

Rapport de synthèse

Phase 7
(2015-2019)

Volume 3

Hydrologie urbaine

Sommaire

Reproduire le cycle de l'eau (petit et grand) à l'échelle de Paris et sa petite couronne	4
Introduction	6
1. Fonctionnement du réseau d'assainissement de la zone d'étude	7
1.1. Présentation générale de la zone d'étude	7
1.2. La gestion de l'assainissement sur la zone d'étude	8
1.3. Les différents réseaux et leur fonctionnement	12
2. Reconstruction du réseau simplifié d'assainissement de la zone d'étude	25
2.1. L'outil de reconstruction TOHR (Lotfi et al, 2016b)	25
2.2. La projection du réseau reconstruit sur la grille	27
2.3. Les données disponibles et la méthodologie	27
2.4. Résultats	28
3. Modélisation hydrologique de la zone d'étude	41
3.1. Le modèle hydrologique TEB-Hydro	41
3.2. Les données disponibles et configuration des simulations	41
3.3. Résultats	43
3.4. Analyse	46
4. Conclusion et perspectives	47
Bibliographie	48
Sitographie	49
Abréviations	50

Reproduire le cycle de l'eau (petit et grand) à l'échelle de Paris et sa petite couronne

Katia Chancibault^{1*}, Alexandra Mosset¹, Zineb Lotfi¹, Carla Beauvais¹, Sayed Shobair¹, Sara Ourrai¹, Jean-Claude Linca², Alain Rabier², Nathalie Vernin², Melisande Oget², Marie-Mélie Belin⁴, Sam Azimi³, Frédéric Bethouart⁵, Abdelkader Bedrane⁵, Christophe Lehoucq⁴, Christian Roux⁴, Vincent Rocher², Claude Joannis¹, Ghassan Chebbo⁶

¹ IFSTTAR/GERS/EE

² CD94/DSEA

³ SIAAP-DDP

⁴ CD92/Direction de l'eau

⁵ STEA/Ville de Paris

⁶ ENPC, LEESU

* katia.chancibault@ifsttar.fr

Résumé

Les zones urbaines, par l'imperméabilisation des surfaces et le drainage du sol par les réseaux, influencent fortement le cycle de l'eau. Des dispositifs, souvent basés sur la végétation constituent des techniques dites alternatives permettant une gestion à la source des eaux pluviales. Leur multiplication sur le réseau ou les projets d'aménagements plus durables (écoquartiers) modifient le cycle de l'eau et donc la gestion de l'eau : de nouveaux processus (évapotranspiration, infiltration) apparaissent dans la gestion globale de l'assainissement (en particulier en présence de réseaux unitaires). Le modèle hydrologique TEB-Hydro reproduit tout le cycle de l'eau (petit et grand) à l'échelle d'un territoire. Il n'a pas pour vocation la gestion au quotidien du réseau d'assainissement, mais peut aider à la décision de futurs aménagements, plus durables. En plus de données météorologiques et d'occupation du sol, il nécessite le graphe orienté d'un réseau d'assainissement fonctionnel mais adapté à la résolution du modèle. Un outil de reconstruction (TOHR), basé sur le réseau réel fournit ce réseau simplifié à TEB-Hydro.

La zone d'étude est la zone urbaine couvrant la Ville de Paris et sa petite couronne constituée des départements des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val de Marne. De nombreux acteurs ont un rôle dans la gestion du réseau d'assainissement sur cette zone : les communes, les départements, les syndicats et le Syndicat Interdépartemental de l'assainissement de l'Agglomération Parisienne. Ajouté à l'historique de l'urbanisation de la zone, ce réseau d'assainissement a, en de nombreux endroits, un fonctionnement atypique, en lien aussi avec les contraintes majeures auxquelles sont confrontés les gestionnaires du réseau. Le fonctionnement des réseaux interdépartemental et départementaux ont été identifiés préalablement à la reconstruction de chacun de ces réseaux séparément, puis globalement. Ceci a été possible grâce à de nombreux échanges avec les gestionnaires. L'évaluation de chacune de ces reconstructions et l'analyse du réseau simplifié obtenu est présentée. Selon les départements et la complexité du fonctionnement du réseau, les résultats de la reconstruction sont plus ou moins satisfaisants. La modélisation hydrologique, appliquée d'abord à l'échelle du département des Hauts de Seine puis à toute la zone, est évaluée et analysée, à l'échelle de différents bassins versants (séparatifs et unitaires).

Points clefs

- Compréhension globale du fonctionnement du système d'assainissement de Paris et sa petite couronne
- Reconstruction et simplification du réseau d'assainissement de Paris et sa petite couronne
- Première tentative de modélisation des écoulements d'eau pluviale à l'échelle de Paris et sa petite couronne.

Pour citer cet article : Chancibault, K, *Reproduire le cycle de l'eau (petit et grand) à l'échelle de Paris et sa petite couronne*, dans Hydrologie urbaine, Chancibault (eds.), Rapports de synthèse de la phase VII du PIREN-Seine, Volume 3, 2019.

Introduction

La population urbaine augmente dans le monde depuis plusieurs décennies et devrait continuer de croître durant les prochaines (Nations Unies, 2018). L'urbanisation s'accompagne de l'imperméabilisation des surfaces et de la modification des chemins d'écoulement de l'eau (réseaux d'assainissement, fermeture des rivières urbaines) (Leopold, 1968). Ainsi, le cycle de l'eau en est fortement modifié (Fletcher et al, 2013). L'infiltration des eaux pluviales dans le sol en est fortement diminuée, entraînant une augmentation du ruissellement de surface. L'évapotranspiration est aussi plus faible. L'écoulement des eaux, concentrées dans les collecteurs du réseau d'assainissement, est accéléré. Les eaux de ruissellement lessivent des surfaces potentiellement polluées par les activités humaines (trafic, industrielles, ...) et les matériaux utilisés (zinc, plomb, suies, ...). Ces eaux peuvent être traitées par les stations de traitement des eaux usées (STEU), en cas de pluie faible et de réseau d'assainissement unitaire, ou rejetées vers le milieu naturel, en cas de réseau séparatif ou de pluie plus ou moins forte dans un réseau unitaire (via les déversoirs d'orage). En milieu urbain, les crues sont alors plus fréquentes et plus intenses qu'en milieu rural et la qualité des eaux des rivières peut être fortement dégradée.

La Directive cadre sur l'eau (2000/60/CE) contraint les collectivités à maintenir un bon état écologique des eaux. En particulier, les déversements vers le milieu naturel doivent être limités. Des solutions existent pour limiter ces déversements. Elles visent à privilégier une gestion de l'eau à la source, avec l'aide de techniques dites alternatives. Ces techniques alternatives ont pour but de rapprocher le cycle de l'eau en milieu urbain au cycle de l'eau naturel, en facilitant l'infiltration de l'eau dans les sols ou le stockage avant infiltration ou rejet dans le réseau. Ces solutions changent fondamentalement la gestion de l'eau en ville. En effet, les collectivités gèrent leur réseau à l'aide d'informations sur la pluie, la production d'eaux usées, la représentation détaillée des écoulements au sein du réseau et éventuellement la hauteur dans les rivières réceptrices des rejets. La diffusion de plus en plus large de ces techniques implique désormais de prendre en compte les éventuelles interactions avec le sol. Les outils dont les gestionnaires disposent actuellement ne sont pas en mesure de représenter avec réalisme ces processus.

Le projet PIREN-Seine, phase VII, a entre autres objectifs, d'évaluer l'impact des zones urbaines sur la Seine, en termes de pollution et de fonctionnement hydro-géologique, en particulier celle constituée de Paris et sa petite couronne. Un outil capable de représenter les différents processus intervenant dans le cycle de l'eau, ainsi que les différents chemins d'écoulement est nécessaire. Le LEE (Ifsttar), en collaboration avec le CNRM (Météo-France, CNRS) a développé un tel outil (TEB-Hydro) (Stavropoulos-Laffaille et al, 2018). Cet outil a pour objectif de travailler à l'échelle annuelle et du territoire, afin de simuler le « grand cycle de l'eau » et de caractériser son évolution éventuelle, en fonction de l'évolution de l'urbanisation, des aménagements avec des techniques alternatives ou encore du changement climatique. A de telles échelles spatiales et temporelles, la simplification de l'espace est un préalable. Le modèle hydrologique TEB-Hydro segmente l'espace à l'aide d'une grille à mailles régulières, selon une résolution à déterminer selon le site étudié. Afin de maintenir une cohérence entre les processus mais aussi de limiter les temps de calculs, le réseau d'assainissement, au chevelu très dense, nécessite d'être simplifié, mais en gardant une fonctionnalité équivalente. Cet outil n'a évidemment pas pour objectif de remplacer les outils actuels de gestion des réseaux d'assainissement, mais de les compléter. Ce n'est pas un outil de gestion au quotidien, mais un outil d'aide à la décision, pour l'évaluation de projets d'aménagement.

Dans le cadre du projet PIEN-Seine, l'objectif était donc de définir le cadre de modélisation, sur l'aire urbaine centrée sur Paris, en délimitant la zone à étudier, en collectant les données d'occupation du sol et de forçage météorologiques, nécessaires au modèle. Il s'agissait au préalable de comprendre le fonctionnement du réseau d'assainissement à l'échelle du territoire étudié, avant de le reconstruire en le simplifiant, selon la résolution du modèle hydrologique TEB-Hydro.

Dans ce document, la première partie décrit le fonctionnement du réseau d'assainissement de toute la zone, après en avoir fait une brève présentation. La deuxième partie présente le réseau d'assainissement de la zone étudiée, reconstruit et simplifié, et l'évalue. La dernière partie est dédiée à la modélisation hydrologique.

1. Fonctionnement du réseau d'assainissement de la zone d'étude

Pour la modélisation hydrologique, le modèle TEB-Hydro nécessite de connaître les caractéristiques du réseau hydrographique global (assainissement, naturel et leurs connexions entre eux), afin de transférer les eaux produites en surface par ruissellement, mais aussi les écoulements d'eau dans le sol. L'arborescence du réseau, sous forme de graphe orienté, qui déterminera les chemins d'écoulement, doit alors être connue. Cependant, elle est rarement disponible dans les bases de données urbaines. Pour reconstruire cette arborescence, à partir de diverses données présentes dans les bases de données urbaines, la connaissance globale du fonctionnement du réseau est nécessaire. Lotfi et al (2016a) ont fait la synthèse du fonctionnement du réseau à l'échelle interdépartementale et une première ébauche à l'échelle des départements. Le fonctionnement des réseaux départementaux des Hauts-de-Seine et du Val de Marne a été approfondi par Beauvais et al (2017) et Shobair et al (2018).

1.1. Présentation générale de la zone d'étude

La zone d'étude de la partie hydrologie urbaine du projet PIREN-Seine s'étend sur Paris et sa petite couronne. Cela correspond à la majorité de la zone drainée par le réseau interdépartemental et donc par les stations de traitement des eaux usées gérées par le SIAAP.

1.1.1. Occupation du sol

La zone d'étude se compose de la Ville de Paris et des trois départements qui constituent la petite couronne : les Hauts-de-Seine, la Seine-Saint-Denis et le Val-de-Marne ; soit 124 communes pour une superficie de 762km² (Sénat, 2017). Cette zone est aujourd'hui très densément peuplée, notamment Paris qui compte 20 569 habitants/km². Ses départements limitrophes ont une densité de population de 8 724 hab/km² pour les Hauts-de-Seine, 6 287 hab/km² pour la Seine-Saint-Denis et 5 277 hab/km² pour le Val-de-Marne.

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). Dans cette zone, on observe également la présence d'espaces naturels, agricoles ou boisés à hauteur de 15,5%. Ces zones naturelles sont majoritairement présentes 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).

1.1.2. Climat, hydrographie et géologie/pédologie

La zone est soumise à un climat de type océanique altéré : l'écart des températures moyennes annuelles (8.9°C / 16°C ; 1891-2010) est plus important que pour la bordure océanique et les précipitations y sont moindres (637mm ; 1981-2010) (Météo France, 2016). Par ailleurs, les pluies sont plus importantes en hiver qu'en été, pour une moyenne de 111 jours pluvieux.

La zone d'étude fait partie du bassin parisien, 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 km² 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).

On y observe différents terrains sédimentaires : calcaires, marnes, argiles, sables, gypse, meulière. Ils correspondent à différents étages géologiques (Sparnacien, Lutétien, Ludien et Stampien).

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 Mer, 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).

1.2. La gestion de l’assainissement sur la zone d’étude

Le réseau d’assainissement de Paris et sa petite couronne se caractérise par un fonctionnement complexe s’expliquant par l’intervention de nombreux acteurs et maîtres d’ouvrage dans la chaîne d’assainissement, l’urbanisation rapide de la zone et une forte hétérogénéité du réseau et des contraintes majeures.

1.2.1. Historique

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 de traitement des eaux usées 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, créé 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 alors que les communes plus éloignées et surtout plus récentes sont équipées en réseau séparatif (Tabuchi et Penouël, 2014).

1.2.2. Les différents acteurs

L’assainissement, habituellement assuré par les communes, comporte trois principales missions : la collecte, le transport et l’épuration. L’une des particularités du réseau d’assainissement de Paris et sa petite couronne est la réalisation de la mission de transport par étapes, grâce à une chaîne de transfert des effluents depuis les habitations jusqu’aux stations de traitement des eaux usées assurée par différents acteurs.

- Le premier intervenant est *la commune ou une communauté d’agglomération* ayant pris la compétence assainissement. Celle-ci assure grâce à un *réseau communal*, la collecte et le transport local jusqu’au réseau départemental.

Le *réseau départemental* est géré par les 4 départements (Ville de Paris, les Hauts-de-Seine, la Seine-Saint-Denis et le Val de Marne), qui en sont également propriétaires. Les conseils départementaux correspondants, au travers de services dédiés, exercent alors une compétence en matière d’assainissement :

- Section de l’assainissement de Paris (SAP75),
- Direction de l’eau du Conseil départemental des Hauts de Seine (DE92),
- Direction de l’Eau et de l’Assainissement du Conseil départemental de Seine-Saint-Denis (DEA93),
- Direction des Services de l’Environnement et de l’Assainissement du Conseil département du Val de Marne (DSEA94).

Chacun de ces services gère et entretient le réseau dont il est propriétaire, il conçoit et réalise aussi de nouveaux équipements.

Dans certains cas, pour des raisons d’ordre géographique ou de contraintes techniques particulières, les habitations peuvent être raccordées directement au réseau départemental, autrement son rôle principal se limite à transférer les effluents depuis le réseau communal vers le réseau interdépartemental.

- Le *réseau interdépartemental* a pour rôle le transport jusqu’aux stations de traitement des eaux usées (STEU) et le traitement des effluents des départements de la petite couronne et de syndicats. Ce réseau appartient majoritairement au Syndicat Interdépartemental pour l’Assainissement de l’Agglomération Parisienne (SIAAP), à l’exception de certains collecteurs qui appartiennent à la ville de Paris mais qui sont considérés d’intérêt interdépartemental.

Le SIAAP (Syndicat Interdépartemental pour l’Assainissement de l’Agglomération Parisienne) est un établissement public administratif de coopération interdépartementale créé en 1970 et qui a pour mission le transport et le traitement des effluents collectés. Aujourd’hui, le territoire couvert par le SIAAP (*Figure 1*),

est composé de l'agglomération parisienne (départements de Paris, Hauts-de-Seine, Val-de-Marne et Seine-Saint-Denis), ainsi que certaines communes de la Seine-et-Marne, des Yvelines, de l'Essonne et du Val-d'Oise pour un total de 284 communes (dont 124 sur Paris et sa petite couronne), soit l'équivalent de 1800 km² drainés et une population de près de 9 millions d'habitants.

Chaque jour, 2,5 millions de m³ d'eaux usées transitent dans les émissaires du SIAAP et sont acheminés vers les stations de traitement des eaux usées qui rejettent les eaux épurées dans la Seine ou la Marne.

- Enfin, d'autres types de réseaux peuvent coexister avec les susdits, à savoir les réseaux privés de grandes entreprises (telles que les aéroports, SNCF...).

Compte-tenu du nombre de gestionnaires sur ce territoire et de la résolution (250m) à laquelle nous avons choisi de travailler (Partie 1), nous avons décidé de nous limiter aux réseaux interdépartementaux et départementaux de Paris et de sa petite couronne.

1.2.3. Typologie et contraintes majeures du réseau

Le réseau public d'assainissement peut être classé en deux catégories :

- le système d'assainissement unitaire : qui reçoit les eaux usées et les eaux pluviales dans une même conduite,
- le système d'assainissement séparatif : qui reçoit strictement les eaux usées dans une canalisation et les eaux pluviales dans une autre généralement parallèle et de plus grand diamètre.

A l'échelle communale, le réseau d'assainissement est unitaire ou séparatif. Il existe également certaines zones dites mixtes qui seront équipées à la fois d'un réseau unitaire et d'un réseau séparatif (à l'exemple de Vitry-Sur-Seine dans le Val de Marne), ou encore d'un réseau unitaire et pluvial parallèlement. Cependant, équiper une commune d'un réseau séparatif n'empêche pas l'apparition de pollution au niveau des exutoires d'eaux pluviales en période de temps sec ou encore de débordements du réseau en temps de pluie à cause d'une sélectivité médiocre du réseau due à des inversions de branchements entre autres (SAGE Marne Confluence, 2013).

De même que le réseau communal, le réseau départemental peut être soit unitaire soit séparatif et obéit aux mêmes caractéristiques géographiques (l'unitaire étant proche de Paris). Toutefois, les types de réseaux départemental et communal peuvent différer sur certaines régions, ainsi une commune dotée d'un réseau d'assainissement séparatif peut se voir traversée par un réseau départemental unitaire qui recueille les eaux usées uniquement ou les eaux usées et pluviales. Il est également possible d'observer les deux types de réseau sur une même zone, que l'on appelle zone mixte. Sur celles-ci, le réseau séparatif et le réseau unitaire se superposent en série ou en parallèle sans être reliés.

Plusieurs types de connexions sont possibles entre les différents réseaux aménagés en série et qui donc, déversent les uns dans les autres, ainsi :

- le réseau d'eaux usées peut déverser dans le réseau unitaire,
- le réseau d'eaux pluviales peut déverser dans le réseau unitaire particulièrement en l'absence de cours d'eau naturel,
- le réseau unitaire peut déverser dans le réseau d'eaux usées.

Il est à noter que les conduites liant les déversoirs d'orage du réseau unitaire aux cours d'eaux naturels sont souvent considérées par les gestionnaires des départements comme des canalisations d'eaux pluviales, puisqu'elles ne sont censées recevoir, qu'en temps de pluie, des effluents dilués mais aussi parce qu'elles sont souvent liées aux conduites d'eaux pluviales classiques et reçoivent les eaux de pluies des voiries. Cette assimilation peut induire parfois à confusion puisque d'autres cartes vont inclure ces conduites dans le réseau unitaire.

Le réseau interdépartemental (*Figure 2*) est, quant à lui, principalement unitaire (255.8 km) à l'exception des nouveaux réseaux d'eaux usées desservant les stations de traitement des eaux usées (STEU) Seine Amont (SAM) et Marne Aval (MAV) sur le Val de Marne et Seine-Morée sur Seine-Saint-Denis (81.9 km) et les conduites de surverses (99.2 km). Comme le réseau départemental, les deux types de réseaux d'eaux usées et unitaire sont également reliés dans les deux sens, particulièrement au niveau des communes Île-Saint-Denis (93) et Charenton (94).

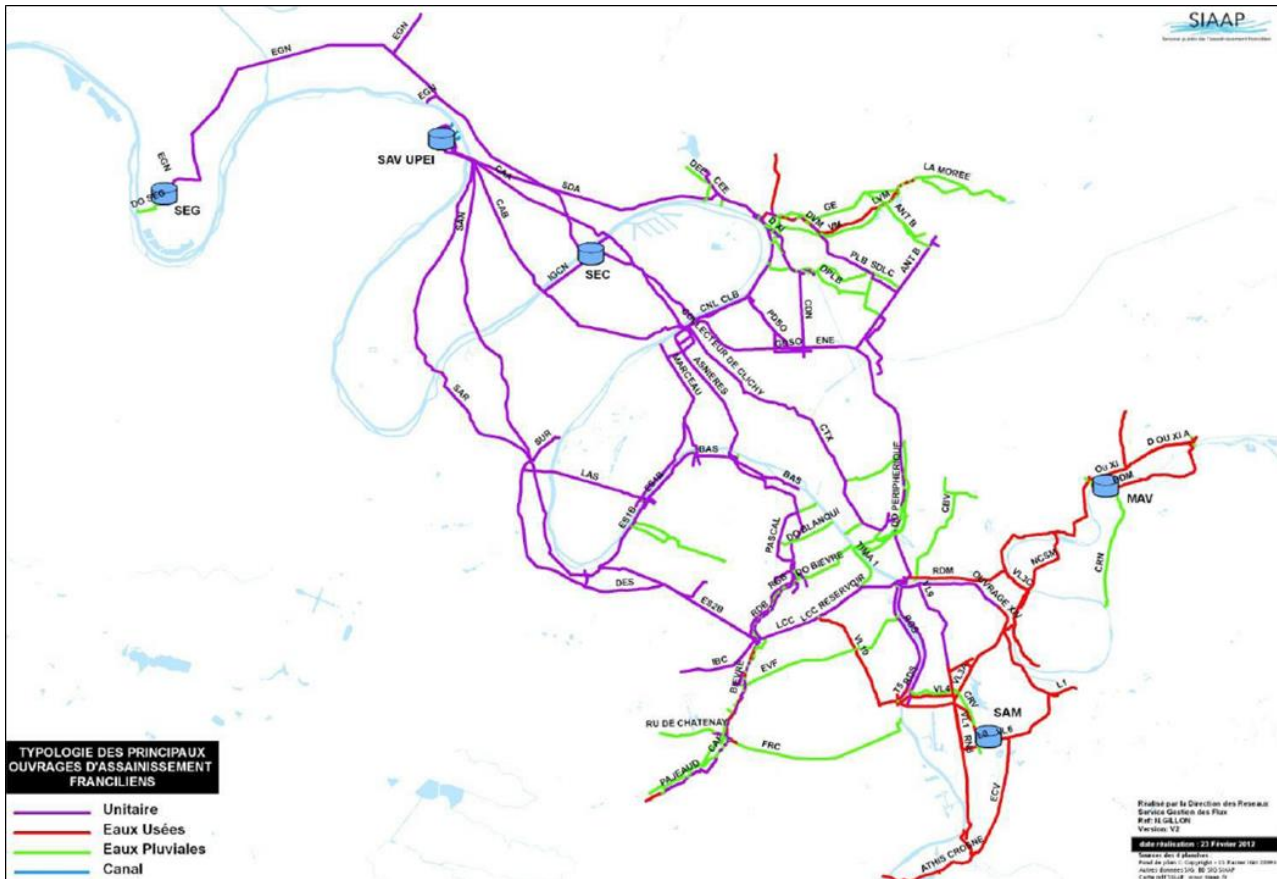


Figure 2. Typologie des principaux ouvrages d’assainissement du réseau interdépartemental (SIAAP, 2014)

Un autre problème majeur sur la zone d’étude est le débordement du réseau en période de fortes pluies engendrant des pertes matérielles et humaines. Il est important de noter que les déversements n’ont pas uniquement lieu lors d’épisodes orageux, 80% des déversements à Paris ont lieu pour des pluies inférieures à 8mm soit à une fréquence mensuelle (APUR, 2015). Par ailleurs, les eaux de pluie peuvent engendrer d’autres problèmes tels que le fonctionnement dégradé des usines qui dépassent souvent leurs débits de référence ou encore des contraintes liées à l’installation de systèmes séparatifs, à savoir les mauvais branchements qui aggravent les problèmes précédemment cités ou le lessivage des voiries et toitures par ces eaux qui sont ensuite directement rejetées dans le milieu naturel.

1.2.4. Les données

Chaque Conseil départemental, ainsi que le SIAAP, disposent d’une base de données décrivant de façon plus ou moins détaillée son réseau d’assainissement. Parmi les données mises à notre disposition, voici celles (géoréférencées) qui ont été utilisées lors de cette étude :

- les regards et leur profondeur (ou altitude selon le référentiel choisi, pas toujours renseigné),
- les conduites et le type de réseau (unitaire, pluvial ou eaux usées),
- les déversoirs d’orage,
- les stations de pompage,
- Les stations de traitement des eaux usées et de pré-traitement, ainsi que leur zone d’apport (Figure 3).

En fonction de notre demande et de leur disponibilité, les zones de collecte de points majeurs des différents réseaux (points de transfert, points auto-surveillés) ont pu être fournies (sous forme géoréférencée). Les délimitations estimées des bassins versant d’eau pluviale ont aussi parfois été utilisées.

En terme de données hydrologiques, nous avons eu à notre disposition les données pluviométriques ainsi que les données débitmétriques des points auto-surveillés et parfois d’autres points sur le réseau d’eaux usées ou unitaire. Quelques données de stations de mesure sur le réseau d’eaux pluviale ont été fournies.

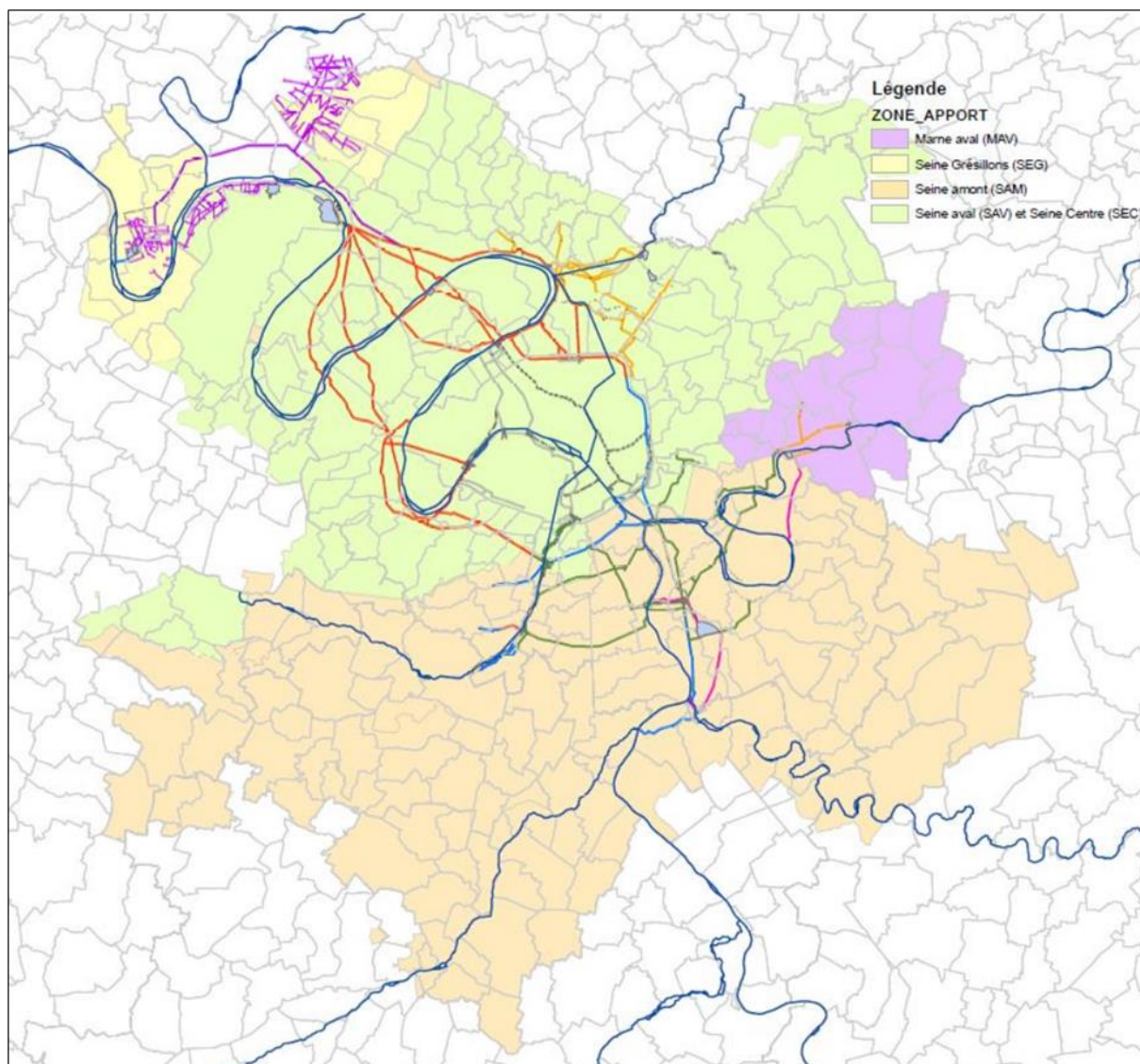


Figure 3 Zone d’apport des usines de traitement des eaux usées du SIAAP (Tabuchi et Penouël, 2014)

1.3. Les différents réseaux et leur fonctionnement

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes basés sur les données SIG pré-citées, relatives au réseau, fournies par le SIAAP et les conseils départementaux de la zone d’étude. Les différents documents (rapports de bilan d’auto-surveillance, bilans d’exploitation, ...) ont été une aide pour comprendre le fonctionnement du réseau dans sa globalité et plus localement. Enfin, nous avons aussi rencontré les exploitants du réseau qui ont pu compléter notre connaissance de celui-ci par des informations pratiques et des données de gestion quotidienne et à jour, puisque de nouveaux ouvrages ont été mis en fonction à partir de 2014 seulement. Le CD93 a été contacté tardivement, car il dispose d’une base de données détaillée en open data accessible par internet. Nous n’avons donc pas à cette heure eu la possibilité d’échanger avec les agents compétents de Seine-Saint-Denis, comme avec les autres départements, au sujet du fonctionnement du réseau et de sa reconstruction.

La partie suivante a pour vocation de présenter au mieux l’exploitation du réseau interdépartemental et des réseaux départementaux. Cependant il est indispensable de garder à l’esprit que celui-ci est géré en temps réel par des agents dont l’objectif principal est d’en optimiser l’utilisation par diverses manipulations (fermeture de déversoirs, déviation des eaux...). Cette gestion prend en compte les travaux de maintenance quasi-permanents sur le réseau, les accidents et les arrêts non planifiés, les limitations quotidiennes des STEU ainsi que les aléas météorologiques et les niveaux d’eaux dans la Seine.

Bien que bénéficiant de l’apport considérable du modèle MAGES, les agents d’exploitation se basent sur une longue expérience de gestion et une connaissance méticuleuse du réseau afin de le gérer et de prendre des décisions ponctuelles qui permettent au mieux de répondre à la protection du milieu naturel.

Dans la suite, nous nous attacherons donc à décrire le fonctionnement courant des réseaux interdépartemental et départementaux, en précisant certaines consignes appliquées en situations exceptionnelles, après avoir présenté les principales infrastructures.

1.3.1. Les principales infrastructures

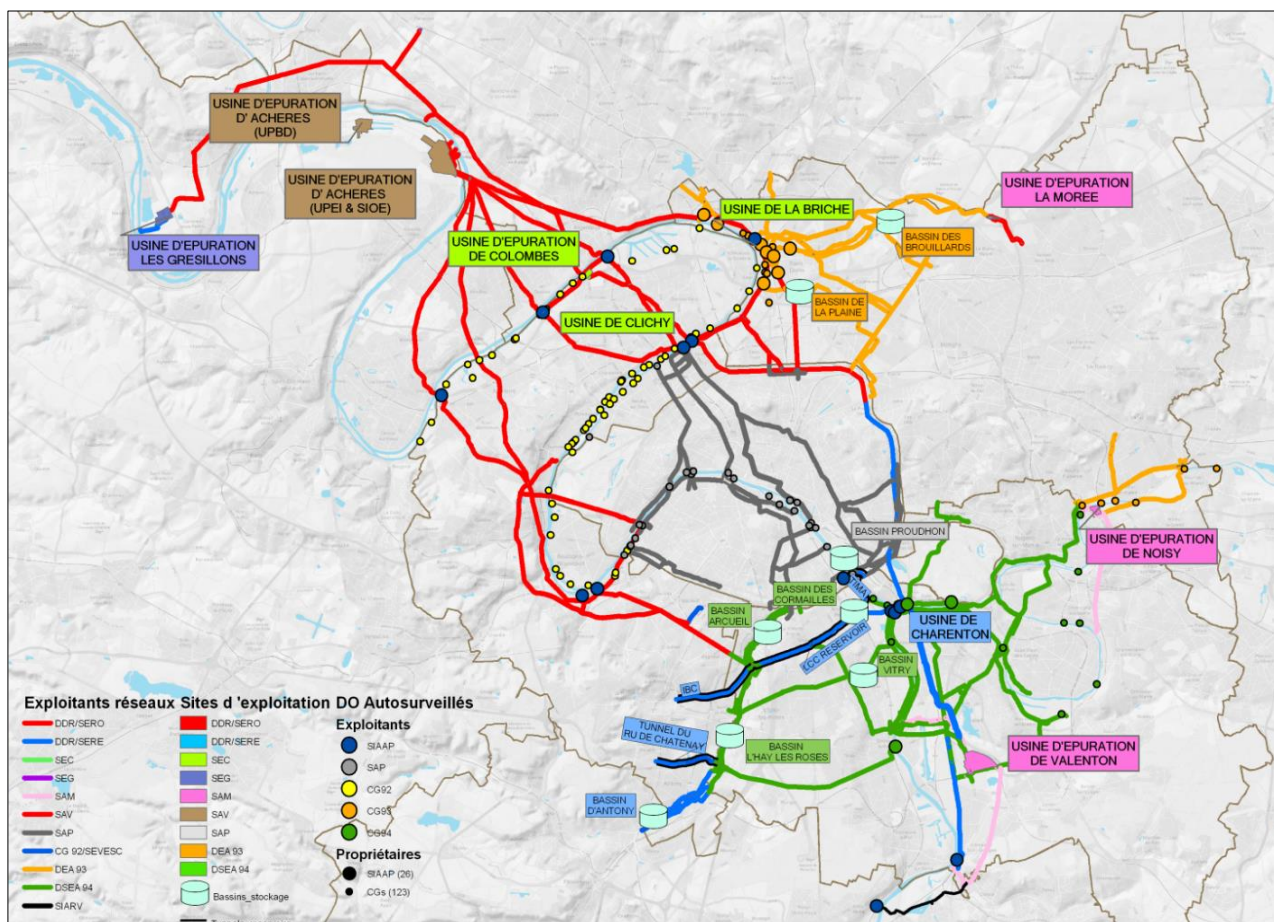


Figure 4 Schéma représentant les infrastructures du SIAAP (Source : SIAAP)

Les stations de traitement des eaux usées

Pour traiter les effluents collectés sur sa zone d’intervention, le SIAAP dispose de 6 usines de traitements des eaux usées (STEU) listées dans le Tableau 1 et leur emplacement sont indiqués sur la Figure 2.

Tableau 1 : Stations de traitement des eaux usées du SIAAP

STEU	Commune	Débit de référence	Type de réseau
Seine Aval (SAV)	Achères (92)	2 300 000 m ³ /j	Unitaire
Seine Amont (SAM)	Valenton (93)	800 000 m ³ /j	Séparatif
Seine Centre (SEC)	Colombes (92)	240 000 m ³ /j	Unitaire
Marne Aval (MAV)	Noisy-le-Grand (94)	100 000 m ³ /j	Séparatif
Seine Grésillons (SEG)	Triel-sur-Seine (78)	300 000 m ³ /j	Unitaire
Seine Morée	Blanc-Mesnil (93)	75 000 m ³ /j	Séparatif

Historiquement, les eaux usées de Paris et sa couronne étaient entièrement acheminées vers l'Usine Seine Aval qui demeure à ce jour la plus importante usine de traitement des eaux usées en Europe et reçoit plus de 80% du volume d'eaux usées collecté par le SIAAP. Mais dès 1968, les capacités épuratoires de l'usine d'Achères ne permirent plus de gérer les volumes évacués par la région parisienne toujours en développement ; émerge alors une politique de séparation en trois secteurs : le secteur d'Achères, le secteur de Seine Amont sur le Val-de-Marne et le secteur de Marne Aval avec la construction de nouvelles usines de traitement des eaux usées (APUR, 2015).

Depuis, le SIAAP continue de développer et de renforcer les infrastructures de traitement des effluents sur les zones dont il assume la compétence. Ainsi, de nouvelles usines sont construites afin de soulager les principales :

- Seine Grésillons : reçoit les effluents des syndicats du nord ainsi qu'une partie des eaux de Clichy
- Seine Centre : est à la fois une station de traitement et de gestion des effluents. Elle couvre la même zone d'apport que Seine Aval, à savoir les départements 75, la majorité des départements 92 et 93 ainsi que d'autres syndicats. Elle est alimentée à partir de l'usine de prétraitement Clichy. C'est cette configuration particulière qui justifie la représentation commune de Seine Centre et Seine Aval sur la *Figure 3*.
- Seine-Morée : est l'usine la plus récente du SIAAP (à partir de 2014). Le projet initial, incluant une usine d'incinération, visait le traitement de la plus grande partie des effluents de Seine-Saint-Denis. Cependant, la construction de l'usine d'incinération n'a pu aboutir et la capacité de traitement de Seine-Morée en a été fortement affectée.

Compte-tenu de la localisation de la zone d'apport de Seine-Grésillon en dehors de la zone d'étude (Paris et sa petite couronne), il a été décidé de limiter l'étude aux 4 autres STEU.

Les déversoirs d'orage

25 déversoirs d'orage équipent le réseau du SIAAP (*Figure 5*) afin de protéger les ouvrages et éviter les débordements sur la voirie, les principaux étant ceux des usines de prétraitement de Clichy et de la Briche qui rejettent plus de 80% du volume mesuré. Ce point est pris en compte dans le dernier schéma directeur d'assainissement du SIAAP (2007-2021) qui prévoit la création de bassins de stockage à ces endroits (APUR, 2015).

Le déversoir d'orage La Frette, situé à l'amont de Seine Aval, compte également parmi les principaux déversoirs du SIAAP, cependant ses déversements sont dorénavant comptabilisés avec ceux de la STEU afin de correspondre au format SANDRE.

Enfin, il est à noter que certains des déversoirs d'orage représentés sur la *Figure 5* tiennent plus de points de rejets vers le milieu naturel, particulièrement au niveau de Seine-Saint-Denis. En effet, ceux-ci représentent les points avals des conduites de surverses, alors que les jonctions avec le réseau unitaire se trouvent plus en amont du réseau.

A l'échelle du département du Val de Marne, 11 points de déversement ont été choisis pour être contrôlés dans le cadre de l'Auto-surveillance (arrêté du 22 décembre 1994) et instrumentés à cet effet en 1997 (DSEA, 2010). Avec l'arrêté du 21 juillet 2015, ce nombre a nettement augmenté jusqu'à 143 points. Mais l'objectif global de ces travaux étant de simuler le fonctionnement du réseau hydrographique complet de Paris et sa petite couronne en 2014, nous ne nous intéresserons ici qu'aux 11 déversoirs auto-surveillés en 2014 (Shobair et al, 2018).

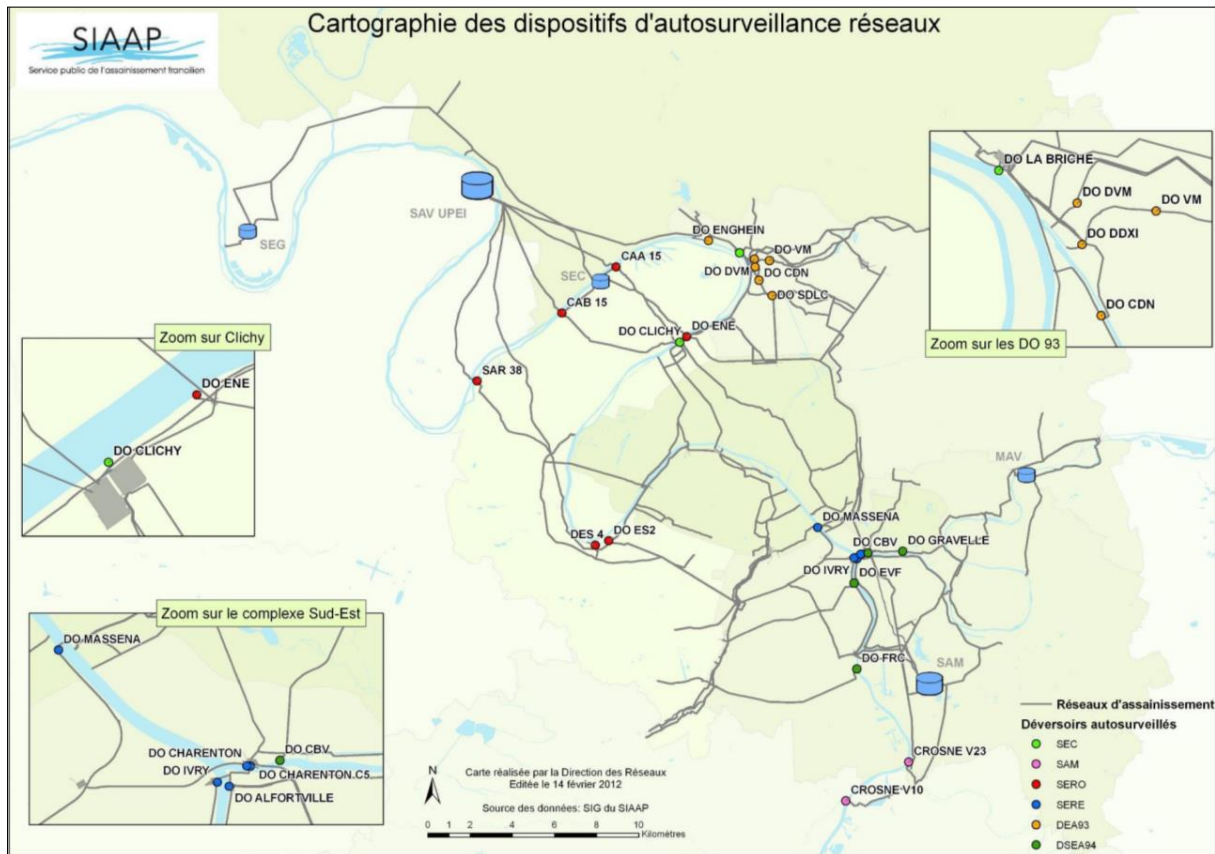


Figure 5 Cartographie des principaux déversoirs du SIAAP. En vert, les DO les plus importants : Clichy et La Briche (Tabuchi et Penouël, 2014)

Dans les Hauts-de-Seine 85 points de rejet en Seine ont été recensés (les deux points de rejets indirects en Seine ne sont pas comptabilisés ici (via le Fresnes-Choisy), via 126 déversoirs d’orage, dont 24 seuils de régulation et 75 instrumentés (Lehoucq and Pister, 2016).

En Seine-Saint-Denis, il existe plus de 30 points de rejets (dont 9 interdépartementaux).

A Paris, un volume important d’eaux claires, d’eaux d’exhaure, d’eaux du réseau non potable et d’eaux de pluie en plus des eaux usées transportées, peut amener le réseau à saturation. Ainsi, 45 déversoirs d’orage ont été aménagés, dont 39 sont automatisés, délestant directement dans la Seine sans traitement. On estime à environ 1,469Mm³ les eaux rejetées en Seine en 2014, principalement en été lorsque la Seine est à l’été. Si la cause principale des déversements est la pluie, il est nécessaire de préciser que ceux-ci ont lieu dès les plus faibles pluies de période de retour mensuelle (APUR, 2015).

Les bassins de stockage

Tableau 2 Ouvrages de stockage du SIAAP

Ouvrage de stockage	Capacité	Exploitant
1- Bassin de La Plaine à Saint-Denis	165 000 m ³	DEA93
2- Bassin Proudhon à Paris	17 000 m ³	SAP
3- Complexe des Cormailles (bassin + puits) à Ivry-sur-Seine	55 000 m ³	DSEA94
4- Bassin d'Arcueil à Arcueil :	24 000 m ³	DSEA94
5- Bassin EV3 de Vitry-sur-Seine	55 000 m ³	DSEA94
6- Bassin de L'Hay-les-Roses	84 200 m ³	DSEA94
7- Bassin d'Anthony	115 000 m ³	DDR SERE
8- Bassin des Brouillards à Dugny	90 000 m ³	DEA93
A- Tunnel-Réservoir Ivry-Massena	80 000 m ³	SIAAP
B- Tunnel-Réservoir du Ru de Chatenay	34 500 m ³	SIAAP
C- Tunnel-Réservoir Blagis-Cachan	25 000 m ³	SIAAP
D- Liaison Cachan-Charenton	110 000 m ³	DSEA94
TOTAL	854 700 m ³	

Afin de limiter les déversements dans le milieu naturel, le SIAAP a construit plus de 12 ouvrages de stockage sur le réseau (*Figure 5*), totalisant une capacité de rétention de plus de 800 000 m³. En y ajoutant les grands émissaires de transport, le SIAAP peut stocker ponctuellement près de 1.8 Mm³. Associés à d'autres mesures d'optimisation du réseau d'assainissement (télégestion des ouvrages, renforcement du réseau...), les bassins de stockage ont permis de diminuer fortement les rejets vers le milieu naturel en stockant 6.433 Mm³ en 2014 par exemple.

Toutefois, les ouvrages de stockage présentent certaines limites liées en particulier aux conditions d'exploitation. Ainsi le tunnel Ivry-Massena (TIMA), construit afin de limiter les déversements au sud-est de Paris, nécessite chaque année un curage intensif suite à l'accumulation de flottants, ce qui conduit à une période de chômage de 7 mois en hiver (APUR, 2015). Le fonctionnement continu du TIMA aurait pu éviter le déversement potentiel de 688 000m³ au lieu de 652 000 m³ en 2014 soit une différence de 3% des rejets annuels (SAP, 2015).

Les Hauts-de-Seine gèrent 9 ouvrages de rétention des eaux, d'un volume cumulé d'environ 55 000 m³ (Lehoucq et Pister, 2016). Quatre d'entre eux sont situés au sud au sein de la zone séparative. Les cinq autres sont localisés dans la zone unitaire avec 3 regroupés au nord-ouest, un au nord et un au sud.

La DSEA du Val de Marne gère 25 bassins de rétention, mais ils ne sont pas tous pris en compte dans le bilan annuel d'auto-surveillance. En effet, certains n'ont pas un rôle stratégique sur le fonctionnement du système d'assainissement. Les volumes de stockage jouent un rôle stratégique particulièrement dans la gestion des flux et pour limiter les rejets et l'impact sur le milieu récepteur. Les huit principaux bassins de rétention sont présentés dans le *Tableau 3*.

Tableau 3 Principaux bassins de rétention du Val de Marne (DSEA, 2014)

Nom du Bassin	Réseau	Capacité (m ³)	Description
Arcueil	Unitaire	25126	Stockage
Chevilly	Unitaire	13000	Stockage et dépollution
Cormailles	Unitaire	55337	Storage
EV3	Unitaire	47642	Stockage
Laiterie	Pluvial	20290	Stockage et dépollution
L'Hay les Roses	Unitaire	120280	Stockage
Mail des mèches	Pluvial	27983	Stockage
Sucy	Pluvial	9700	Stockage et dépollution

Situé sur un territoire à faible dénivelé et avec peu de connexions avec le milieu naturel sauf à l’aval de la Seine et sur un tronçon de la Marne, le département de la Seine-Saint-Denis a toujours été exposé aux risques d’inondations et de débordements des réseaux, avec 25 communes sur 40 en catégorie risque fort ou assez fort pour les inondations pluviales urbaines (APUR, 2015). Ce risque a poussé le département à s’orienter vers des techniques de régulation des débits des eaux pluviales notamment les bassins de stockage. Cette sensibilité oriente sa politique de gestion des eaux en temps de pluie puisque la priorité sera de soulager les réseaux en déversant vers le milieu naturel afin de conserver un volume de stockage maximum disponible dans les bassins. Ainsi, ce département dispose de 32 bassins de stockage représentant un volume global de plus de 1 400 000 m³ (dont 1 communal et 2 interdépartementaux) (DEA93, 2015b). Enfin, la ville de Paris, en collaboration avec le SIAAP, s’est dotée d’ouvrages de stockage et de restitution des eaux de pluie sur le réseau unitaire : le bassin de Proudhon, le DO Blanqui et le DO Buffon qui représentent ensemble une capacité de 213 400 m³ sur la commune de Paris.

1.3.2. Le fonctionnement du réseau interdépartemental (Lotfi et al, 2016a)

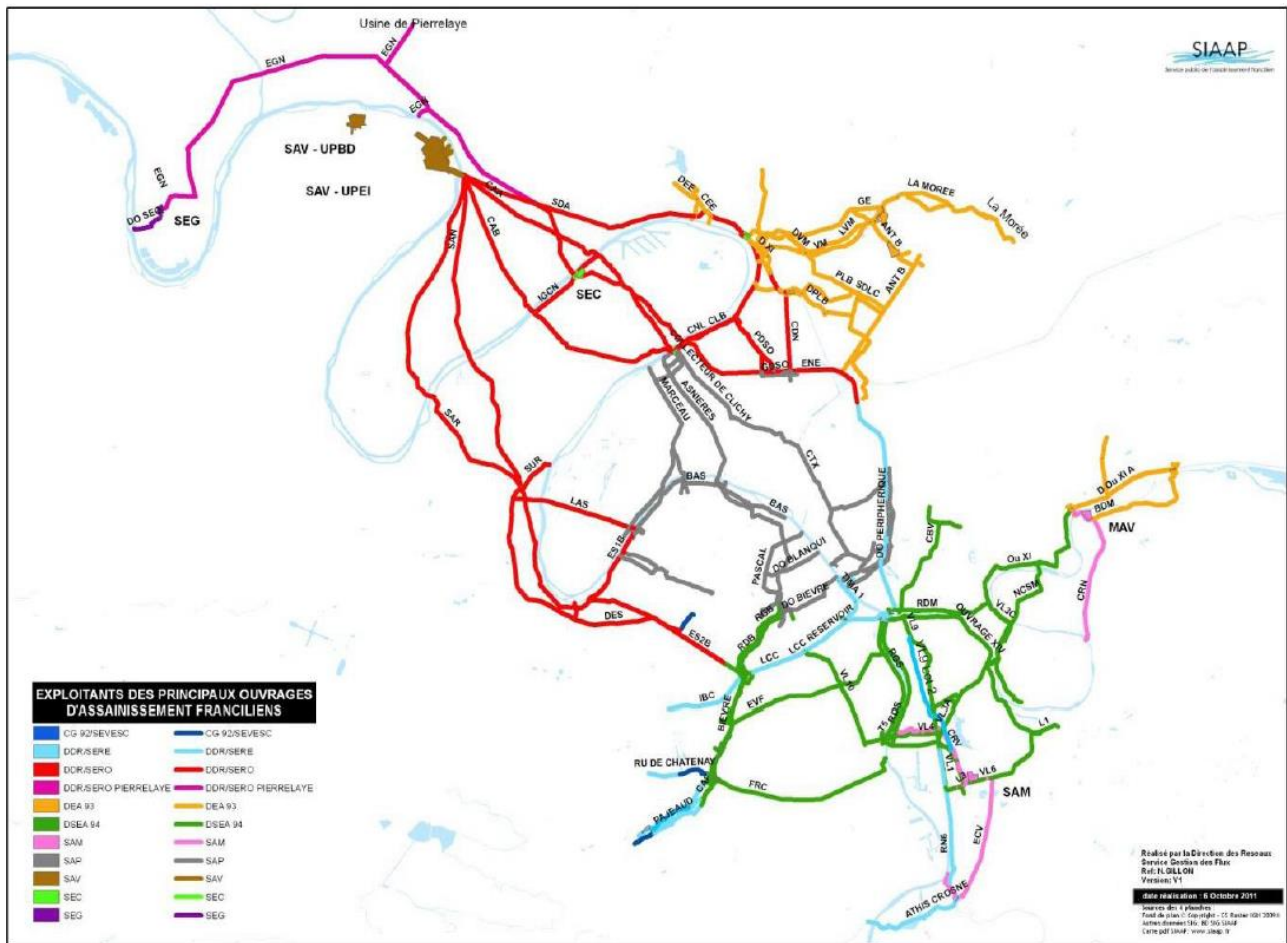


Figure 6 Classification par exploitant du réseau de transport du SIAAP (Tabuchi et Penouël, 2014)

Notre compréhension de ce réseau s’est largement appuyé sur le travail de Tabuchi et Penouël (2014), en plus de l’utilisation des données disponibles et des échanges avec les agents du SIAAP. Le réseau de transport est constitué de 436 km de collecteurs et d’émissaires pour transporter les eaux usées, dont il gère 218.5 km alors que le reste du linéaire est en cogestion avec les départements 75, 92, 93 et 94 (Figure 4 et Figure 6). Il est principalement constitué des cinq grands émissaires qui alimentent l’usine Seine aval (réseau nord-ouest) et du réseau sud-est qui alimente l’usine Seine amont (Tabuchi et Penouël, 2014).

L’une des particularités du réseau interdépartemental est l’existence de nombreux maillages permettant de délester les ouvrages, en cas de saturation ou de chômage, soit vers d’autres ouvrages soit vers le milieu naturel. Ainsi, il existe de nombreux intercepteurs sur le réseau, particulièrement sur la commune de Paris, qui permettent d’évacuer les eaux ou seulement une partie vers un autre collecteur sans pour autant

en changer l’exutoire. A contrario, il existe d’autres maillages, comme le puits de Cachan ou l’usine de Charenton, qui dévient les eaux vers une autre station de traitement des eaux usées en cas de besoins.

Aussi, étant donné la complexité du réseau et l’importance des volumes y transitant, des stations de gestion automatisées munies de vannes existent partout sur celui-ci. Elles permettent de répartir les débits entre les différents collecteurs et d’évacuer le flux excédant vers le milieu naturel afin de protéger les différents ouvrages (collecteurs, STEU, station de pompage...).

Le réseau nord-ouest

Celui-ci représente la zone de collecte aval et couvre la ville de Paris, les Hauts-de-Seine, une partie de la Seine-Saint-Denis et peut recevoir également une partie des eaux déviées depuis le Val-de-Marne (Figure 7).

Les deux rives parisiennes sont connectées tout au long de la Seine. Un volume important d’eaux usées traverse la Seine via des siphons depuis la rive gauche vers la rive droite parisienne (soit du sud vers le nord). L’usine de prétraitement de Clichy reçoit donc la majorité des effluents parisiens.

Puisque 4 des 5 principaux émissaires menant à Seine Aval (SAR, SAN, CAA, CAB) traversent le département des Hauts-de-Seine, le réseau départemental s’y connecte tout le long. Il dispose également de quelques exutoires vers les émissaires de la SAP : Marceau, Clichy, Asnières et ENE au droit des communes de Neuilly, Levallois et Clichy (une partie de ces effluents peut aller à Seine Centre également), ainsi que vers le DES2B, l’ES1B et l’ES2B.

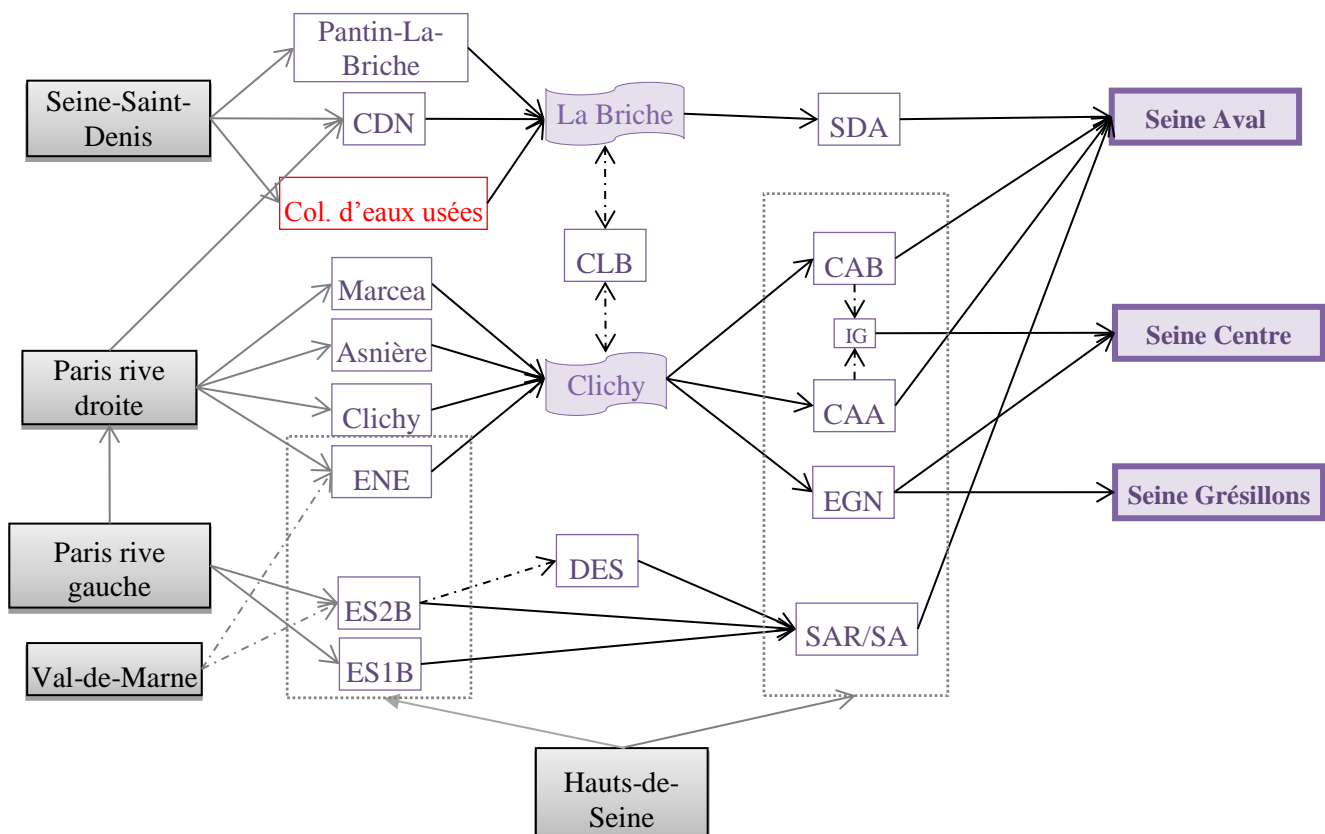


Figure 7 Schéma du fonctionnement du réseau interdépartemental nord-ouest. Le réseau unitaire est en mauve, le réseau d’eaux usées en rouge. Les bannières représentent des stations de prétraitement, les encadrés en gras représentent les stations de traitement des eaux usées et les flèches en tiret représentent des cheminements exceptionnels. Les encadrés simples indiquent les émissaires et collecteurs dont le nom abrégé peut être retrouvé sur la Figure 6.

Les effluents de Seine-Saint-Denis sont traités par 3 STEU : le nord-est par Seine-Morée, le sud-est par Marne-Aval et le centre, qui représente la majorité, par Seine Aval.

Les deux connexions du Val-de-Marne constituent les maillages les plus importants sur le réseau du SIAAP (au niveau du puits de Cachan avant l'ES2B et l'usine Charenton avant l'ENE), non seulement en raison des volumes importants y transitant mais également car les effluents changent d'exutoire final en étant traités dans Seine Aval au lieu de Seine Amont. Autrement, en configuration normale, l'ensemble des effluents du Val-de-Marne doit transiter par le réseau du sud.

Les usines de Clichy et la Briche assurent simultanément les fonctions d'usines de prétraitement, de stations de gestion et de déversoirs d'orage. L'usine de Clichy reçoit les eaux à partir des 4 collecteurs parisiens principaux, bien qu'elle dispose en réalité de 6 entrées recevant en plus les effluents des galeries des Chasses et de Neuilly aménagées à son amont, ainsi que des eaux de la Briche, via le CLB dans certains cas particuliers. Ces eaux sont dégrillées et dessablées avant d'être réparties entre les émissaires CAA, CAB et EGN. Un seuil et deux siphons permettent d'évacuer le trop plein vers la Seine. De même l'usine de la Briche reçoit les eaux usées de Seine-Saint-Denis et les évacue, après prétraitement, vers Seine Aval via le SDA. Il existe également un seuil au niveau de cette usine afin de déverser en cas de trop plein. Le CLB, pour Clichy-La Briche, est considéré à la fois comme un collecteur et un ouvrage de stockage (32000 m³). C'est en effet un collecteur, presque horizontal, dont le rôle principal est d'assurer le transfert entre les usines de prétraitement Clichy et La Briche dans les deux sens, mais peut aussi stocker les eaux en cas de saturation du réseau. Il nécessite toutefois un remplissage graduel et contrôlé afin d'éviter les coups de bélier. L'EGN reçoit une partie des effluents transitant par Clichy, en évacue généralement les 2/3 à Seine Centre et envoie le dernier tiers à Seine Grésillons. Il est à noter que les débits reçus par les différentes STEU sont précisés quotidiennement par celles-ci en fonction de leur capacité de traitement. Il en résulte donc que le débit évacué par l'EGN ainsi que sa répartition diffèrent chaque jour.

Les émissaires CAA et CAB sont tous deux munis de vannes automatisées, permettant de dévier, en cas de besoin, une partie des flux vers l'EGN ou alors d'envoyer les eaux vers la Seine.

En amont des collecteurs SAR et SAN, tout excédent peut être envoyé à la Seine grâce aux déversoirs d'orage placés également en entrée des collecteurs.

Le réseau sud

Il concerne essentiellement le Val-de-Marne, en plus de certains syndicats du sud. Le réseau historique sur cette zone a été réalisé de façon à converger vers Paris et donc Seine Aval (Achères). A la suite de la construction de Seine Amont, un nouveau réseau dénommé Valenton (VL), appartenant également au SIAAP, a été bâti afin de la desservir. Les points de connexions entre ces deux réseaux, superficiel (historique) et profond (VL), ont tous été réalisés comme des points de maillage (particulièrement les puits de Cachan et Charenton), qui permettent de protéger les ouvrages et de minimiser les déversements vers le milieu naturel en cas de chômage ou de saturation du réseau VL.

Depuis début 2006, les effluents du Val-de-Marne, ainsi que ceux des syndicats du sud raccordés sont donc acheminés préférentiellement vers Seine Amont via le réseau VL. Dans certains cas particuliers, les puits de maillage peuvent être fermés, les effluents sont alors envoyés vers Seine Aval à partir du réseau historique (*Figure 8*). De façon plus spécifique, il est possible de décrire le réseau du sud en deux parties : la vallée de la Bièvre et la vallée de la Seine.

La vallée de la Bièvre

La vallée de la Bièvre se distingue par la présence de nombreux réseaux :

- une rivière naturelle, avec un débit minimal de 1m³/s assuré par le SIAAP, a été restaurée à la demande du département du Val de Marne pour des besoins paysagers,
- un réseau pluvial avec deux conduites dont les fonctions sont d'assurer le transit des eaux pluviales dans la première et les eaux de la Bièvre canalisée dans la seconde,
- un réseau unitaire superficiel : celui-ci continue de recevoir les eaux des communes équipées d'un réseau unitaire et les envoie ponctuellement au réseau profond d'eaux usées,
- un réseau d'eaux usées profond afin de recevoir les eaux des communes équipées d'un réseau séparatif.

Enfin, une partie des effluents des communes de Crosne, Villeneuve-St-Georges et Choisy-le-Roi est drainée par le collecteur de la RN6 puis relevée par la station de pompage Berlioz et envoyée vers Seine Amont, ou alors les eaux sont pompées par les stations Pompadour et Closeaux jusqu'à l'usine de prétraitement d'Alfortville, qui les envoie à l'usine de Charenton.

Depuis 2014, les effluents transitant par l'usine de Charenton sont envoyés prioritairement vers le VL9 qui les envoie directement à Seine Amont, mais deux autres cheminements sont possibles pour ces effluents. Une première possibilité serait d'envoyer les eaux à Seine Amont via le complexe des Cormailles (Liaison Cachan-Charenton et puits des Cormailles), jusqu'au puits de Villejuif où elles seraient drainées par le VL10. La seconde serait d'envoyer les eaux vers la zone de collecte aval (Seine Aval, Seine Centre et Seine Grésillons) en les évacuant à travers l'ENE.

Finalement, Seine Amont traite également les effluents d'autres communes au sud, qui lui parviennent à travers le collecteur Athis-Crosne qui est à ce jour, le seul collecteur ne disposant pas de points de maillage avec le réseau VL. En cas de chômage de la station de pompage Crosne à l'amont de ce collecteur, les effluents sont envoyés vers le collecteur RN6.

1.3.3. Le réseau départemental des Hauts-de-Seine (Beauvais et al, 2017)

Le réseau départemental des Hauts-de-Seine est à hauteur de 67%, unitaire et donc à 33% séparatif. Ce dernier type de réseau est principalement situé dans le sud du département. Le réseau des Hauts-de-Seine est visitable à 63%. Le réseau départemental ne couvre pas tout le territoire du département. Ainsi la partie ouest et centrale du département est drainée par un réseau territorial géré par le syndicat mixte d'assainissement Hydreaulys. 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.

Comme la plupart des réseaux d'assainissement, le réseau départemental peut avoir une configuration tout à fait différente selon le régime de pluie et l'état initial du réseau.

Les eaux unitaires sont envoyées vers l'usine Seine Aval, via différents émissaires. La partie nord est drainée par les émissaires CAA, CAB, SAN et SAR. Dans la zone séparative, située au sud, les eaux usées sont envoyées vers Valenton, et les eaux pluviales sont délestées dans la Seine via le collecteur du réseau interdépartemental, le Fresnes-Choisy. 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 restitue vers l'égout profond. En cas de pluie très importante, les eaux de ruissellement 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.

1.3.4. Le réseau départemental de la Seine-Saint-Denis (Lotfi et al, 2016a)

Le département de la Seine-Saint-Denis est doté d'un réseau majoritairement unitaire, à l'exception des zones nouvellement urbanisées. Il est donc séparatif sur environ 1/3 du territoire au Sud-Est, au Nord-Est et sur une petite zone au nord-ouest (DEA93, 2015a). Les délimitations des bassins versants pluviaux avec le type de réseau les drainant (Morée Sausset et les bassins des deux rives de la Marne sont équipés d'un réseau séparatif) est visible sur la *Figure 9*. Le département est principalement relié à la STEU Seine Aval, sauf pour les deux zones séparatives situées de part et d'autre de la Marne, reliées à la STEU Marne Aval.

Le patrimoine de Seine-Saint-Denis comprend 700 kilomètres de réseau visible (**Erreur ! Source du envoi introuvable.** *Figure 15*, construite à partir des données disponibles sur le site OpenData du CD93, en 2016). Au moment de la rédaction de ce document, une réunion avec les services compétents de la Seine-Saint-Denis est en cours d'organisation). Près de 445 kilomètres des collecteurs sont visitables.

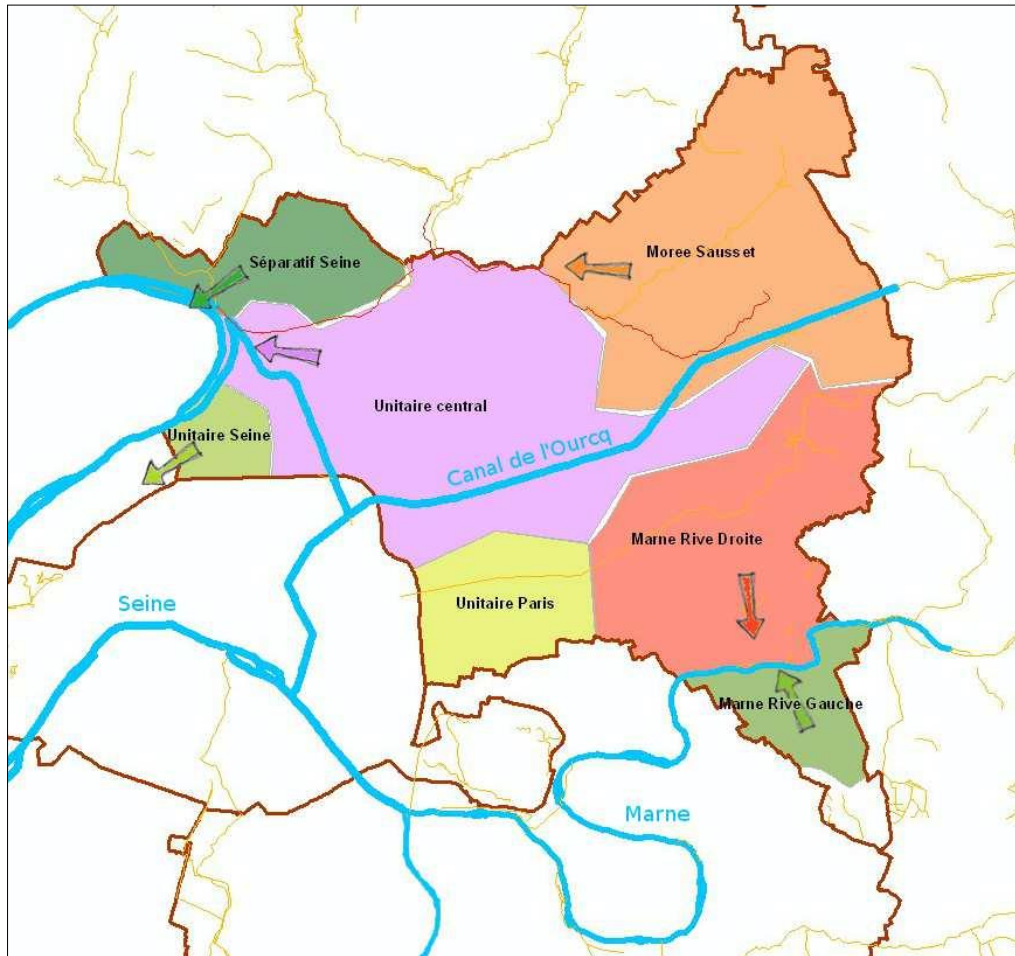


Figure 9 Bassins pluviaux du département Seine-Saint-Denis (DEA93, 2014a)

1.3.5. Le réseau départemental de la Ville de Paris

Le plus ancien réseau d’assainissement sur la zone d’étude est assurément celui de la ville de Paris. Sa conception débute dès 1856 avec la nomination de l’ingénieur Eugène Belgrand directeur des services des eaux et des égouts. Il construit alors un réseau qui collecte puis rejette les eaux ménagères et de ruissellement à l’aval de Paris au niveau de Clichy, mais l’extension et le développement continu de la ville obligent ensuite les gestionnaires à déployer le réseau jusqu’à Achères, où les eaux sont épandues sur des terrains achetés par la Ville et où se situe aujourd’hui la principale station d’épuration Seine Aval.

Le nouveau réseau parisien, d’une longueur de 2565 km dont 180 km d’émissaires et de grands collecteurs, a conservé sa structure et ses caractéristiques, on retrouve donc toujours un réseau unitaire essentiellement, à l’exception de la ZAC Rive gauche. Le réseau est principalement gravitaire à l’exception de certains quartiers dans les 12^{ème}, 13^{ème} et 16^{ème} arrondissements où des stations de pompages fonctionnent de manière permanente. Il est par ailleurs visitable à l’exception des réseaux des bois de Boulogne et Vincennes.

Les principaux collecteurs alimentant l’usine de prétraitement de Clichy (Collecteur Marceau, Collecteur d’Asnières, Collecteur de Clichy et l’émissaire Nord-Est) sont considérés comme étant d’intérêt interdépartemental et appartiennent toujours à la ville de Paris même s’ils apparaissent sur le réseau du SIAAP.

En plus de l’ensemble des ouvrages d’assainissement situés sur la commune de Paris, la Section de l’Assainissement de Paris gère (SAP, 1999) :

- les collecteurs Clichy, Asnières et Marceau entre la limite de Paris et l’entrée de l’usine de Clichy
- le collecteur du Nord jusqu’au siphon passant sous le canal St Denis, les vannes du déversoir étant gérés par la Direction de l’Eau et de l’Assainissement du Conseil Général de Seine St Denis,
- l’émissaire Nord-Est (ENE) entre Charenton et Clichy,

2 systèmes coexistent. Le réseau du Val de Marne à l'exception du réseau SIAAP comprend 195.7 km d'unitaire, 253.7 km d'eaux usées et 357.4 km d'eaux pluviales (DSEA, 2010). La DSEA gère aussi un certain nombre d'ouvrages d'assainissement de maîtrise d'ouvrage SIAAP correspondant à 100 km.

Toutes les données précédemment décrites, les documents (DSEA, 2010 ; DSEA, 2014), ainsi que l'aide de la DSEA, nous ont permis de comprendre le fonctionnement général du réseau d'assainissement du Val de Marne tel qu'il existait en 2014. Le réseau de collecte et de transport du département du Val de Marne a des caractéristiques qui engendrent un fonctionnement complexe : il est fortement maillé et régulé.

Si le département est responsable du transport d'effluents, collectés par les réseaux communaux, vers le réseau interdépartemental, comme les autres départements, dans certains cas, le réseau départemental peut directement collecter les eaux usées de maisons. Il existe dans le département du Val de Marne, d'autres types de réseaux : sur les 47 communes que compte le département, 7 communes (Valenton, Villeneuve-Saint-Georges, Marolles-en-Brie, Mandres-les-Roses, Perigny-sur-Yerres, Santeny, Villecresnes) gèrent leur assainissement au sein du Syndicat Intercommunal pour l'Assainissement de la Région de Saint Villeneuve Georges (SyAGE).

Le réseau géré par la DSEA a une longueur totale de 941 km, qui inclut l'unitaire, les eaux pluviales et les eaux usées. Sur ces 941 km, seulement 397 km sont visitables (DSEA, 2010).

Le réseau départemental présente les caractéristiques générales suivantes :

- une ossature convergeant vers Paris, réseau dit de surface (§1.3.2).
- De nombreux points de contact avec le milieu naturel (Seine, Marne, ainsi que les petits cours d'eau non domaniaux) : 109 points de rejets départementaux et 5 points de rejets interdépartementaux, ceci étant dû au réseau hydrographique particulièrement développé.
- Un réseau profond spécifique supplémentaire construit dans les années 1980-1990 (réseau «Valenton») qui intercepte et déleste les principaux ouvrages. Ce réseau achemine une partie des effluents du Val-de-Marne vers l'usine de traitement des eaux usées « Seine Amont » située à Valenton.

Ainsi, les apports d'eaux usées du Val de Marne peuvent être évacués soit vers l'usine de traitement des eaux usées Seine Amont située à Valenton, soit vers la zone de collecte aval (Seine Aval, Seine Centre et Seine Grésillons).

Plus précisément, les effluents collectés en rive droite de Seine sont drainés vers le réseau profond VL en temps sec et rejoignent l'usine Seine Amont via la station de pompage VL2. Par temps de pluie, les effluents sont répartis entre le réseau profond VL et le réseau de surface raccordé à l'usine de l'Île Martinet. Au niveau de cette usine, les effluents sont envoyés préférentiellement (depuis avril-mai 2006) vers Seine Amont (via le VL9 depuis juillet 2014 et SESAME). En cas de fortes pluies, les effluents sont envoyés vers Seine Aval via l'Emissaire Nord Est (ENE). Le réseau VL comprend 6 collecteurs principaux et une station de pompage. Pour les effluents collectés en rive gauche de Seine (réseau de surface), depuis début 2006, le réseau d'assainissement de la Vallée de la Bièvre est drainé préférentiellement vers Seine Amont à partir du nœud hydraulique de Cachan (via la LCC et le VL10). En cas de pluies exceptionnelles une partie des apports de la Vallée de la Bièvre est évacuée, par surverse, vers l'ES2B. En revanche, les eaux de la Bièvre sont évacuées vers l'ES2B (il existe une surverse possible vers le collecteur Bièvre aval, au droit du nœud Méricourt qui n'est sollicitée qu'en cas d'événements pluvieux intenses). Les apports du bassin versant unitaire de l'Emissaire de Villejuif (zone ouest du département) rejoignent l'usine de l'Île Martinet via le RGS (confluence Seine et Marne). Au droit de cette usine les effluents sont envoyés préférentiellement vers Seine Amont via le VL9, et, pour de fortes pluies, vers les autres usines via l'ENE. Les apports collectés à l'amont de la station RGS sont orientés préférentiellement vers Seine Amont via VL4, ou vers l'Île Martinet (via le RGS aval).

2. Reconstruction du réseau simplifié d'assainissement de la zone d'étude

Le modèle hydro-microclimatique TEB-Hydro représente les différents transferts d'eau et de chaleur (entre le sol, les surfaces et l'atmosphère) et les divers cheminements de l'eau (réseaux naturels et artificiels en surface et écoulements en souterrain) ainsi que leurs connexions. Il n'a pas pour objectif de gérer au quotidien l'exploitation du réseau d'assainissement, voire d'évaluer l'impact de certains aménagements du seul point de vue de l'assainissement.

S'il est possible de disposer d'une représentation satisfaisante et adaptée au modèle TEB-Hydro, du réseau naturel directement à partir de bases de données publiques (*i.e.* BD Carthage®, BDTOPPO® de l'IGN), ce n'est pas le cas pour les réseaux artificiels, beaucoup plus denses. La description des réseaux artificiels en format vectoriel adapté à la modélisation est pourtant très souvent disponible dans les banques de données urbaines. Cependant, elle présente généralement de nombreuses limitations liées notamment à l'exhaustivité et la précision des données. Ces données, n'ayant pas été acquises dans le but de représenter les écoulements, ne satisfont souvent pas les critères de connexion ou de direction des graphes orientés, nécessaires à la modélisation hydrologique.

Ainsi, il a été développé un outil de reconstruction des cheminements de l'eau en milieu urbain particulièrement adapté aux modèles maillés (Allard, 2015). Celui-ci permet de décrire, à partir de données simples et généralement disponibles et fiables, les réseaux hydrographiques artificiels, d'une manière simplifiée et fonctionnelle. En plus de reconstituer les écoulements en milieu urbain de façon homogène, il permet de s'adapter à la résolution spatiale du modèle hydrologique (basé sur une grille à mailles régulières). Cet outil de reconstruction a pour seul but de fournir un réseau hydrographique adapté aux modèles hydrologiques urbains dont la résolution spatiale est plus faible que la densité du réseau d'assainissement réel. Dans le but de construire un modèle hydrologique du territoire délimité par Paris et sa petite couronne, à l'aide du modèle TEB-Hydro, l'outil de reconstruction du réseau a été modifié et adapté aux particularités de cette région.

Compte-tenu de la compréhension du fonctionnement du réseau à l'échelle de la zone étudiée ainsi que des évolutions du réseau, Lotfi et al (2016a) ont alors décidé, en lien avec les agents du SIAAP, de simuler dans un premier temps l'année 2014. Avant la description des données d'entrée et de leur format, les différentes étapes de reconstruction des cheminements de l'eau sont présentés succinctement dans une première partie (Pour plus de détails, lire Lotfi et al, 2016b). Ensuite, les résultats du réseau reconstruit sont présentés et discutés.

2.1. L'outil de reconstruction TOHR (Lotfi et al, 2016b)

L'outil a donc pour but de fournir au modèle hydrologique TEB-Hydro un graphe orienté du réseau hydrographique complet comprenant le réseau d'assainissement (séparatif et unitaires) et le réseau hydrographique naturel en prenant en compte leurs connexions. Pour s'adapter à la résolution du modèle hydrologique, l'outil TOHR s'appuie sur la grille maillée du modèle hydrologique. Le graphe orienté est construit à partir d'un jeu de nœuds, associés à une maille de la grille, connectés entre eux selon la pente à l'aide d'arcs. Dans la suite, nous appellerons ce graphe orienté construit avec TOHR le réseau reconstruit.

2.1.1. Les grandes étapes de reconstruction et simplification du réseau

Dans une première étape de pré-traitement des fichiers d'entrée, la zone à traiter est sélectionnée en ne considérant que les zones artificialisées (les seules à être équipées d'un réseau d'assainissement) : les forêts, les zones agricoles et les surfaces d'eaux sont exclues).

La seconde étape de la reconstruction consiste à choisir des nœuds constitutifs du réseau reconstruit. Chaque maille de la grille de la zone sélectionnée, se verra dotée d'un exutoire des eaux de pluies et/ou des eaux usées, selon le type de réseau présent. Mais compte-tenu des particularités du territoire étudié, avec de nombreuses zones mixte (unitaire/séparatif) nous avons identifié les différents cas possibles (*Figure 11*) et empêché qu'une même maille ne soit drainée par deux types de réseau : un nœud unitaire ne peut se trouver dans la même maille qu'un nœud d'eaux usées ou un nœud d'eau pluviale. Ceci est dû au fait qu'un sein d'une même maille il ne serait pas possible de partager les eaux pluviales reçues (ruisselant sur les surfaces imperméabilisées) entre le réseau unitaire ou pluviale la traversant. Ainsi, définir l'ordre de sélection des nœuds revient à favoriser le réseau séparatif ou le réseau unitaire. Précisons que dans cette étude, il a été fait le choix de commencer par - et donc de favoriser - le réseau unitaire. Ce choix est critiquable et selon la zone étudiée il peut s'avérer judicieux ou non. Le réseau unitaire est prépondérant globalement sur

l'ensemble du territoire étudié. Privilégier l'eau pluviale et donc le séparatif, qui est pourtant le réseau aujourd'hui privilégié dans la gestion au quotidien, rendait finalement la connexion des nœuds par endroits difficile. Et parfois cela nous amenait à un cheminement des eaux non réaliste.

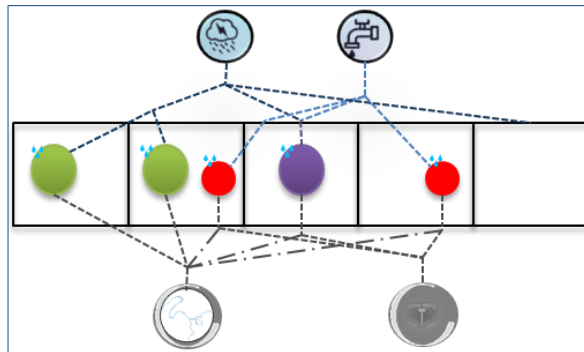


Figure 11 Schéma présentant les cas possibles de nœuds par maille, avec le type d'effluent et l'exutoire possibles. Les disques verts symbolisent le réseau d'eau pluviale, les rouges le réseau d'eaux usées et le disque violet le réseau unitaire. En entrée (en haut), les symboles représentent l'eau de pluie (à gauche) et l'eau potable (à droite) et en sortie (en bas), le milieu naturel (à gauche) et les STEU (à droite). Les traits tiret-point indiquent les écoulements via les déversoirs d'orage.

La sélection des nœuds du réseau est faite à partir de la couche regards fournie par les gestionnaires. Un regard est sélectionné au sein d'une maille en sélectionnant celui qui est le plus bas. Cette information sur l'altitude est rarement disponible ou robuste. C'est pourquoi, en cas d'absence de données de qualité associée aux regards et selon la façon dont le réseau a été pensé, la topographie naturelle peut être utilisée (à condition d'être en présence d'un réseau largement gravitaire), sinon l'altitude attribuée aux conduites du réseau peut être associée aux regards. Ainsi, pour chaque maille, le regard du réseau d'eaux pluviales (s'il existe) avec la plus basse altitude, sera l'exutoire des eaux de pluie sur cette maille. Ensuite, sur les mailles non pourvues de regard EP, le regard du réseau unitaire (s'il existe) avec la plus basse altitude est sélectionné. Sur les mailles non pourvues d'un réseau unitaire, on sélectionne de la même façon un regard du réseau d'eaux usées. Ce jeu de regards ainsi sélectionnés constitue les nœuds de l'arborescence.

Dans l'étape suivante, en parallèle de la connexion des nœuds entre eux, selon la pente, les ouvrages spéciaux (stations de relevage, déversoirs d'orage et STEU) sont sélectionnés. En amont, la station de relevage doit être connectée au regard appartenant à la même maille, puisqu'à priori c'est dans l'environnement immédiat de la station que les eaux se retrouvent en basse altitude et nécessitent d'être remontées. En aval, la connexion doit satisfaire deux conditions : la distance au regard suivant, et donc la longueur de l'arc de connexion, doit être inférieure à 3 fois la résolution de la grille, la pente de l'arc doit être négative, afin de remonter les eaux. Si ces conditions ne sont pas satisfaites, la station de relevage est supprimée. En amont, la connexion des déversoirs d'orage se fait de la même façon que pour les stations de relèvement : chaque déversoir est relié au regard inclus dans la même maille que lui. Cependant, étant donné les renseignements dont on dispose habituellement, il est rare de voir indiqués les déversoirs d'orage en tant que tels. Ce sont les points de déversements dans le milieu naturel qui sont le plus souvent indiqués sur les rapports comme sur les cartes. L'échange avec les collectivités est donc primordial. En aval, le déversoir d'orage est connecté au cours d'eau le plus proche ou à un tronçon du réseau d'eaux pluviales selon les conclusions apportées par l'étude du réseau réel réalisée avant la reconstruction. Enfin, les emplacements géographiques des STEU sont renseignés sans tenir compte des altitudes de celles-ci puisqu'on considère que quelle que soit la configuration du réseau d'assainissement, les STEU constituent les exutoires finaux et donc les points finaux de l'arborescence (les déversoirs d'orage mis à part).

Les arcs du réseau, reliant les nœuds entre eux, sont des lignes orientées, en lien avec la pente entre le nœud initial et le nœud final. La connexion des nœuds des différents réseaux est faite selon les règles suivantes : i) les connexions des réseaux d'eaux usées et unitaire sont créées simultanément, ii) chaque nœud peut avoir plusieurs connexions amont mais une seule connexion avale, iii) les arcs de connexion doivent avoir une pente positive, iv) la longueur d'un arc de connexion ne peut dépasser 3 fois la résolution du maillage. Lorsque dans certains cas particuliers et minoritaires, il n'est pas possible de satisfaire ces conditions, on connecte au regard le plus proche.

La connexion des nœuds du réseau d'eaux pluviales a la même logique, mais est plus simple : i) chaque nœud peut avoir plusieurs connexions amont mais une seule connexion aval, ii) les arcs doivent avoir une pente positive, iii) la longueur d'un arc ne peut dépasser 2 fois la distance séparant le cours d'eau du nœud à connecter.

A l'issue de la reconstruction du réseau d'assainissement, nous obtenons un graphe orienté tenant compte des différents types de réseaux hydrographiques naturels et artificiels et de leurs connexions. Cependant, cela ne garantit pas la connexion de toutes les unités de collecte sur la zone et donc de toutes les mailles de la grille d'étude. Le transfert des eaux depuis ces mailles est calculé selon la plus grande pente avec les 8 mailles alentours jusqu'à atteindre une maille dotée d'un exutoire des eaux pluviales (ce qui peut donc être un regard unitaire, un regard d'eaux pluviales ou un cours d'eau naturel).

A la suite de ce traitement, toutes les mailles disposent d'un exutoire des eaux pluviales, soit vers un nœud qu'elles contiendraient ou vers une maille adjacente et se trouvent être « connectées » au réseau d'eaux pluviales. En revanche, la connexion « eau usée » ne se fait que si la maille contient un nœud du réseau unitaire ou du réseau d'eaux usées.

La chaîne de transport des effluents sur la zone étudiée est particulière (communal, départemental puis interdépartemental). Dans le cadre de cette représentation, nous avons choisi de nous affranchir du réseau communal, le réseau départemental étant assez dense pour couvrir presque toute la zone. Toutefois, il a fallu prendre en considération cette chaîne de transport à travers la hiérarchisation des réseaux et s'assurer que le réseau départemental transfère les effluents vers le réseau interdépartemental, mais que le cas inverse ne peut se produire.

Une des particularités du réseau de Paris et sa petite couronne est l'existence de très nombreux maillages. On signifie par maillage un point du réseau d'assainissement où il est possible d'avoir deux destinations avales des effluents modifiant ainsi l'exutoire final des eaux, en particulier des eaux usées. Ainsi, dans le cadre du programme PIREN-Seine, l'outil a été modifié afin d'intégrer cette possibilité. En certains points particuliers, déterminés grâce à l'étude du réseau et des entretiens avec les exploitants, il est possible de définir deux conduites avales et de poser une condition limite de débit au-delà duquel soit l'exutoire est modifié soit le débit est partagé entre les deux exutoires indiqués.

2.2. La projection du réseau reconstruit sur la grille

Cette ultime étape de l'outil TOHR consiste à associer à chaque maille de la grille :

- le type de réseau qui la traverse (unitaire ou pluviale et/ou eaux usées),
- l'exutoire direct auquel elle est associée par type d'écoulement (unitaire ou séparatif (eau pluviale et eaux usées) ou versant, en rivière et sous-terrain),
- la distance à cet exutoire pour chaque type d'écoulement,
- l'exutoire aval éventuel de chaque exutoire et la distance qui les sépare en réseau (unitaire/eaux usées ou eau pluviale, en rivière).

Les exutoires sont à choisir par l'utilisateur. Les DO et nœuds d'entrée des maillages sont d'office ajoutés à la liste d'exutoires. Les chemins d'écoulement en versant (par ruissellement de surface) sont déterminés à l'aide de la méthode D8, basée sur la topographie. Ils sont nécessaires pour connecter les mailles non drainées par un réseau d'assainissement à ce réseau d'assainissement ou au réseau hydrographique naturel selon la configuration. Les fichiers nécessaires à TEB-Hydro sont ainsi créés.

2.3. Les données disponibles et la méthodologie

2.3.1. Les données d'occupation du sol

La base de données utilisée est le Mode d'Occupation du Sol 2012 (MOS2012)¹ qui « est l'atlas cartographique numérique de l'occupation du sol de l'Ile-de-France »¹. Cette base de données est régulièrement mise à jour depuis 1982. Collectées à partir de photos aériennes, les données sont d'une résolution de 25m, disponible sur internet en utilisation libre et détaillée en 11 postes.

¹ <http://www.iau-idf.fr/liou-et-vous/cartes-donnees/mode-doccupation-du-sol-mos.html>

2.3.2. Les données altimétriques

La représentation des cheminements des eaux nécessite la prise en compte du relief, d'une part parce que les écoulements en surface suivent le chemin de la plus grande pente, mais aussi dans le but de compléter les données concernant le réseau d'assainissement en cas d'absence de celles-ci. Le modèle numérique de terrain (MNT) utilisé est issu de la BD ALTI² de l'IGN. Le MNT utilisé pour la reconstruction est de 25m de résolution.

2.3.3. Le réseau hydrographique naturel

L'outil de reconstruction intègre les cours d'eaux naturels qui sont indissociables du réseau artificiel, puisqu'ils constituent l'exutoire préférentiel des eaux pluviales et les premiers points de rejet en cas de problèmes ou de saturation du réseau. Dans le cadre de ce projet, la base de données BD Carthage³ de l'IGN a été utilisée. Celle-ci représente la référence du réseau hydrographique naturel pour l'ensemble du territoire français. Il s'agit de données vectorielles sous forme de tronçons représentant les principaux cours d'eau.

2.3.4. Les données descriptives du réseau d'assainissement

Il est nécessaire de disposer de données descriptives du réseau d'assainissement afin d'initialiser le processus de reconstruction. Ces données, basées sur celles déjà indiquées (§1.2.4) ont été pré-traitées car elles sont plus ou moins robustes. Ces données sont généralement disponibles auprès des exploitants du réseau d'assainissement.

2.3.5. Méthodologie

Afin de reconstruire le réseau hydrographique complet de toute la zone qui couvre un domaine très grand au regard de la densité des réseaux départementaux et compte-tenu de la quantité de données à traiter, il a été décidé de reconstruire le réseau hydrographique à l'échelle de chaque département, puis de les réunir ensuite. Ainsi, la première étape a été de reconstruire le réseau interdépartemental, en lien avec les agents du SIAAP, auquel tous les réseaux départementaux se connectent. Ensuite, chaque réseau départemental, en lien avec les agents de la plupart des départements étudiés, a été reconstruit et connecté au réseau interdépartemental reconstruit. Dans une dernière étape la projection du réseau reconstruit de toute la zone est projetée sur la grille du modèle TEB-Hydro.

L'évaluation de la reconstruction peut être faite de différentes façons. La plus simple et la plus rapide est une comparaison visuelle entre le réseau reconstruit et le réseau initial. Cependant, comme le réseau reconstruit est simplifié (car moins dense), l'évaluation n'est pas si facile puisque les deux réseaux ne peuvent être identiques même dans le meilleur des cas. Etant donné que le réseau reconstruit a pour vocation d'alimenter un modèle hydrologique, sa fonction est plus importante que sa forme. Un réseau hydrographique reconstruit assurera d'autant plus la même fonction que le réseau réel, s'il draine la même surface (en quantité et en forme). Lorsque cette donnée était disponible, nous avons essayé de comparer les aires drainées (pluviale, unitaire ou eaux usées), même si cette information, selon les gestionnaires, peut être peu précise.

2.4. Résultats

2.4.1. Le réseau interdépartemental (Lotfi et al, 2016b)

Le réseau reconstruit, est très bien représenté comme le montre la comparaison visuelle des représentations réelles et reconstruites (*Figure 12*). En effet, le réseau interdépartemental a une densité tout-à-fait cohérente avec une grille de résolution de 250 m. Certaines simplifications ont été introduites, notamment en zones de réseau dense à l'amont de la station d'épuration Seine Amont (1) par exemple, ou lorsque les différents types de réseau (unitaire, pluvial et d'eaux usées) coexistent en parallèle comme au niveau de la vallée de la Bièvre (2), ce qui était parfaitement attendu en vue de la modélisation hydrologique prévue. Le réseau d'assainissement obtenu semble tout-à-fait fonctionnel. Les exutoires des tronçons demeurent à priori inchangés et ce, malgré certaines modifications au niveau des cheminements des effluents (3) qui pourraient

² <http://professionnels.ign.fr/bdalti>

³ <http://professionnels.ign.fr/bdcarthage>

toutefois affecter les distances parcourues par les eaux vers leurs exutoires. L'absence notable des stations de relèvement Sésame et VL2 qui ont pour rôle de relever les eaux vers Seine Amont, est dû en particulier à l'absence d'altitude des stations d'épuration lors des calculs des connexions, celles-ci étant considérées par défaut comme les points les plus bas du réseau. Les conduites menant les effluents vers les stations d'épuration Seine Centre et Seine Grésillons ont été volontairement supprimées, car en l'absence des dites stations, les regards de ces conduites perturbaient la reconstruction du réseau en générant des connexions inexistantes en réalité.

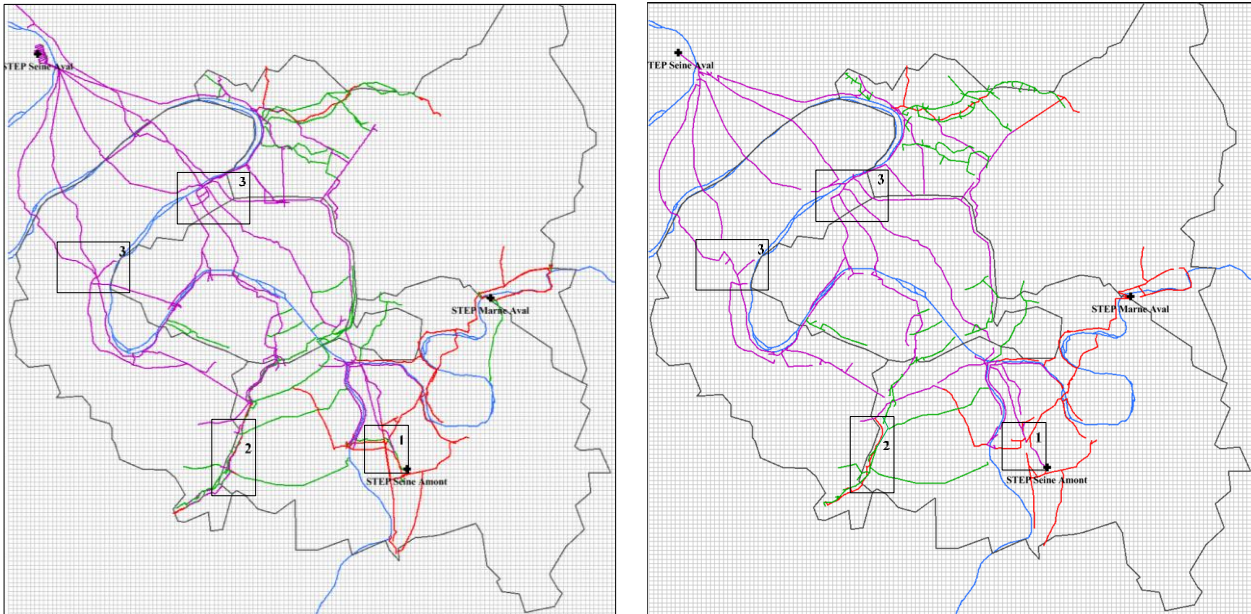


Figure 12 Réseau interdépartemental réel (à gauche) et reconstruit (à droite). Le réseau unitaire est représenté en mauve, le réseau d'eaux usées en rouge et le réseau pluvial en vert. Le symbole ■ représente les stations de traitement des eaux usées. Les encadrés chiffrés permettent de cibler les différences entre les réseaux.

2.4.2. Le réseau départemental des Hauts-de-Seine (Beauvais et al, 2017)

L'analyse des données, fournies par le CD92, nous a conduit à reconsidérer dans la partie sud le réseau séparatif pluvial. En effet, le Ru du Blagis, réseau d'eaux pluviales, est envoyé vers le réseau profond du Val de Marne, donc finalement vers la STEU Valenton. Or, il n'est pas possible de connecter du réseau EP sur de l'unitaire, dans TOHR ni dans TEB-Hydro. Donc afin de collecter les eaux pluviales de la zone, il a été nécessaire de convertir le réseau d'eau pluviale en unitaire. Par conséquent, le réseau d'eaux usées n'est plus visible non plus. Par ailleurs, tous les tronçons issus d'un déversoir d'orage et conduisant les écoulements vers le milieu naturel sont identifiés comme eau pluviale dans la base de données du CD92. Dans notre cas, ces tronçons sont considérés comme le réseau initial soit unitaires (zone nord-ouest du département).

Concernant les déversoirs d'orage (DO) dans le département, 115 points nous ont été fournis (annexe XVII). 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. 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 infime partie des déversements sur une année.

Pour les stations de relevage, 38 stations de pompage nous ont été indiquées. L'outil a finalement conservé 10 stations pour la reconstruction. Le réseau reconstruit est comme attendu moins dense que le réseau réel. De plus n'étant pas maillé, la comparaison visuelle n'est donc pas aisée (Figure 13).

La projection du réseau reconstruit sur la grille permet de représenter les aires drainées par les réseaux, à l'endroit de points du réseau définis par l'utilisateur. Les exutoires des zones de collecte fournies par le CD92 ont donc été utilisés, pour permettre la comparaison (Figure 14).

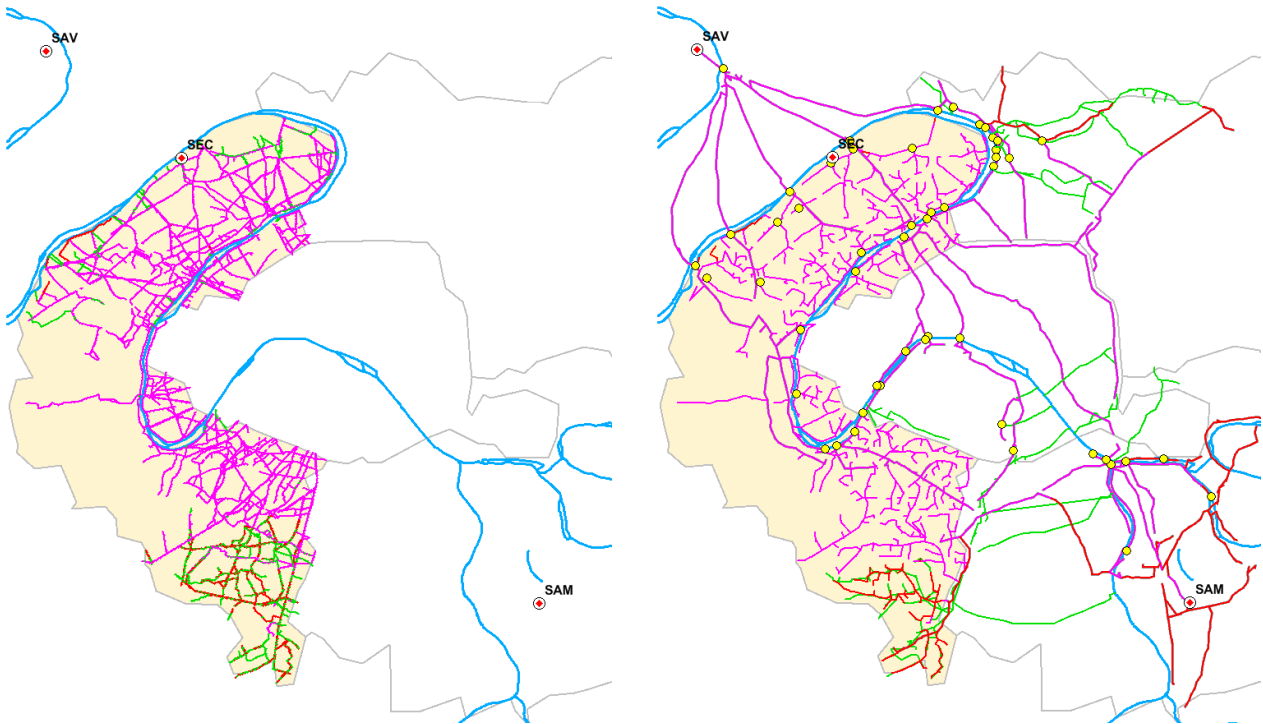


Figure 13 Réseau départemental des Hauts de Seine réel (à gauche) et reconstruit (à droite). Sur le réseau reconstruit, le réseau départemental est connecté au réseau interdépartemental (trait plus épais). Les couleurs sont les mêmes que pour la Figure 12. Les déversoirs d'orage retenus pour la reconstruction (interdépartementaux et départementaux) sont représentés (ronds jaunes).

De manière générale, on observe que la reconstruction a tendance à surestimer les surfaces drainées. La zone SAN1 est très largement surestimée. 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, à cet endroit, les eaux pluviales ne sont pas drainées par les réseaux d'assainissement du département, mais par le réseau géré par Hydreaulys et sont rejetés directement en Seine. 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 minimisé les surfaces drainées par le réseau d'assainissement séparatif. En effet, 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 non représenté ici. Pour la modélisation, ceci n'aura pas d'impact, puisque seuls les écoulements dans les réseaux unitaires et d'eau pluviale sont représentés. Un certain nombre de bassins sont aussi bien reconstruits (SUR7, BLR, SAN2).

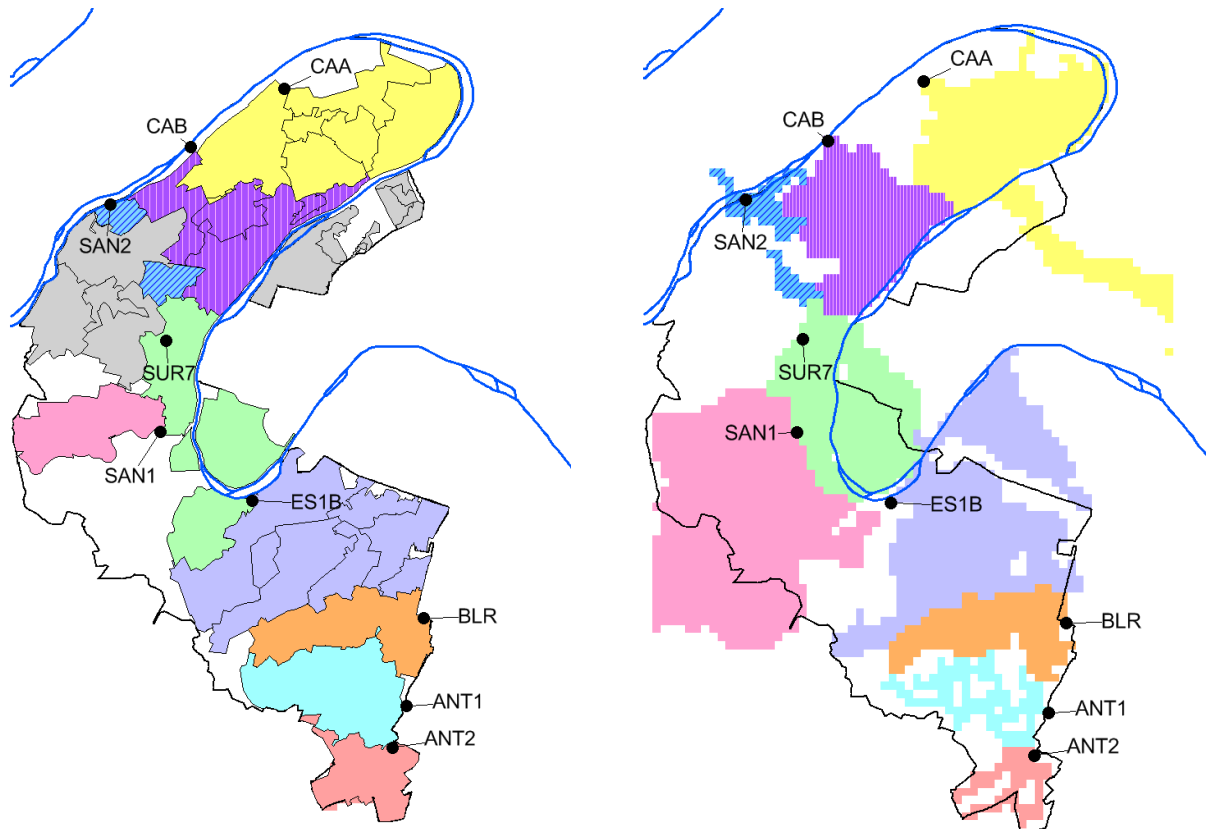


Figure 14 Zones de collecte d'eaux usées fournies par le département des Hauts-de-Seine (à gauche) et des bassins versant eaux usées reconstruits (à droite).

2.4.3. Le réseau départemental de la Seine-Saint-Denis (Lotfi et al, 2016b)

Le premier point sensible de la reconstruction du réseau d'assainissement du CD93 est l'absence du canal de l'Ourcq sur le réseau hydrographique que nous utilisons. Ceci conduit à des connexions d'eau pluviale nord-sud sur la partie ouest du département inexistantes dans la réalité (Figure 15). Par ailleurs, à la frontière entre le réseau unitaire et le réseau séparatif, les réseaux d'eau pluviale et unitaire coexistent. Comme déjà expliqué, nous avons choisi de privilégier le réseau unitaire. Cela explique l'absence de certains tronçons d'eau pluviale dans les zones centrales et nord-ouest du département. En revanche, sur la partie nord-est dotée d'un réseau séparatif, donc moins maillé que le réseau unitaire, la comparaison semble plus facile et les résultats sont encourageants. Malgré quelques connexions qui n'ont pas lieu d'être (EP au nord-est et au nord), les deux réseaux sont proches visuellement. Cette reconstruction, qui n'a pas encore été discutée et corrigée par les agents du CD93, au moment de la rédaction de ce rapport, doit être améliorée, avec l'aide de données plus à jour, fournies très prochainement par le département.

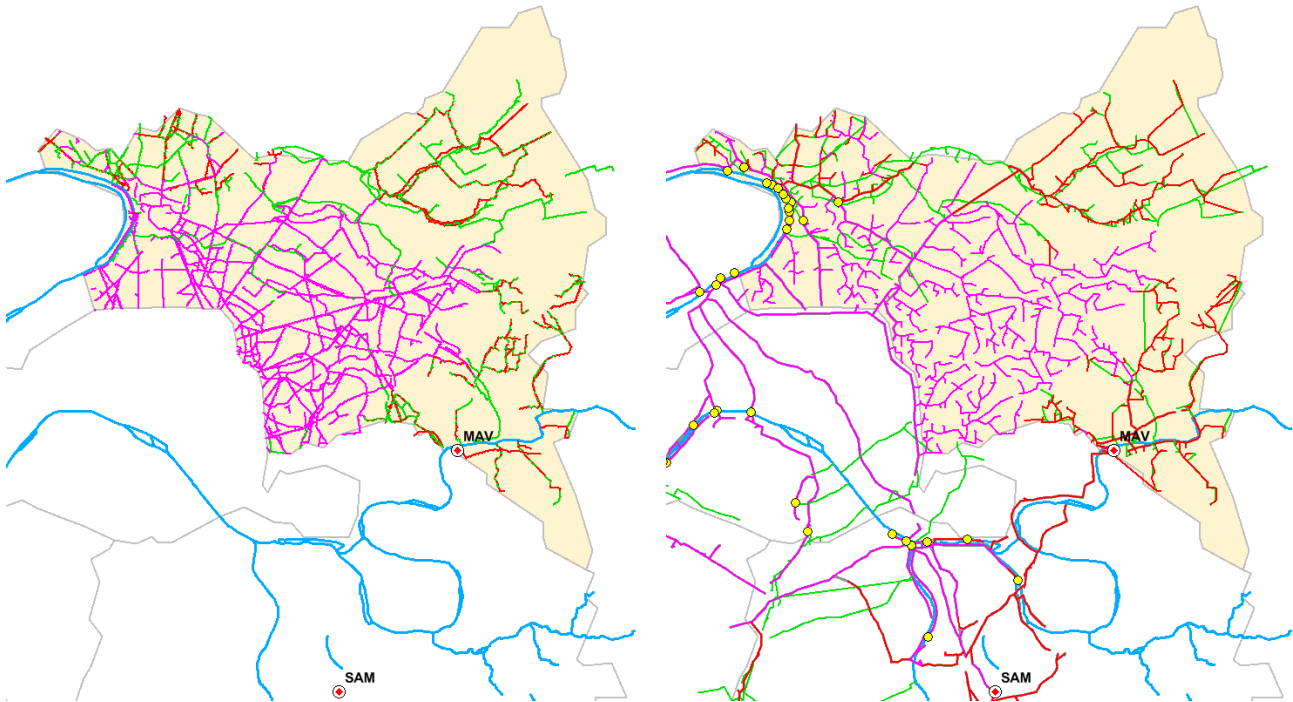


Figure 15 Réseau départemental de Seine-Saint-Denis réel (à gauche) et reconstruit (à droite). Sur le réseau reconstruit, le réseau départemental est connecté au réseau interdépartemental (trait plus épais). Les couleurs sont les mêmes que pour la Figure 12. Les déversoirs d'orage retenus pour la reconstruction (interdépartementaux et départementaux) sont représentés (ronds jaunes).

2.4.4. Le réseau départemental de la Ville de Paris

La Ville de Paris nous a fourni deux jeux de données différents. Celui à l'échelle communale (Figure 16) et un réseau structurant avec seulement les principales canalisations. Ce deuxième jeu de données était finalement moins dense que les jeux de données des autres départements. Nous avons donc préféré travailler avec le réseau communal, afin de bien comprendre son fonctionnement et de le reconstruire au mieux. Cependant la comparaison visuelle en est d'autant plus difficile.

La Ville de Paris nous a fourni les zones de collecte définies en différents points du réseau. Ces bassins ont été agrégés afin de limiter le nombre d'exutoires. En effet, le modèle hydrologique TEB-Hydro n'a pas vocation à simuler de petits bassins versants, compte-tenu de la résolution choisie (250m, cf. §1.2.2). La comparaison des zones de collecte définies à partir des réseaux réel et reconstruit est présentée Figure 17. Les résultats sont de qualité variable selon les zones. En effet, certaines sont fortement sous-estimées (309 a une surface de 6.8km² au lieu de 10.5km² ; 119 3.9km² au lieu de 5.8 km² ; 219 Amont 4.1km² au lieu de 6.8 km²) alors que d'autres sont surestimés (Maillage LAS 8.2km² au lieu de 3.6 km² ; 217 5.9km² au lieu de 2.2 km² ; 219 Aval 2.7 km² au lieu de 1.1 km²). Mais certaines zones sont bien reconstruites (114 5.8km² /5.7km²; 215 3.7km²/3.4km²). On peut noter que les plus grandes difficultés sont sur la partie ouest de Paris, rive droite de la Seine. Après analyse des résultats, deux hypothèses peuvent expliquer ces résultats médiocres. Soit les altitudes des regards dans cette zone sont peu réalistes et difficiles à corriger manuellement car trop nombreuses, soit il nous manque des données en terme de station de relevage pour permettre une connexion des regards à contre-pente. Un travail supplémentaire sur la reconstruction du réseau de la Ville de Paris serait donc nécessaire.

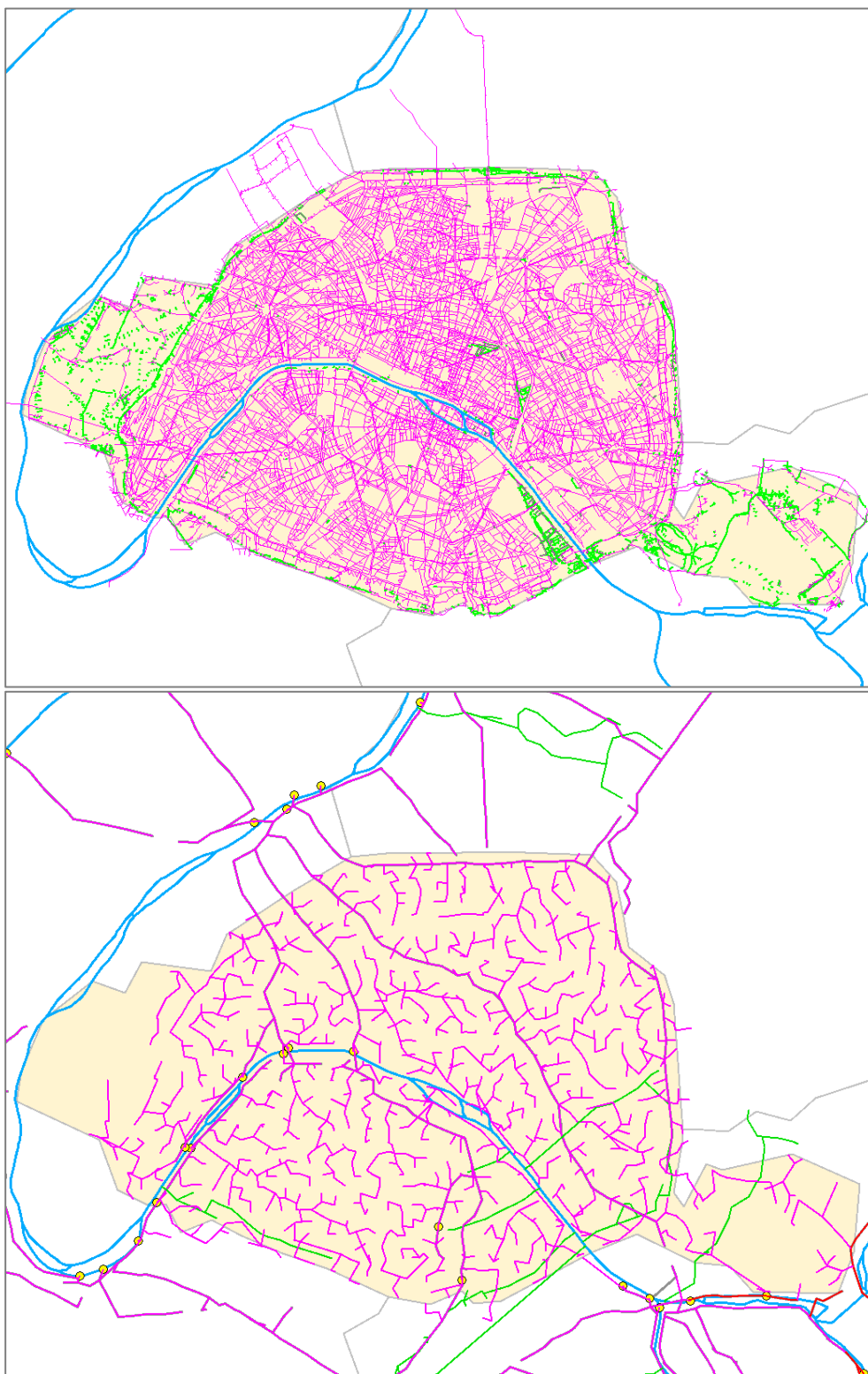


Figure 16 Réseau communal de la Ville de Paris réel (en haut) et reconstruit (en bas). Sur le réseau reconstruit, le réseau départemental est connecté au réseau interdépartemental (trait plus épais). Les couleurs sont les mêmes que pour la Figure 12. Les déversoirs d'orage retenus pour la reconstruction (interdépartementaux et départementaux) sont représentés (ronds jaunes).

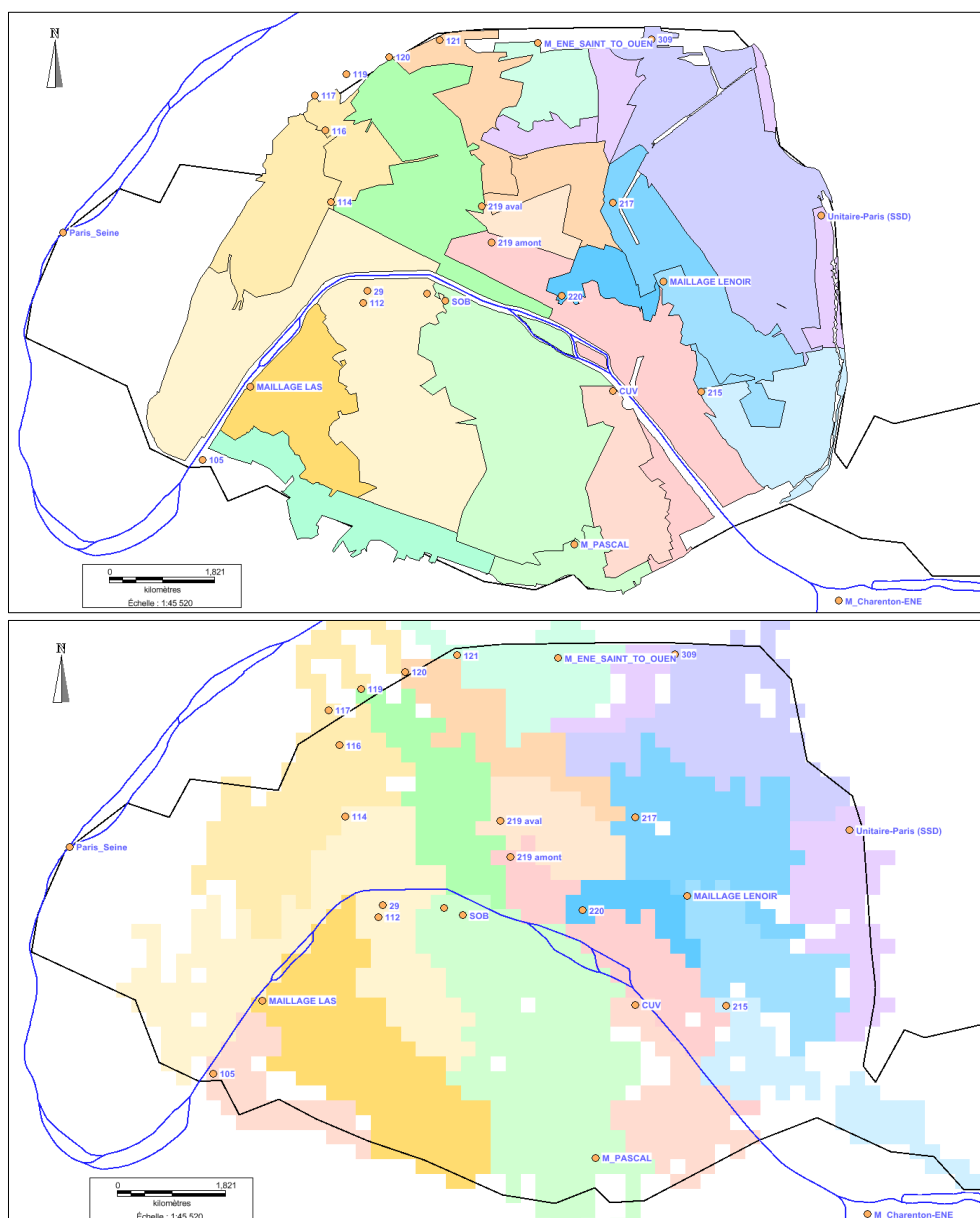


Figure 17 Zones de collecte définies à partir de 18 points (ronds orange) pour les réseaux réel (en haut) et reconstruit (en bas).

2.4.5. Le réseau départemental du Val de Marne

De même que pour l'étude du département des Hauts-de-Seine, une analyse des données fournies par le CD94 en lien avec des échanges nombreux par téléphone ainsi qu'en présentiel avec la DSEA94 nous a conduit à convertir une canalisation initialement identifiée comme eaux pluviales en unitaire. Celle-ci se trouve sur la rive droite de la Marne, dans la boucle, au centre du département.

L'évaluation visuelle de la reconstruction du réseau du Val de Marne est à nouveau moins aisée pour le réseau unitaire que pour le réseau séparatif, car plus maillé (Figure 18). Cependant, au-delà de cet aspect que nous ne pouvons pas retrouver, la reconstruction du réseau unitaire semble assez réaliste : peu de tronçons inappropriés sont visibles, à part au niveau de la confluence entre la Marne et la Seine. Pour le réseau d'eaux usées, la reconstruction semble prometteuse. Pour le réseau d'eaux pluviales aussi, malgré quelques différences rives droite et gauche de la Seine au centre du département, ainsi que la zone de la Bièvre où la configuration du réseau réel est assez complexe.

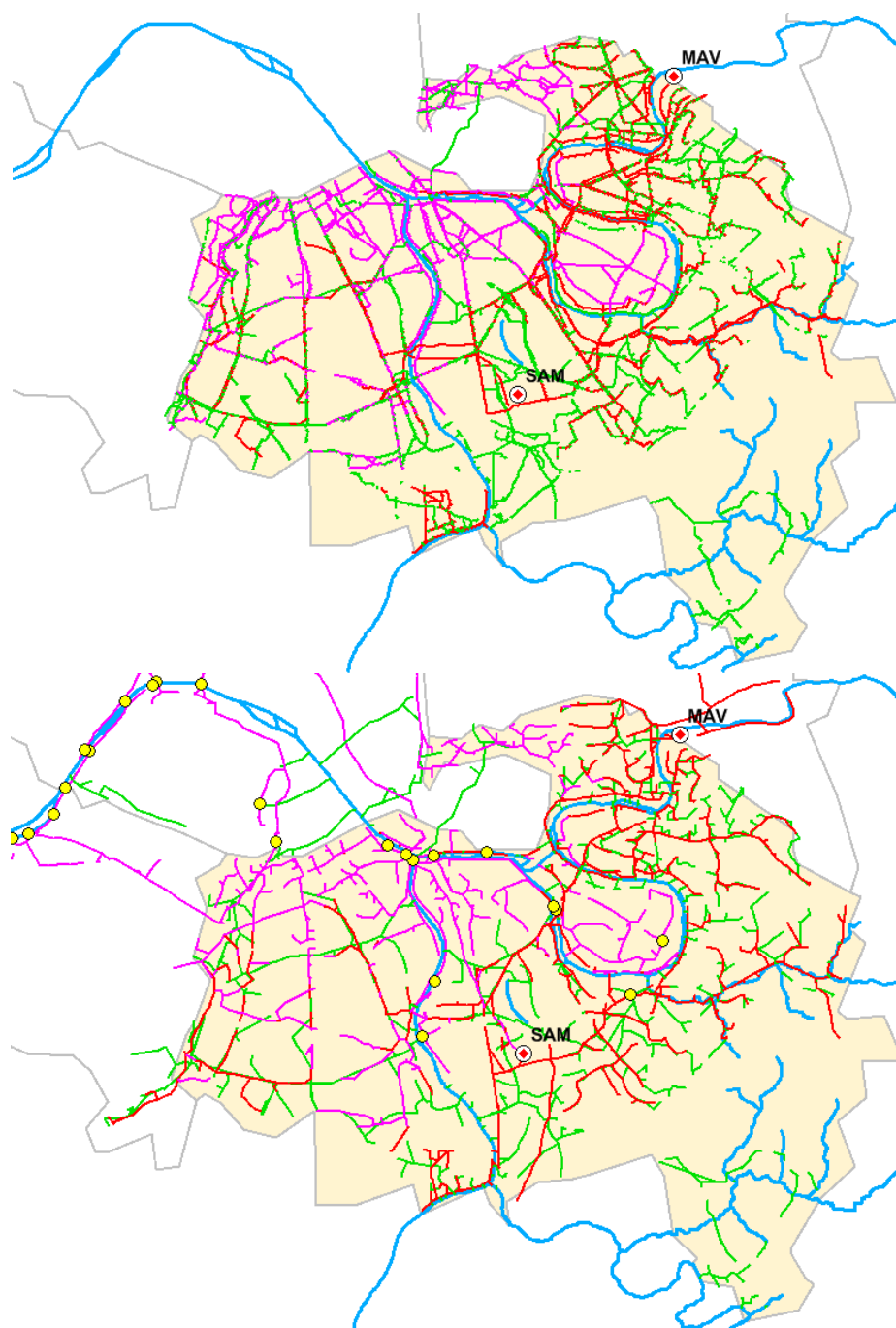


Figure 18 Réseau départemental du Val de Marne réel (haut) et reconstruit (bas). Sur le réseau reconstruit, le réseau départemental est connecté au réseau interdépartemental (trait plus épais). Les couleurs sont les mêmes que pour la Figure 17. Les déversoirs d'orage retenus pour la reconstruction (interdépartementaux et départementaux) sont représentés (ronds jaunes).

2.4.6. A l'échelle de toute la zone

Dans un premier temps, un travail de mise en cohérence des tables des réseaux départementaux reconstruits a dû être fait. En effet, chaque nœud et chaque tronçon est identifié à l'aide d'un numéro. De plus les tronçons sont associés aux nœuds amont et aval qu'ils connectent. Il a donc fallu s'assurer qu'en regroupant tous les réseaux départementaux des identifiants identiques n'allaient pas apparaître.

Pour le département de Seine-Saint-Denis, l'absence du canal de l'Ourcq induisant de mauvaises connexions sur le réseau d'eau pluvial, nous avons préféré supprimer les quelques tronçons présents mais mal connectés au centre du département. Certaines mailles se retrouvent ainsi sans réseau d'eau pluviale. Nous avons fait l'hypothèse que les écoulements sur versant permettront de rejoindre correctement la Marne ou la Seine.

Par ailleurs, à la frontière entre deux départements, la cohérence entre les réseaux reconstruits a dû être vérifiée : les règles de construction du nombre de nœuds selon leur type devaient être respectées. Ainsi, manuellement, nous avons supprimé quelques nœuds et modifié parfois certains arcs aux limites communes entre deux départements.

Les réseaux résultants unitaires et d'eaux usées sont reproduits sur la *Figure 19* et les réseaux d'eau pluviale sur la *Figure 20*. Une majorité des déversoirs d'orage retenus pour la reconstruction est située sur le réseau interdépartemental, en revanche, la grande majorité des stations de relevage retenues se situe sur les réseaux départementaux (*Tableau 4*). Le choix des exutoires (*Figure 21*) étudiés a été fait en fonction des stations de mesure disponibles et fournies par les gestionnaires, ainsi que de la qualité des zones reconstruites. Peu de stations de mesure localisées sur le réseau pluvial nous ont été fournies par les gestionnaires, par conséquent seuls 7 exutoires de ce type ont été choisis.

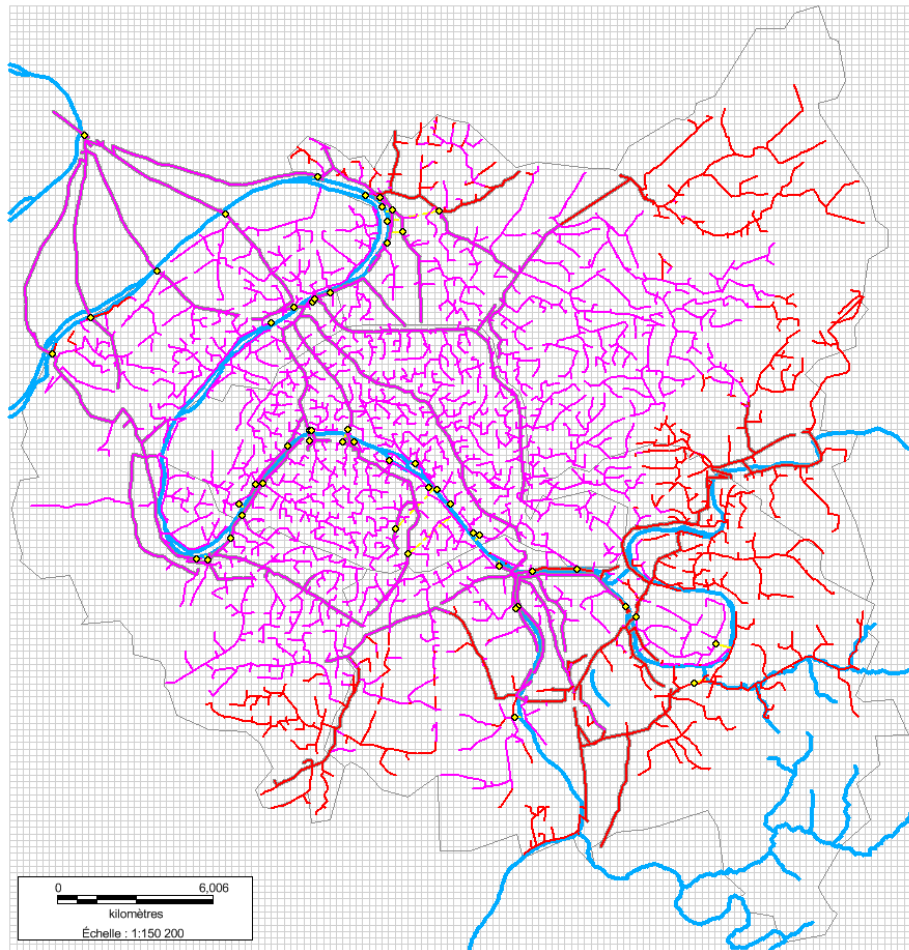


Figure 19 Réseaux reconstruits unitaires (rose) et d'eaux usées (rouge) de Paris et sa petite couronne. Le réseau interdépartemental est en trait plus épais. Le réseau hydrographique (bleu) et les déversoirs d'orage (rond jaunes) sont aussi représentés. La grille du modèle TEB-Hydro et les limites des départements sont en gris.

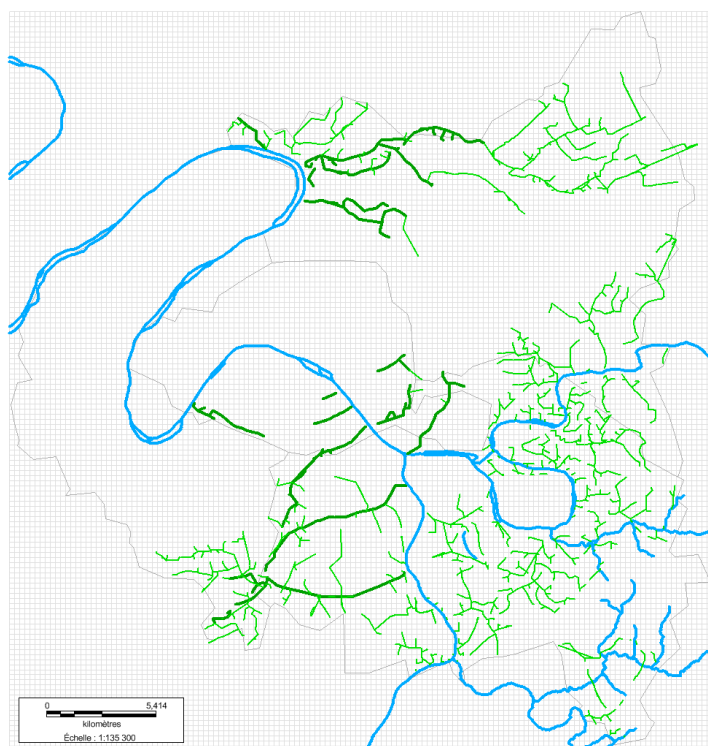


Figure 20 Réseaux reconstruits d'eau pluviale (vert) de Paris et sa petite couronne. Le réseau interdépartemental est en trait plus épais. Le réseau hydrographique (bleu) est aussi représenté. La grille du modèle TEB-Hydro et les limites des départements sont en gris.

Tableau 4 Synthèse des ouvrages retenus pour la reconstruction à l'échelle de toute la zone.

Types d'ouvrages	Nombre d'ouvrages retenus pour la reconstruction		
	Total	Interdépartemental	départemental
Déversoirs d'orage	63	38	25
Stations de relèvement	34	3	31
STEU	3	3	-
Maillages (Unitaire-EU)	14	10	4
Maillages EP	2	2	-
Exutoires (hors DO)	12	-	-

La projection des réseaux sur la grille permet de visualiser les aires drainées à l'endroit des exutoires. Pour faciliter la lecture et l'analyse, tous les exutoires et DO ne seront pas explicitement étudiés par la suite. Les zones de collecte des eaux pluviales (Figure 22) peuvent s'étendre au-delà de la limite des départements. En absence de réseau unitaire ou pluvial, les eaux pluviales suivent la topographie et peuvent donc rejoindre le réseau d'assainissement de la zone et rejoindre la Seine ou la Marne. Au nord du domaine, les bassins drainent des zones en dehors de la zone couverte par le SIAAP (Figure 2). Au sud de la zone, le bassin versant appartient à la zone de collecte du SIAAP, mais sans information sur le type de réseaux (unitaire ou séparatif) en fonction, au-delà de la petite couronne, il est difficile de conclure sur le réalisme du raccordement de cette zone. En présence de réseau séparatif, les surfaces sont directement connectées au réseau hydrographique naturel, à l'aval de la Marne ou de la Seine. En revanche, en présence de réseau unitaire, ces surfaces sont raccordées aux STEU. Mais en cas de forte pluie et /ou de surcharge hydraulique des STEU, la surface contribuant aux exutoires sur le réseau hydrographique augmente et peut dans notre cas (compte-tenu des DO représentés et du réseau reconstruit) être importante (Figure 23). Notons que ce n'est pas la totalité de la pluie tombant sur ces surfaces qui rejoindra la Seine ou la Marne, et qu'une part des eaux usées collectées dans ces réseaux se mêle aux eaux déversées. Les zones de collecte des eaux usées sont représentées Figure 24. On peut voir globalement que la majorité des eaux usées de la Seine-Saint-Denis sont drainées vers la STEU Seine aval (SAV), via l'usine de la Briche puis l'émissaire SDA (bassins bleus). La quasi-totalité des eaux usées de la Ville de Paris ainsi que la zone unitaire Paris de la Seine-Saint-Denis (Figure 9) et le nord du département des Hauts-de-Seine sont aussi drainées vers SAV mais via par

l'émissaire CAA. Seule une partie des eaux usées des Hauts de Seine transitent par l'émissaire CAB avant de rejoindre SAV. Enfin, la partie sud-ouest des Hauts-de Seine, ainsi qu'une petite partie des eaux usées de Paris (sud-ouest) sont transférées vers SAV par l'émissaire SAR. Notons que sur cette carte, les zones de collecte des réseaux d'eaux usées sont sous-estimées car constituées seulement des mailles occupées par un réseau d'eaux usées. Ceci est dû au choix de ne pas représenter le réseau communal. Mais cela n'aura pas d'impact pour la modélisation hydrologique car TEB-Hydro ne simule pas les eaux usées.

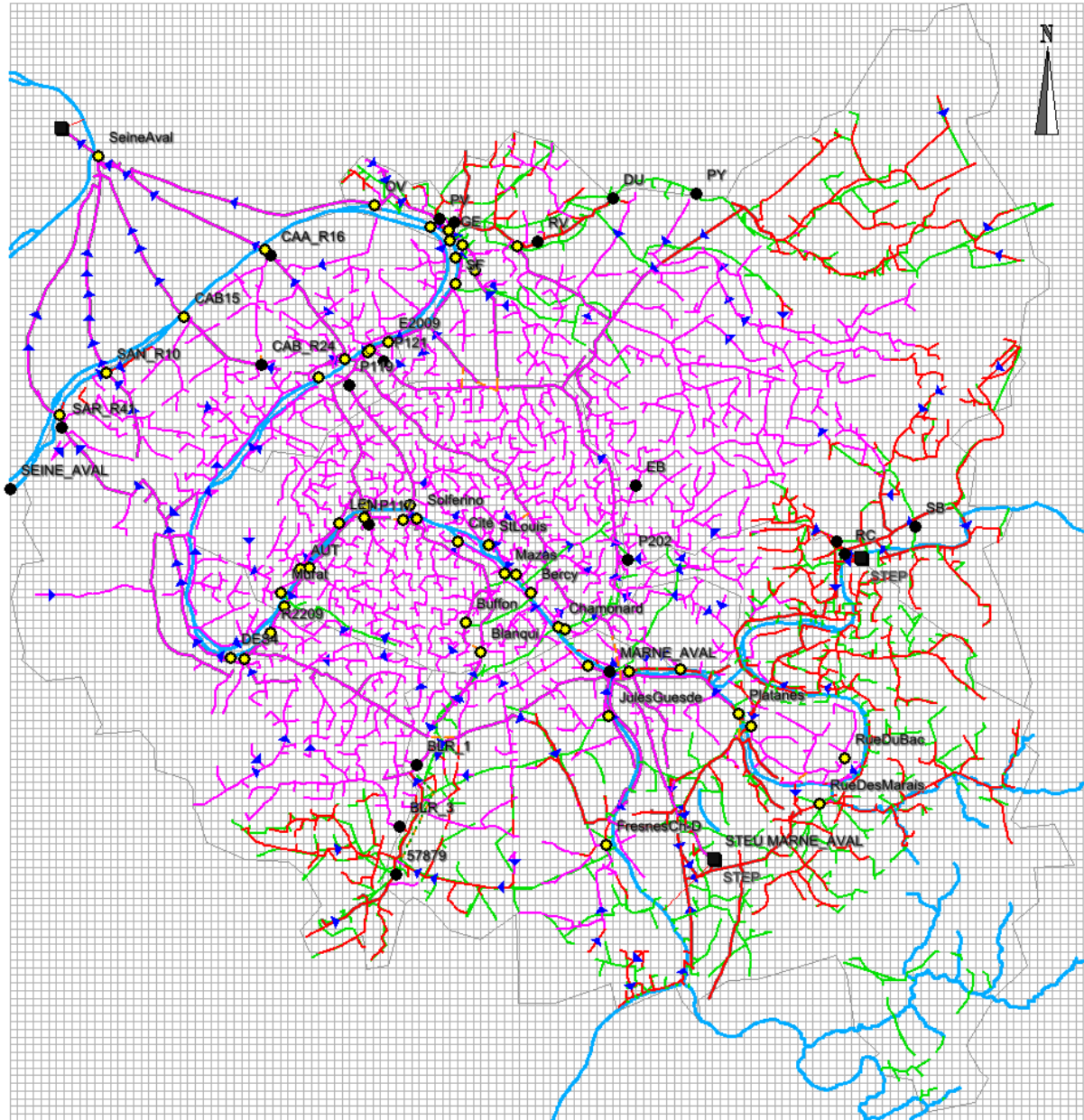


Figure 21 Localisation des exutoires (ronds noirs) et DO (ronds jaunes) retenus pour l'analyse et la simulation hydrologique. Les réseaux unitaires (rose), d'eaux usées (rouge) et pluvial (vert) et le réseau hydrographique naturel (bleu) sont superposés à la grille du modèle TEB-Hydro (gris).

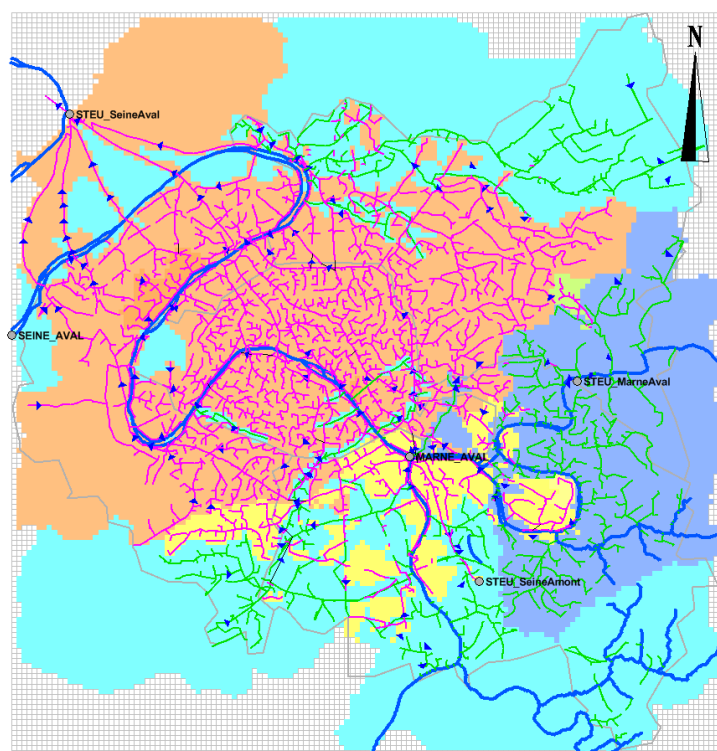


Figure 22 Zones de collecte des eaux pluviales drainées par le réseau hydrographique naturel à Marne aval (mauve) et Seine aval (cyan) et par le réseau unitaire aux STEU Marne aval (vert anis), Seine amont (jaune) et Seine aval (orange). Les réseaux d'eau pluviale (vert) et unitaires (rose) qui drainent ces bassins versants sont tracés.

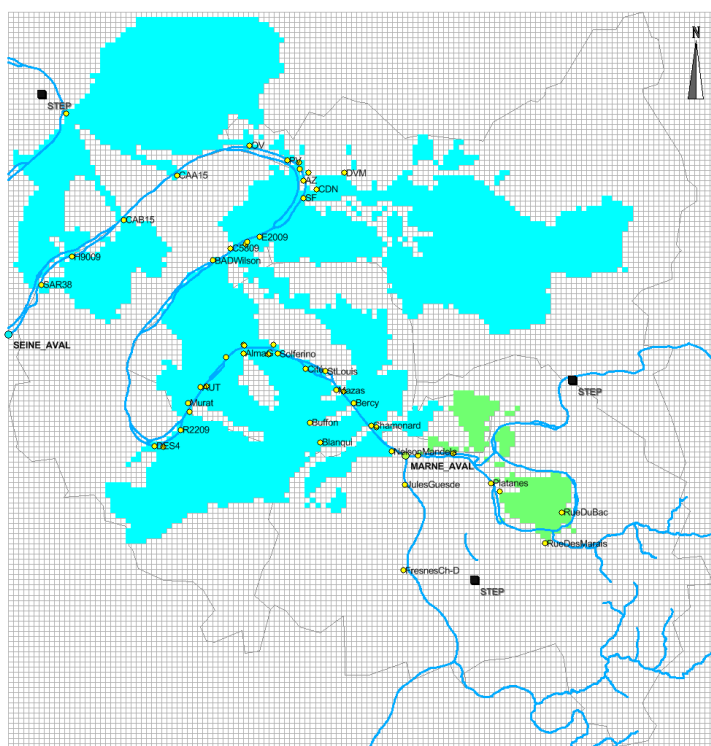


Figure 23 Surfaces potentielles contribuant partiellement au débit aux deux exutoires Marne aval (vert) et Seine aval (bleu). Les eaux transitent au travers des DO indiqués (ronds jaunes).

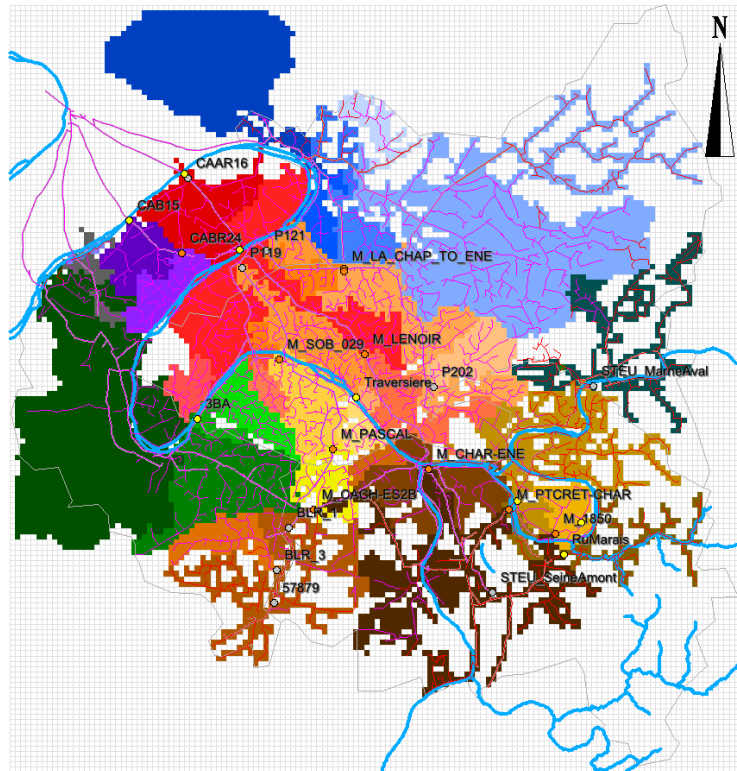


Figure 24 Surfaces drainées par les réseaux d'eaux usées et unitaire, en cas de non fonctionnement des DO. Les bassins qui ont pour exutoire final la STEU Seine aval sont drainées par les émissaires SDA (dégradés de bleus), CAA (jaune à rouge), CAB (dégradés de violet), SAN (gris) et SAR (dégradés de verts). Ceux qui ont pour exutoire final la STEU Marne aval sont en bleu-vert et la STEU Seine amont en dégradés de marrons.

3. Modélisation hydrologique de la zone d'étude

3.1. Le modèle hydrologique TEB-Hydro

Le modèle TEB-Hydro a été développé à partir du modèle TEB (Masson, 2000), schéma de surface dédié au milieu urbain. Les échanges en eau entre le sol, la surface et l'atmosphère ont été ajoutés ou modifiés pour permettre une représentation réaliste des écoulements de l'eau en ville (*Figure 25*). Le modèle décrit l'espace selon une grille à mailles régulières, au sein desquelles la fraction de bâti, voirie et « jardin » est indiquée. Les processus sont ensuite résolus différemment selon le compartiment, puis les flux sont agrégés par maille. L'eau produite au sein de chaque maille et disponible pour l'écoulement en surface ou en réseau peut être ensuite transférée jusqu'aux exutoires choisis préalablement par l'utilisateur et selon les distances calculées dans TOHR.

Lorsqu'il pleut, l'eau ruisselle sur les surfaces imperméabilisées (bâti et voirie) ou s'infiltrate à travers les surfaces perméables (jardin). Une fraction de l'eau ruisselant est transférée dans les réseaux d'assainissement (eau pluviale ou unitaire selon la maille), en fonction d'un paramètre de connexion effective au réseau, à caler. Une part de la pluie atteignant la voirie s'infiltrate selon un taux d'infiltration maximal renseigné par l'utilisateur (à caler). L'eau s'infiltrate dans le sol, discrétisé en 12 couches, en fonction des gradients d'humidité entre les couches. Selon un coefficient décrivant l'étanchéité du réseau (à caler), une part de l'humidité du sol, dans la couche où se trouve le ou les réseaux s'infiltrate dans les conduites. Un transfert horizontal de l'eau entre les couches est pris en compte pour équilibrer les profils d'humidité. Une part de l'eau présente dans la couche la plus profonde est extraite pour alimenter le drainage profond, qui alimente lui-même le débit en rivière, en suivant les mêmes chemins découlements qu'en surface.

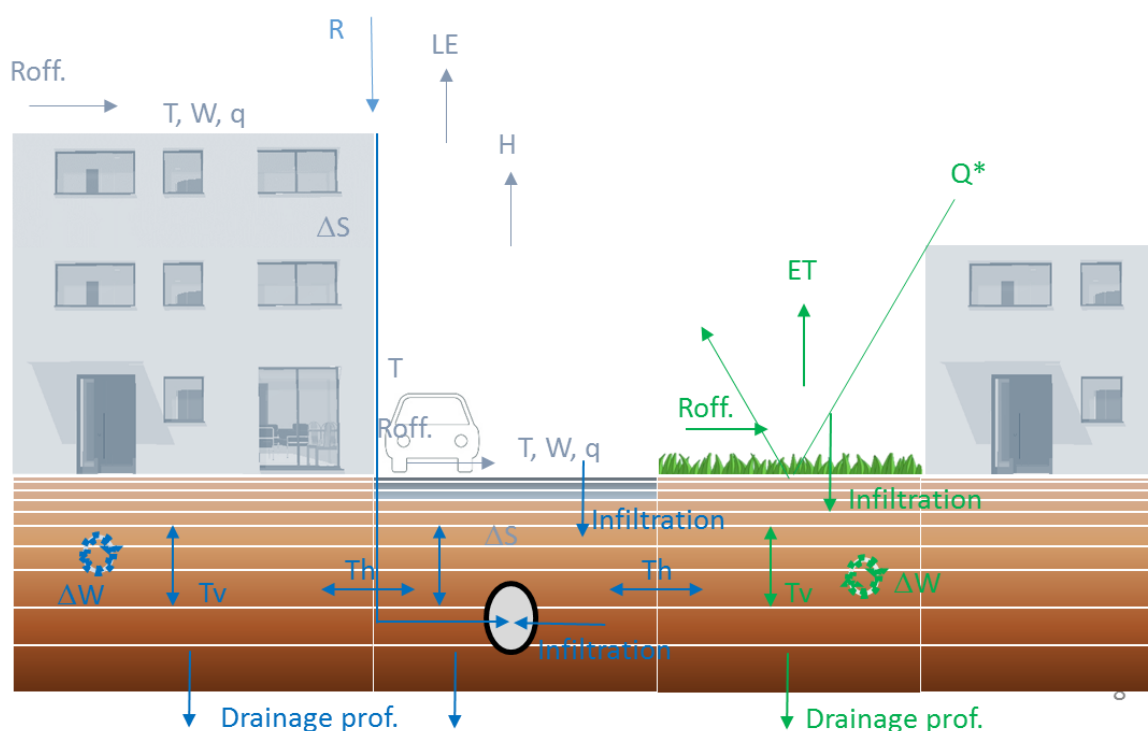


Figure 25 Schéma synthétisant les différents échanges en eau et chaleur au sein du modèle TEB-Hydro, dans les « compartiments » bâti, voirie et jardin. R : précipitation ; ET : évapotranspiration LE : chaleur latente ; R_{off} : ruissellement ; W : teneur en eau ; Th/v : transfert horizontal et vertical ; T : température de surface ; Q^* : rayonnement net. D'après Stravopulos-Laffaille et al, 2019.

3.2. Les données disponibles et configuration des simulations

3.2.1. Données d'entrée (thèse en cours d'Emilie Bernard)

Les forçages météorologiques (vent, humidité de l'air, différentes composantes du rayonnement, pression, température de l'air) pour l'année 2014 sont issus du modèle de prévision AROME, fournis par Météo-France. La pluie est issue de données de pluie fournies par les gestionnaires de la zone.

Les données d'occupation du sol sont issues d'une part de la base de données ECOCLIMAP-SG (Seconde Génération). Elle est définie sur l'ensemble du globe et fournit l'information de l'occupation du sol à une résolution de 300 m. Elle décrit la végétation, associée à ses différentes caractéristiques (LAI, hauteur des arbres, albedo...) ainsi que les différentes typologies urbaines. Elle permet de renseigner les zones non urbaines. D'autre part, pour les aires urbaines, la base de données issue du projet MAPUCE (Bocher et al., 2018) fournit une information très détaillée sur l'occupation du sol et les paramètres morphologiques urbains pour les villes françaises. L'information concernant la végétation n'est cependant pas précise dans cette base de données. C'est pourquoi elle sera remplacée par les fractions de végétation urbaine fournies par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme (IAU ÎdF, 2016). Cette base de données fournit une distinction entre la végétation arborée et herbacée, ce qui est pertinent pour le modèle. Pour définir de façon plus raffinée les caractéristiques des arbres urbains, les données disponibles en libre accès sur l'Île-de-France ont été utilisées. La texture du sol, auquel le modèle est très sensible, est issue de la base de données HWSD (FAO et al., 2012).

3.2.2. Données d'évaluation

Pour évaluer les résultats du modèle TEB-Hydro, nous disposons des données débitmétriques fournies par les collectivités. Le *Tableau 5* liste les exutoires de la reconstruction pour lesquels nous disposons de données.

Tableau 5 Liste des mesures débitmétriques disponibles selon les exutoires choisis. Leur taux de disponibilité ainsi que les fournisseurs de chaque donnée sont indiqués.

Exutoire	Point de mesure	Type d'ouvrage	Disponibilité	Fournisseur données
3BAP109	P109	DO	100%	Ville de Paris
BLR3	BLR_3	Jonction SIAAP	100%	CD92
Cité	DCit	DO	100%	Ville de Paris
P119	P119_Dcol_	Sortie Paris	100%	Ville de Paris
P121	P121_Dcol	Sortie Paris	100%	Ville de Paris
P202	P202_Dcol	Entrée Paris	100%	Ville de Paris
Pont Créteil	DO Pont Créteil	DO	99.8%	CD94
RueBac	DO Rue du Bac	DO	100%	CD94

3.2.3. Configuration des simulations

Le modèle TEB-Hydro fonctionne au pas de temps numérique de 15min. Les données de forçage fournies en entrée et de sortie calculées par le modèle sont au pas de temps horaire. La période simulée est du 1^{er} janvier 2014 00 UTC au 31 décembre 2014 23 UTC.

Les paramètres du modèle n'ont pas été calés, mais seulement ajustés, à partir de la configuration de Stavropoulos-Laffaille et al (2018) sur Nantes. Ainsi, ceux retenus pour cette étude sont indiqués dans le *Tableau 6*. Un travail plus approfondi de calage serait nécessaire.

Tableau 6 Liste des paramètres auxquels le modèle est le plus sensible (Stavropoulos-Laffaille et al, 2018) et valeurs ajustées pour cette étude.

Paramètres	Valeur (unité)
Capacité maximale d'interception en surface - bâti	1.5 (mm)
Capacité maximale d'interception en surface - voirie	3.0 (mm)
Taux de connexion effective des surfaces imperméabilisées	0.65 (-)
Taux d'infiltration à travers la voirie	10^{-5} (m.s ⁻¹)
Taux d'infiltration à travers les conduites du réseau	9.10^{-2} (m.s ⁻¹)

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. Le cumul annuel des précipitations s'élève à 637mm (calculé entre 1981 et 2010) (Infoclimat, 2014). Les données pluviométriques fournies par les Hauts-de-Seine (Beauvais et al, 2017), le Val de Marne et la Ville de Paris

nous indique un cumul moyen global (calculé avec tous les pluviomètres disponibles à chaque pas de temps) de 709mm. Sachant que le cumul calculé sur les sept pluviomètres pour lesquels la totalité de la période est disponible (3 pour le Val de Marne, 1 pour les Hauts-de-Seine et 3 pour la Ville de Paris) est de 720mm (712mm pour le Val de Marne, 713mm pour la Ville de Paris et 725mm pour les Hauts-de-Seine). Une analyse plus poussée des données pluviométriques semblent indiquer que les pluies fournies par la Ville de Paris ne sont pas cohérentes avec celles des autres départements. Un horodatage en heure locale au lieu de l'heure UTC peut expliquer cela. Mais même en essayant de corriger l'écart temporel avec les deux autres départements, il reste des écarts de lames d'eau qui nécessiterait un travail de validation des données plus minutieux. Le choix de ne travailler qu'avec les pluviomètres du Val de Marne et des Hauts-de-Seine est donc fait.

3.3. Résultats

Tout d'abord la comparaison des simulations aux observations est plus ou moins satisfaisante selon les points de mesure. Rappelons tout d'abord que le modèle ne simule pas la part des eaux usées. Il faudrait donc comparer les débits simulés aux débits observés sans la part des eaux usées. Aux exutoires BLR3 et P202 (*Figure 27*), le modèle surestime fortement les écoulements même sans ajout de la part d'eaux usées. En P121, de la même façon, les débits d'effluents écoulés dans le réseau sont surestimés en intensité, mais aussi en nombre. Au contraire pour les points Cité, Pont Créteil, P202 et 3BA (P109), le modèle a tendance à sous estimer les déversements ou débits (pour le dernier exutoire, noter que le mois de janvier (600 premiers pas de temps) puis à partir d'octobre, la mesure devrait probablement être invalidée). A l'exutoire Rue du Bac, le modèle ne parvient même pas à reproduire une dynamique cohérente avec les observations : en hiver il surestime les déversements alors qu'en été, il les sous estime. En revanche, à l'exutoire P119, le modèle donne des résultats encourageants. En effet, si la part des eaux usées est prise en compte, les pics de débits semblent assez bien représentés. Cependant, en février-mars 2014 (pas de temps compris entre 1500 et 2800) et août-septembre 2014 (5800-6800 pas de temps) des pics peuvent être observés, alors que le modèle n'en simule aucun. Ceci s'explique par l'absence de pluie pour le modèle.

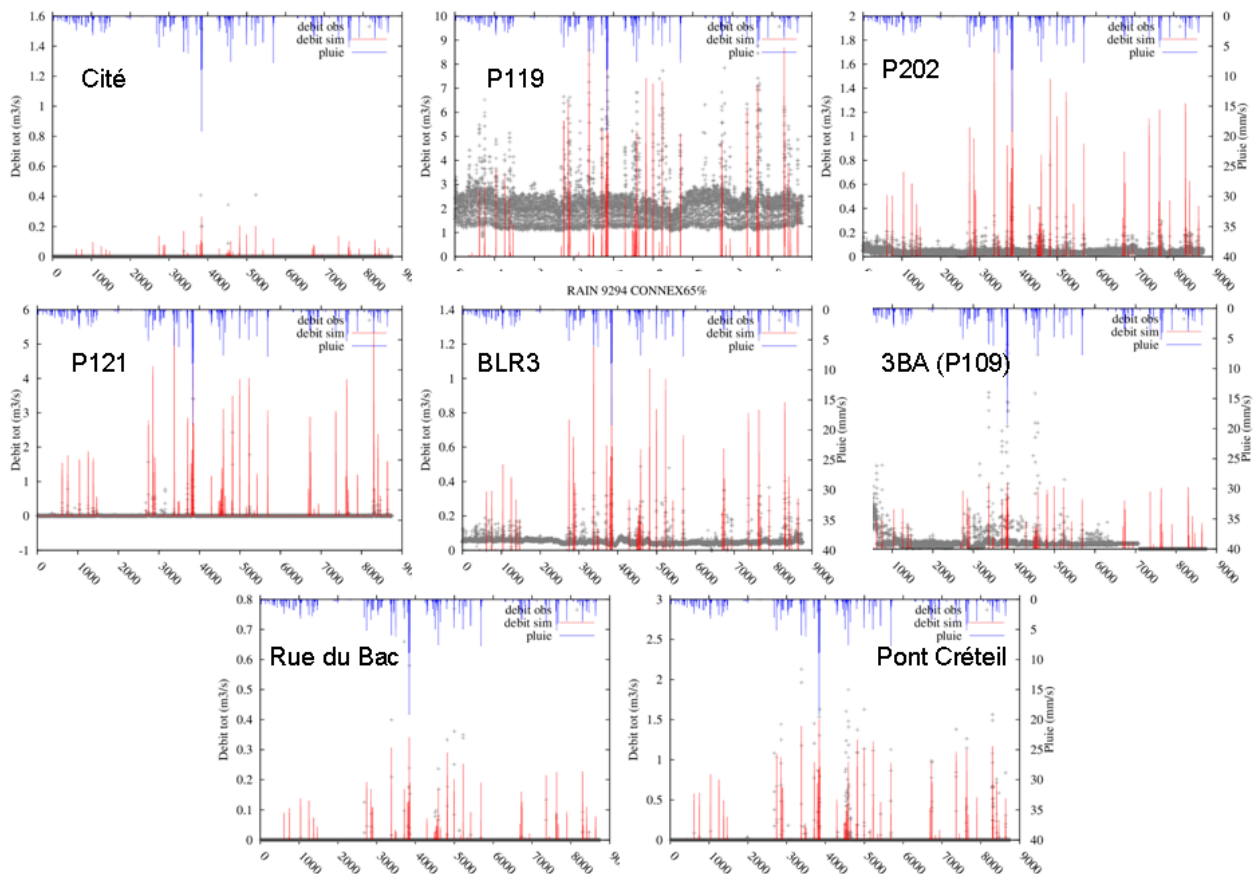


Figure 26 Débits simulés (rouge) et observés (points noirs) et pluie (bleu) pour les points de mesure choisis (Tableau 5 et Figure 27) du 1^{er} janvier 2014 au 31 décembre 2014. Chaque graphique a le même axe pour les pluies (ordonnée gauche inversée de 0 à 40mm/h). En revanche l'axe pour le débit (ordonnée droite en m³/s) est adapté à la valeur maximale de chaque graphique. En abscisse sont indiqués les pas de temps.

Le modèle est capable d'identifier les contributions au débit. Ainsi, la Figure 28 qui représente la contribution totale de la zone urbaine de Paris et sa petite couronne au débit de la Seine à l'exutoire SEINE AVAL (Figure 22) et le détail des contributions par type montre que la plus forte contribution à la Seine est le ruissellement de surface sur les voiries puis sur le bâti. Le ruissellement sur les surfaces naturelles est négligeable ainsi que l'infiltration de l'eau du sol dans les réseaux.

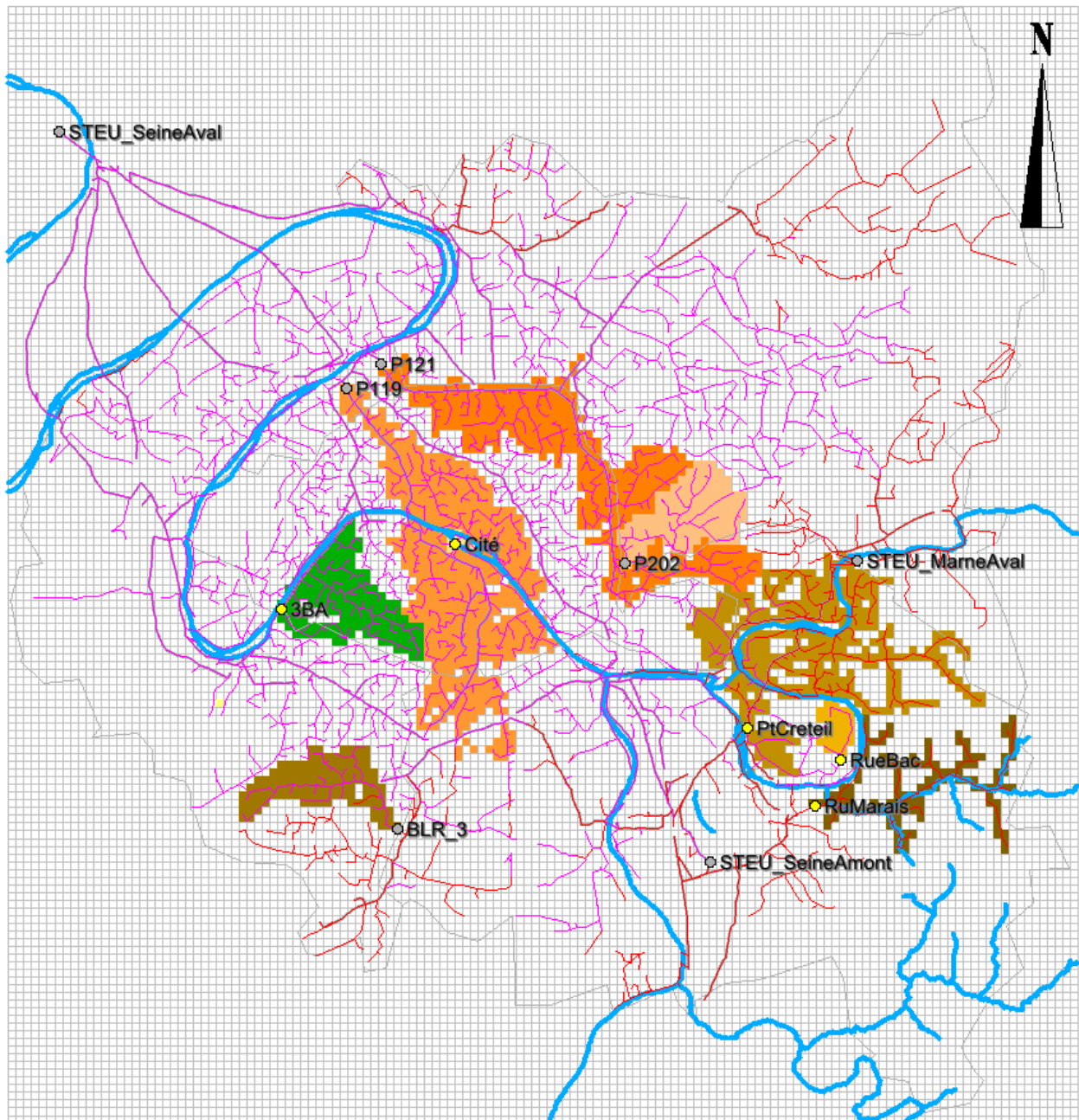


Figure 27 Délimitation des surfaces drainées par les exutoires étudiés. Les DO (rond jaune), réseaux d'eaux usées (rouge) et unitaire (rose) ainsi que Les STEU sont représentés. Les réseaux à fonction interdépartementale sont plus épais.

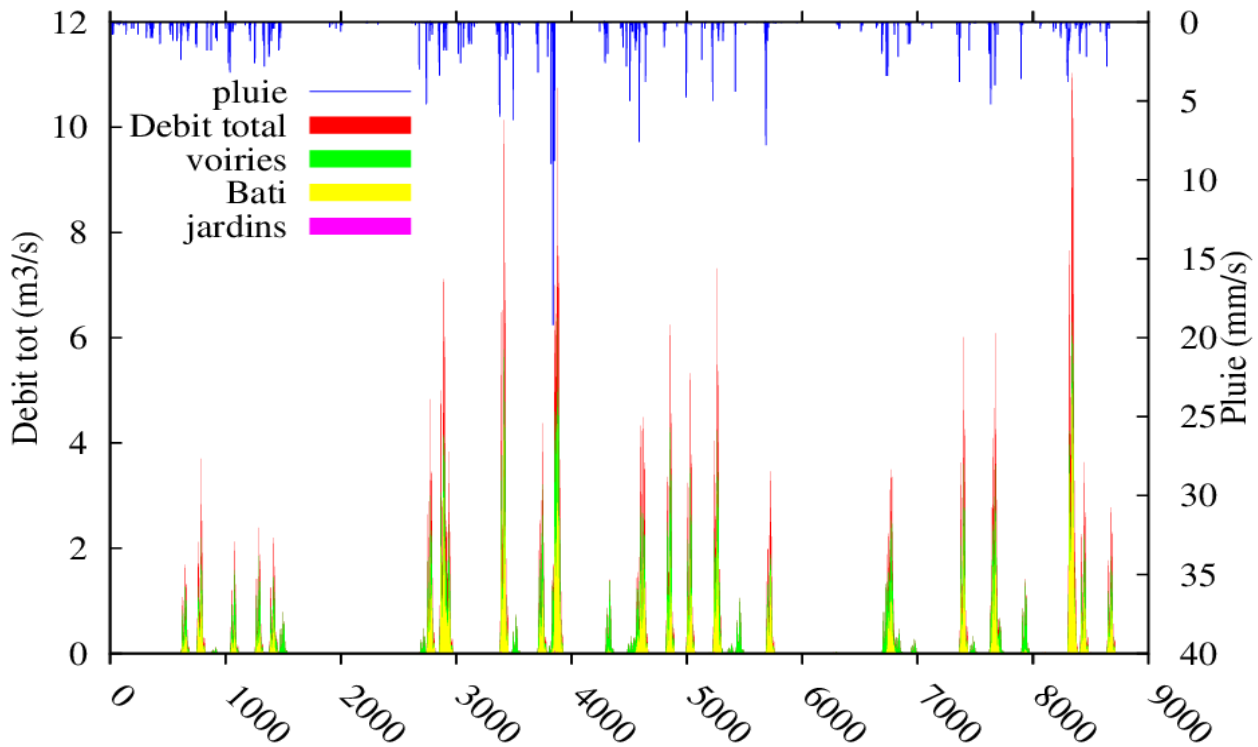


Figure 28 Débit total produit par la zone urbaine de Paris et sa petite couronne (rouge) et contribuant au débit de la Seine à l'exutoire SEINE AVAL. Les contributions en lien avec le ruissellement de surface sur les voiries (vert), le bâti (jaune) et les surfaces perméables (magenta) sont détaillées.

3.4. Analyse

L'utilisation d'une pluie homogène spatialement pour alimenter le modèle est critiquable. En effet, pour certains événements de type orageux par exemple, le champ pluvieux peut être très hétérogène spatialement. Utiliser une pluie déduite des différents pluviomètres, prenant en compte une variabilité spatiale sur tout le territoire pourrait donc améliorer les résultats de simulation. N'oublions pas non plus que le réseau est parsemé de bassins de stockage, de maillages et de déversoirs d'orage, pour lesquels nous ne connaissons pas précisément les règles de fonctionnement. Pour nombre d'entre eux, c'est l'expertise des agents en charge de la gestion quotidienne des réseaux qui détermine l'ouverture. Aujourd'hui, nous ne disposons pas des informations nous permettant de nous rapprocher au plus près de cette gestion. Cependant, nous avons essayé de prendre en compte en partie ces ouvrages. Ainsi, par exemple, le maillage LAS qui permet dans cette reconstruction de dérouter en partie les effluents de l'ES1B (juste en amont de 3BA (P109)) vers l'usine de Clichy (au lieu de l'émissaire LAS pour rejoindre normalement le SAR) a été ouvert partiellement. Les résultats de 3BA montrent qu'il faudrait peut-être limiter plus l'ouverture de ce maillage. Ou encore le maillage Lenoir, qui permet de dérouter une partie des effluents du collecteur de Clichy vers l'émissaire Asnières. Ce maillage conduit donc à une augmentation du débit en P119, c'est pourquoi ce maillage a été ouvert partiellement. Il en est de même pour les DO. Cependant, en aval du territoire (près des STEU), les ouvrages en amont sont parfois tellement nombreux, que ce réglage est difficile, en lien avec un effet domino des paramètres à renseigner. Ceci nous indique que le calage ne peut probablement pas se faire comme Stavropoulos-Laffaille et al. (2018) l'ont conduit. En effet, la multiplicité des paramètres mais aussi des bassins versants à caler (donc des jeux de données sur lesquels caler le modèle) nous conduit à envisager d'autres méthodes.

Enfin, rappelons que la reconstruction du réseau obtenue pendant cette étude est ponctuée de diverses erreurs qui peuvent conduire les écoulements, temporairement ou définitivement, vers le mauvais exutoire. Si la reconstruction draine les bonnes surfaces à l'échelle des STEU comme point exutoires, les surfaces drainées par des exutoires plus amont peuvent être moins réalistes. Par exemple, la reconstruction de la partie nord-ouest de Paris est médiocre, conduisant certains effluents vers l'émissaire ENE au lieu de l'émissaire Clichy. Ainsi les exutoires en amont de l'usine de Clichy vont en pâtir.

4. Conclusion et perspectives

L'urbanisation impacte fortement le cycle de l'eau et a des conséquences sur la qualité des eaux du milieu récepteur. Afin de pouvoir caractériser l'impact de la région parisienne (Paris et sa petite couronne) sur la Seine et ses affluents, un modèle hydrologique capable de représenter les écoulements en surface, dans les réseaux ainsi que les connexions entre le réseau d'assainissement et le réseau est nécessaire. Peu d'outils aujourd'hui, capables de représenter tous les processus impliqués et à cette échelle, existent. Le modèle TEB-Hydro afin de pouvoir résoudre les bilans en eau (ainsi que d'énergie) à cette échelle, simplifie l'espace à l'aide d'une grille à mailles régulières. Afin d'être cohérent en termes de processus, mais aussi dans le but de limiter les temps de calculs, le transfert en surface et au sein des réseaux nécessite de simplifier, selon la même résolution, les chemins d'écoulement de l'eau. La description des réseaux d'assainissement est disponible au sein des banques de données urbaines, alors que le réseau hydrographique naturel est disponible via la BD Carthage (et ne nécessite pas d'être simplifié). L'outil TOHR permet cette simplification en se basant d'une part sur des données communes aux collectivités : les regards, les tronçons et les ouvrages spéciaux (station de pompage, DO, etc.) du réseau et d'autre part en recréant une relation topologique entre les nœuds et arcs du réseau simplifié. La projection du réseau ainsi reconstruit sur la grille du modèle hydrologique, permet ensuite à TEB-Hydro de simuler les écoulements d'eau et de calculer un débit en différents endroits du réseau.

Simplifier le réseau d'assainissement nécessite de bien comprendre son fonctionnement. Une forte collaboration avec les différents gestionnaires des réseaux interdépartementaux et départementaux de la zone étudiée a donc été nécessaire. Il a ainsi été mis en évidence les différentes difficultés que cette zone présente, en plus de la grande surface qu'elle couvre. De nombreux acteurs sont en charge de la gestion du système d'assainissement et en lien avec l'histoire de l'urbanisation de la zone, le système d'assainissement est complexe car en de nombreux endroits maillé, parfois dédoublé (réseau de surface et réseau profond) et ponctué de nombreux bassins de stockage. Une fois le fonctionnement du réseau décrit (Lotfi et al, 2016a), le réseau a été reconstruit (et simplifié) à l'échelle interdépartementale puis à l'échelle de chaque département de la zone. L'analyse de cette reconstruction, selon les départements, selon les zones au sein des départements et selon les échelles considérées a montré des résultats parfois très encourageants (interdépartemental, Val de Marne), plus nuancés (Hauts-de-Seine) voire problématiques (Ville de Paris). Ces différents réseaux départementaux reconstruits tous connectés au même réseau interdépartemental ont été réunis pour ne faire qu'un seul et même réseau qui a pu être projeté sur la grille du modèle hydrologique TEB-Hydro et ainsi fournir les informations nécessaires pour le transfert (connexion à quel exutoire, distance à l'exutoire, connexion entre exutoires, déversement ou maillage possible, ...) de l'eau pluviale au sein des différents types de réseau (pluvial et unitaire).

La modélisation de l'année 2014 est un premier exercice d'application du modèle hydrologique TEB-Hydro sur un territoire de grande taille et complexe. La comparaison des débits simulés en quelques points du réseau avec des débits mesurés est plus ou moins satisfaisante selon les exutoires. Elle ne constitue qu'une première étape d'évaluation du modèle dans ce contexte. En effet, le modèle n'a pas été calé par exemple sur les différents paramètres auxquels il est le plus sensible comme le taux de connexion des surfaces imperméabilisées au réseau d'assainissement, mais aussi le taux d'infiltration de l'eau du sol dans le réseau ou à travers la voirie. Pour les autres paramètres nous sommes partis de Stavropoulos-Laffaille et al (2018). Aussi, les différents ouvrages en amont pouvant modifier les débits n'ont pas pu être « calés » : c'est-à-dire qu'un travail supplémentaire est nécessaire pour identifier les débits seuils à partir desquels les DO déversent et les maillages sont ouverts. Pour les points plus en aval, la multiplicité des ouvrages amont rend ce travail plus difficile et constitue une problématique à part entière.

Pour améliorer ces premiers résultats, la correction du réseau reconstruit aux endroits les plus stratégiques ou les moins bien reconstruits peut être utile. Les échanges avec les services du Conseil de Seine-Saint-Denis seront nécessaires dans un avenir proche. Les régions où nous n'avons pas collecté de données, donc sans réseau d'assainissement, peuvent bien sûr aussi fortement impacter les résultats en certains points. Cependant, essayer d'ajouter de nouveaux jeux de données pour compléter le réseau reconstruit est un travail très chronophage qui ne devra être fait que si cela s'avère absolument indispensable. L'expertise des collectivités déjà engagées dans cette étude pourrait aider à décider de compléter ou non le réseau. Concernant la modélisation elle-même, un travail approfondi de calage est bien sûr nécessaire. Mais au préalable, une sélection minutieuse des exutoires, maillages et DO doit être menée, en lien avec la qualité de la reconstruction (il est inutile de vouloir comparer un débit simulé à un débit mesuré, là ou en aval d'une

zone où la reconstruction du réseau est trop infidèle), ainsi que des observations (et de leur qualité) disponibles et du niveau stratégique de la zone drainée. Dans cet exercice les bassins de stockage ou la fonction de stockage de certains émissaires ne sont pas pris en compte. Développer cette fonction dans la reconstruction et le modèle hydrologique pourrait s'avérer indispensable selon les exutoires ciblés. Enfin, pour aider au calage, ainsi qu'à l'évaluation du modèle hydrologique, la séparation de la part des eaux usées et de l'eau pluviale dans la donnée débitométriques mesurée sur le réseau unitaire doit être menée. Une partie de ces pistes sont d'ores et déjà prévues dans le cadre de la thèse d'Emilie Bernard (IFSTTAR-Météo-France) qui vise à caractériser la réponse hydro-climatique de Paris et sa petite couronne en climat futur, dans le cadre du programme OPUR 5.

Bibliographie

- APUR, 2015. Préservation et valorisation de la ressource en eau brute - Une gestion métropolitaine des eaux pluviales. *Atelier parisien d'urbanisme*.
- Beauvais, C., Chancibault, K., Mosset, A. & Roux, C., 2017. Reconstruction du réseau hydrographique du département des Hauts-de-Seine en vue d'une modélisation hydrologique. *Livrable du Programme PIREN-Seine, phase VII*.
- Bocher, E., Petit, G., Bernard, J., Palominos, S., 2018 :A geoprocessing framework to compute urban indicators:The MAPUCE tools chain. *Urban Climate*, Elsevier, 24, pp.
- Cordeau, E, 2016. Les îlots morphologiques urbains (IMU) : délimitation et caractérisation des IMU 2012 en Île de France *Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de l'île de France*.
- DEA93, 2006. Schéma départemental d'assainissement. *Conseil Départemental des Hauts-de-Seine*.
- DEA93 , 2014 : Bilan des rejets au milieu naturel, Direction de l'Eau et de l'Assainissement de la Seine Saint Denis.
- DEA93, 2015a : Carte de la gestion automatisée, Direction de l'Eau et de l'Assainissement de la Seine Saint Denis.
- DEA93 , 2015b : Rapport annuel 2014 du service public d'assainissement en Seine Saint-Denis, Direction de l'Eau et de l'Assainissement de la Seine Saint Denis.
- Delmas, J., Houel, P., Vially, R., 2002. Rapport régional d'évaluation pétrolière (Paris Basin). *Institut Français du Pétrole*.
- DSEA94, 2010. Manuel d'auto-surveillance du Conseil Général du département 94, Direction des Services de l'Environnement et de l'Assainissement du département du Val de Marne.
- DSEA94, 2014 : Rapport d'auto-surveillance du Conseil Général du département 94, Direction des Services de l'Environnement et de l'Assainissement du département du Val de Marne.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012 : Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Fletcher, T.; Andrieu, H. & Hamel, P., 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. *Advances in Water Resources*. 51, 261 – 279
- IAU, 2001. *L'Occupation du Sol en Ile-de-France aujourd'hui, 1er bilan du MOS 1999*. Note rapide Mode d'occupation du sol, n°282 de Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la région Ile-de-France.
- Lehoucq, C., Pister, B., 2016. RETREAU SPECTIVE, département des Hauts-de-Seine.
- Lotfi, Z., Chancibault, K., Joannis, C., Andrieu H., Chebbo, G., Azimi, S. & Rocher, V., 2016a Fonctionnement du réseau d'assainissement à l'échelle de Paris et sa petite couronne. *Livrable du projet PIREN-Seine, phase VII*.
- Lotfi, Z., Chancibault, K., Joannis, C., Andrieu H., Chebbo, G., Azimi, S. & Rocher, V., 2016b Reconstruction du réseau d'assainissement à l'échelle de Paris et sa petite couronne. *Livrable du projet PIREN-Seine, phase VII*.
- Masson, V., 2000. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In *Atmospheric Models Boundary-Layer Meteorology*, 94, 357-397
- SAGE Marne Confluence, 2013 : Diagnostic, état des lieux. *Commission locale de l'eau Marne Confluence*. <http://www.sage-marne-confluence.fr/Notre-documentation/Documents-du-SAGE> (visité le 17/09/2019).
- SAP, 1999 : Manuel d'auto-surveillance, Section de l'Assainissement de Paris.
- SAP, 2015 : Bilan 2014 de l'auto-surveillance du réseau d'assainissement, Section de l'Assainissement de Paris.

- Shobair, S., Mosset, A., Chancibault, K., Linca, J.-C., Rabier, A. & Chebbo, G., 2018. Réseaux d'assainissement du Val de Marne en lien avec le réseau interdépartemental : fonctionnement, reconstruction et analyse. *Livrable du Programme PIREN-Seine, phase VII*.
- Tabuchi J.-P., Penouël D., 2014. RETREAU SPECTIVE 2014: Bilan d'exploitation du SIAAP. *Rapport du bilan du SIAAP*.
- Tabuchi, J.-P., Tassin, B., Blatrix, C., 2016. Grand Paris, Eau et changement global. *SIAAP*.
- Stavropoulos-Laffaille, X.; Chancibault, K.; Brun, J.-M.; Lemonsu, A.; Masson, V.; Boone, A. & Andrieu, H., 2018. Improvements to the hydrological processes of the Town Energy Balance model (TEB-Veg, SURFEX v7.3) for urban modelling and impact assessment. *Geoscientific Model Development*, 11, 4175-4194
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019 : World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). *United Nations*.

Sitographie

- 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).
- 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)

Abréviations

APUR : Atelier Parisien d'URbanisme

AROME : Application de la Recherche à l'Opérationnel à Meso-Echelle

DO : Déversoir d'orage

EU : Eaux usées

EP : Eaux Pluviales

IAU : Institut d'Aménagement et d'Urbanisme

IFSTTAR : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports de l'Aménagement et des Réseaux

IGN : Institut National de l'Information Géographique et Forestière

ISBA : Interaction Sol-Biosphere-Atmosphere

MNT : Modèle Numérique de Terrain

SIAAP : Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne

STEU : Station de traitement des eaux usées

TEB : Town-Energy Balance

TOHR : Tool for Hydrographic network Reconstruction

Rapport de synthèse

Phase 7
(2015-2019)

Retrouvez
les 7 autres
volumes sur :

www.piren-seine.fr

