. *Water Resour. Res.* 30, 1681–1692.
- De Bénédictis, J., 2004. Mesurage de l'infiltration et de l'exfiltration dans les réseaux d'assainissement. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Delmas, J., Houel, P., Vially, R., 2002a. Rapport régional d'évaluation pétrolière (Paris Basin). Institut Français du Pétrole.
- Dupont, S., 2001. Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine: réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO. Université de Nantes.
- Elliott, A.H., Trowsdale, S.A., 2007. A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environ. Model. Softw.* 22, 394–405. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.005
- Fletcher, T.D., Andrieu, H., Hamel, P., 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Adv. Water Resour.* 51, 261–279. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001
- Furusho, C., 2011. Modélisation hydrologique des bassins versants périurbains. Ecole Centrale de Nantes.
- Giangola-Murzyn, A., 2013. Modélisation et paramétrisation hydrologique de la ville, résilience aux inondations. Université Paris Est.
- Hingray, B., Picouet, C., Musy, A., 2009. Hydrologie : Une science pour l'ingénieur. PPUR presse polytechniques et universitaires romandes.
- IAU, 2001. L'Occupation du Sol en Ile-de-France aujourd'hui, 1er bilan du MOS 1999.

- Jacobson, C.R., 2011. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review. *J. Environ. Manage.* 92, 1438–1448. doi:10.1016/j.jenvman.2011.01.018
- Laffaille, X., 2017. Hydrological validation of an urban hydro-microclimate model (TEB-Hydro): Case studies on urban catchments in Nantes (France). Presented at the International Conference on Urban Drainage, Prague, Czech Republic.
- Lehoucq, C., Pister, B., 2016. RETREAUSPECTIVE, département des Hauts-de-Seine.
- Lemonsu, A., 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geosci. Model Dev.* 5, 1377–1393. doi:10.5194/gmd-5-1377-2012
- Lemonsu, A., Masson, V., Berthier, E., 2007. Improvement of the hydrological component of an urban soil–vegetation–atmosphere–transfer model. *Hydrol. Process.* 21, 2100–2111. doi:10.1002/hyp.6373
- Leopold, L.B., 1968. *Hydrology for Urban Land Planning - a Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use* (No. Circular 554).
- Lotfi, Z., Chancibault, K., Joannis, C., Andrieu, H., 2016a. Reconstruction du réseau d’assainissement à l’échelle de Paris et sa petite couronne.
- Lotfi, Z., Chancibault, K., Joannis, C., Andrieu, H., 2016b. Fonctionnement du réseau d’assainissement à l’échelle de Paris et sa petite couronne.
- Masson, V., 2000. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Bound.-Layer Meteorol.* 94, 357–397. doi:10.1023/A:1002463829265
- Masson, V., Le moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essauouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., Voldoire, A., 2013. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geosci. Model Dev.* 6, 929–960. doi:10.5194/gmd-6-929-2013
- Morena, F., 2004. Modélisation hydrologique distribuée en milieu urbanisé : Représentation des processus de production et développement du modèle URBS. Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Munck, C.S., Lemonsu, A., Bouzouidja, R., Masson, V., Claverie, R., 2013. The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB. *Geosci. Model Dev.* 6, 1941–1960. doi:10.5194/gmd-6-1941-2013
- Noilhan, J., Planton, S., 1989. A Simple Parameterization Of Land Surface Processes For Meteorological Models. *Mon. WEATHER Rev.* 117, 536–549. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0536:ASPOLS>2.0.CO;2
- O’Callaghan, J.F., Mark, D.M., 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data 28, 323–344. doi:https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0
- Puech, C., Thommeret, N., Kaiser, B., Bailly, J.-S., Jacome, A., Rey, F., Mathys, N., 2009. MNT à très haute résolution dans les modèles fortement disséqués : des données aux tests d’application. *Géomorphologie Relief Process. Environ.* 15, 141–152. doi:10.4000/geomorphologie.7589
- Ragab, P., Rosier, P., Dixon, A., Bromley, J., Copper, J.D., 2003. Experimental study of water fluxes in a residential area: 2. Road infiltration, runoff and evaporation. *Hydrol Process* 17, 2123–2437. doi:10.1002/hyp.1251
- Rodriguez, F., Bocher, E., Chancibault, K., 2013. Terrain representation impact on periurban catchment morphological properties. *J. Hydrol.* 485, 54–67. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.11.023
- Rodriguez, F., Morena, F., Andrieu, H., 2005. Development of a distributed hydrological model based on urban databanks - production processes of URBS. *WATER Sci. Technol.* 52, 241–248.
- Sauge, A., Glatard, F., Faucon, P., Damas, O., 2014. Aménagement et choix des végétaux des ouvrages de gestion des eaux pluviales de proximité. ONEMA.
- Saunders, W., Maidment, D., Djokic, 2000. Preparation of DEMs for use in environmental modelling analysis, in: *Hydrological and Hydraulic Modeling Support with Geographic Information System*. pp. 29–52. SIAAP, 2012. MAGES, une tour de contrôle pour les autoroutes de l’eau.
- Tabuchi, J.-P., Tassin, B., Blatrix, C., 2016. Grand Paris, Eau et changement global. *Tech. Sci. Méthodes*.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L., Rodriguez-Iturbe, I., 1991. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrol. Process.* 5, 81–100.
- United Nations, 2015. *World Population Prospects - Key Findings and advance tables*.

- United Nations, D. of E., Social Affairs, P.D., 2014. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights. United Nations.
- Vergnes, J.-P., Decharme, B., Alkama, R., Martin, E., Habets, F., Douville, H., 2012. A Simple Groundwater Scheme for Hydrological and Climate Applications: Description and Offline Evaluation over France. *J. Hydrometeorol.* 13, 1149–1171. doi:10.1175/JHM-D-11-0149.1
- Weiss, G., Brombach, H., Haller, B., 2002. Infiltration and inflow in combined sewer systems: long-term analysis. *Water Sci. Technol. J. Int. Assoc. Water Pollut. Res.* 45, 11–19.

## Sitographie

- Flipo, N., Deloménie, A., 2015. Phase 7 du programme | PIREN-Seine [WWW Document]. URL <https://www.piren-seine.fr/programme-piren-seine-7> (accessed 6.9.17).
- Infoclimat, 2014. Climatologie de l'année 2014 à Paris-Montsouris [WWW Document]. URL <https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2014/paris-montsouris/valeurs/07156.html>. (accessed 8.21.17).
- Météo France, 2016. CLIMAT ÎLE-DE-FRANCE - Normales et relevés sur la France métropolitaine [WWW Document]. URL <http://www.meteofrance.com/climat/france/ile-de-france/regi11/normales> (accessed 7.4.17).
- Sénat, 2017. Le Grand Paris : un vrai projet pour un enjeu capital [WWW Document]. URL <https://www.senat.fr/rap/r07-262/r07-26212.html> (accessed 6.1.17).
- Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'eau, 2017. Sandre - Portail national d'accès aux référentiels sur l'eau [WWW Document]. URL <http://www.sandre.eaufrance.fr/> (accessed 7.10.17).
- SIAAP, 2017. SIAAP | SIAAP : Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne. URL <http://www.siaap.fr/siaap/> (accessed 6.27.17).
- Ville de Paris, 2017. Les égouts à Paris. URL <https://www.paris.fr/services-et-infos-pratiques/environnement-et-espaces-verts/eau-et-assainissement/les-egouts-a-paris-2367>(accessed 9.11.2017)