



OPUR : Observatoire d'hydrologie urbaine en Île de France
Observatoire de la gestion à la source des eaux pluviales (O1)

**TRAVAUX PRELIMINAIRES A LA MISE EN PLACE D'UN
OBSERVATOIRE PERENNE DE LA GESTION A LA SOURCE
DES EAUX PLUVIALES**

Marie-Christine Gromaire, Jérémie Sage
Mai 2024



Préambule

Rappel des objectifs de l'action O1 – Observatoire de la gestion à la source des eaux pluviales

L'observatoire de la gestion à la source a deux objectifs :

- analyser la durabilité et la pérennité des solutions de gestion à la source des eaux pluviales mises en œuvre sur un quartier ou plusieurs, en se focalisant en particulier sur les solutions les plus innovantes ou répondant à des enjeux multiples ;
- évaluer la performance globale d'une gestion à la source systématisée des eaux pluviales à l'échelle d'un bassin versant.

Il s'agit d'une part de suivre l'évolution sur le moyen et long terme d'un panel représentatif d'ouvrages de gestion à la source mis en œuvre sur le domaine public ou privé. Ces ouvrages feront l'objet d'un suivi de leurs performances physiques (capacité d'infiltration, fréquence et niveau de sollicitation hydrologique, évolution de la contamination du sol), de leur intérêt écologique et paysager (diversité végétale et éventuellement animale, présence d'espèces non souhaitées) et le cas échéant de leur performance énergétique. Ce suivi pourra s'appuyer sur un couplage entre des relevés terrain à fréquence biannuelle et des enquêtes (dont la fréquence reste à définir). Il s'appuiera sur des indicateurs de performance simplifiés, et sur de la mesure en continu avec des capteurs autonomes et à bas coût de certaines grandeurs caractéristiques (hauteur d'eau dans l'ouvrage, température, humidité, consommation énergétique...). Les pratiques de maintenance (nature, fréquence, coût, difficultés) devront également faire l'objet d'un recensement.

Par ailleurs, on évaluera sur la base d'enquêtes et d'entretiens la connaissance qu'ont de ces dispositifs (leur rôle, leur fonctionnement) les différents acteurs du quartier, qu'ils soient gestionnaires ou usagers. On s'intéressera en particulier à la façon dont cette connaissance évolue dans le temps, du fait du renouvellement des personnels et des habitants, ainsi que de l'évolution de l'ouvrage (modifications de perception du fait des développements végétaux ou des usages par exemple) pouvant induire une perte de la mémoire des fonctions techniques de l'ouvrage. Les usages seront évalués à partir d'observations sur site, tandis que la perception des dispositifs par différents acteurs et leur appropriation seront analysées sur la base d'entretiens et d'enquêtes menées à trois ans d'intervalle, selon une grille d'entretien commune.

Travaux développés durant la phase OPUR5

Les travaux menés durant la phase 5 d'OPUR visaient la maturation de l'idée d'observatoire de la gestion à la source ; le choix du ou des quartiers (ou opérations d'aménagement) pilotes ; la caractérisation des contextes institutionnels, organisationnels et techniques des opérations d'aménagement retenues pour constituer l'observatoire ; la collecte de données sur les dispositifs de gestion à la source mis en œuvre et de leur fonctionnement.

Un groupe de travail associant chercheurs et partenaires opérationnels s'est réuni une première fois au printemps 2021 pour murir le concept d'observatoire de la gestion à la source et proposer des quartiers pilotes. Deux quartiers ont été présélectionnés : ZAC Montjoie à Saint Denis, ZAC Saint Vincent de Paul à Paris.

Des travaux de stages ont été engagés entre 2021 et 2023 afin de mieux comprendre le dispositif de gestion à la source des eaux de ruissellement mis en place sur la ZAC Montjoie et d'engager la réflexion sur son adéquation pour un suivi de long terme dans un cadre de recherche. Il s'agissait en particulier de collecter toutes les informations techniques sur le plan de gestion des eaux, recenser les ouvrages mis en place, analyser leur conception et leur réalisation, comprendre leur fonctionnement hydrologique et le traduire sous forme de schémas fonctionnels. Des visites de

terrain, couplées à quelques campagnes d'échantillonnage de sol et mesure des capacités d'infiltration ont été réalisées ainsi de mieux caractériser ces ouvrages. Une première modélisation du fonctionnement hydrologique du réseaux de noues mises en place pour gérer les eaux de l'espace public a été engagée. Elle visait notamment à évaluer la capacité de ce type d'ouvrage basé sur des massif de sol végétalisés étanché à limiter les volumes de ruissellement rejoignant le réseau d'assainissement collectif.

Un troisième stage a été mené en 2023, portant sur la ZAC St Vincent de Paul. Il s'agit d'un projet de ZAC plus récent, engagé en 2016, et dont les travaux de construction sont en cours. Pour ce site, le travail de stage visait à comprendre les choix de conception des dispositifs de gestion des eaux pluviales de la ZAC Saint-Vincent-de-Paul, les dynamiques qui ont prévalu dans ces choix et des conditions d'alignement de l'ensemble des acteurs du projet.

Organisation du rapport

Ce document regroupe trois rapports de stage, portant pour deux d'entre eux sur la ZAC Montjoie et pour le dernier sur la ZAC St Vincent de Paul.

- Stage de master 2 de Myriam Lachall (2022) : caractérisation et évaluation du système de gestion des eaux pluviales de la ZAC Montjoie en vue d'un suivi de long terme dans un cadre de recherche
- Stage ingénieur de Jean-François Durmont (2023) : évaluation de l'aménagement de gestion des eaux pluviales sur la ZAC de Montjoie au moyen d'une modélisation sur le logiciel SWMM
- Stage ingénieur de Chaopeng Wang (2023) : adoption de solutions innovantes de gestion à la source des eaux pluviales – analyse du cas de la ZAC St Vincent de Paul.

Maryam LACHAAL



Année 2021-2022

Master STPE spécialité ERGA
Rapport de stage 2^{ème} année

Caractérisation et évaluation du système de gestion des eaux pluviales de la ZAC Montjoie en vue d'un suivi de long terme dans un cadre de recherche

Mots-clés : gestion, eaux pluviales, ouvrages, modélisation, pluies courantes, abattement

Stage réalisé du 11/04/2022 au 09/09/2022

dans LEESU (Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains)

Sous la direction de :

- a) Mme. Marie-Christine GROMAIRE-MERTZ (tutrice dans la structure d'accueil)
- b) M. Jérémie SAGE (co-encadrant de Cerema)
- et de
- c) Mme. Claire DELUS (tutrice universitaire)

Mémoire soutenu le 06/09/2022 devant le jury composé de :

M. Gilles Drogue, président du jury
Mme. Claire Delus, enseignant référent
Mme. Marie-Christine GROMAIRE-MERTZ, tutrice de stage
M. Jérémie SAGE, co-encadrant

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Mme. Marie-Christine Gromaire-Mertz, Directrice de Recherche à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, et à M. Jérémie SAGE, Responsable de recherches sur l'eau en milieu urbain à Crema, pour le temps qu'ils m'ont accordé, leur encadrement et leur aide précieuse pour l'élaboration de ce rapport de stage.

Je souhaite également adresser mes remerciements à Mme. Claire Delus pour son suivi et le temps qu'il a accordé pour lire mon rapport.

Un grand merci à toutes les personnes que j'ai rencontré à LEESU, Cynthia, Guilermeh, José, Max, Nadia, Natalia, Paul, Rachid, Tinghao et tout le personnel du LEESU pour leur bienveillance.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	1
SOMMAIRE.....	2
LISTE DES TABLEAUX.....	4
LISTE DES FIGURES.....	4
LISTE DES ANNEXES.....	4
PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCEUIL	5
INTRODUCTION	6
Chapitre I : Etat de l'art.....	7
I.1) Contexte général de la gestion des eaux pluviales.....	7
I.1.1) Impact de l'urbanisation sur le cycle de l'eau et la qualité des milieux récepteurs	7
I.1.2) Limites d'une gestion « tout-tuyau » des eaux pluviales	7
I.2) La gestion intégrée des eaux pluviales	8
I.2.1) Principes de la gestion intégrée des eaux pluviales	8
I.2.2) Cadre réglementaire	8
I.3) Projet d'observatoire de la gestion à la source des eaux pluviales dans le programme OPUR.....	9
I.4) Présentation du site d'étude	10
I.4.1) Contexte géographique.....	10
I.4.2) Projet d'aménagement et historique de l'occupation du sol	12
I.4.3) Principe de gestion des eaux pluviales.....	13
Chapitre II : Matériel et Méthodes	14
II.1) Amélioration de la connaissance des principes de gestion des EP urbaines et de la conception du système	14
II.1.1) Organisation et traitement de données	14
II.1.2) Actualisation de la connaissance du système.....	14
II.2) Eléments de caractérisation in-situ	15
II.2.1) Synthèse des données expérimentales disponibles.	15
II.2.2) Contribution à un suivi du débit sur un sous-bassin versant.....	16

II.3) Modélisation hydrologique sous le logiciel SWMM.....	17
II.3.1)Présentation du logiciel SWMM.....	17
II.3.2)Bassin-versant étudié et objectifs de la modélisation hydrologique	18
II.3.3)Mise en œuvre du modèle :	19
ChapitreIII : Résultats	21
III.1) Connaissances et organigrammes sur le principe de gestion des EP urbaines	21
III.1.1) Exemple d'étude lot privé : Lot E3D.....	21
III.1.2) Exemple d'étude espace public : BVGS	23
III.2) Modélisation hydrologique du système	24
III.2.1) Mise ne œuvre du modèle.....	24
III.1.1) Modélisation sur la période courte	27
III.1.2) Modélisation sur la période longue	29
ChapitreIV : Discussion	33
Conclusion	34
Références bibliographiques	35
Webographie	36
LISTE DES ABREVIATIONS.....	37
RESUME	41
Abstract	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Bilan des paramètres estimés par la méthode BEST	15
Tableau II: Caractéristiques des événements pluvieux.....	28

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la ZAC Montjoie et de l'extension nord-est (DOSSIER DE DECLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU, 2013)	10
Figure 2: Températures moyennes annuelles relevées à Paris de 1900 à 2021(Agence Parisienne du Climat, 2022).....	11
Figure 3: Coupe sur piézomètre au 15/17 rue de Landy montrant la succession géologique du sol (DOSSIER DE DECLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU, 2013)	12
Figure 4: Délimitation du sous-bassin versant étudié BVGS	16
Figure 5: Point de mesure des hauteurs d'eau en amont du régulateur du débit(PLAN DE RECOLEMENT, 2016).....	17
Figure 6: Schéma du modèle générique de la performance LID type « Bio-retention » (Rossman, 2016a)....	18
Figure 7: Profil long des noues du BVGS montrant le sens d'écoulement des eaux de ruissellement (SEQUANO, 2014)	19
Figure 8: Modèle d'infiltration "Green-Ampt"(BEI ERE, s. d.).....	20
Figure 9: Analyse du permis de construire du lot E3D-Synthèse du système de gestion des EP sous forme d'organigramme	22
Figure 10: Organigramme BVGS-Espace public	24
Figure 11: Délimitation des sous BV du BVGS / Sens d'écoulement des eaux ruisselées sur le BVGS	25
Figure 12: Substrat de la noue étanche du BVGS (SEQUANO, 2017).....	25
Figure 13: Paramètres hydrodynamiques du sol des LID type « Rain Garden ».....	26
Figure 14: Courbes Hauteurs-Débits PVX (saint dizier ENVIRONNEMENT, 2022)	27
Figure 15: Variation du débit simulé et débit mesuré sur la période du 15/06/2022 au 24/07/2022.....	29
Figure 16: Bilan hydrologique du sous-bassin versant étudié "BVGS" sur la période courte.....	29
Figure 17: Bilan hydrologique du sous-bassin versant étudié "BVGS" sur la période longue.....	30
Figure 18: Courbes des précipitations et de la lame d'eau pour une période de retour <=6 mois	31
Figure 19: Courbes des précipitations, de la lame d'eau écoulée et du débordement du système (période de retour 5ans).....	32
Figure 20: Paramètres hydrodynamique du sol des noues.....	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Code de l'organigramme de la figure 9

Annexe B : Détails de calcul des paramètres hydrodynamiques du sol des LID

Annexe C : Interface graphique de l'application développée par Cerema

PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCEUIL



J'ai été accueilli dans le cadre de mon stage de fin d'études au Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains (LEESU). C'est un laboratoire commun à l'Université Paris-Est Créteil et à l'École des Ponts Paris Tech. Ses recherches s'organisent autour de l'eau urbaine sous différentes approches :

- Études physiques et hydrologiques (ruissellement, transfert dans le système urbain, milieux lacustres),
- Études biogéochimiques des émissions, du devenir et des effets des contaminants chimiques et microbiologiques dans le continuum ville/ouvrages/milieux récepteurs,
- Étude des politiques, des usages de l'eau, des pratiques et de leurs évolutions.

Le **LEESU** s'intéresse à l'analyse de l'impact du changement global (climat, urbanisme et construction, réglementation, pratiques, usages et pratiques de gestion) sur les flux d'eau et de contaminants en milieu urbain, depuis les précipitations jusqu'à leur devenir dans les milieux récepteurs.

Ce stage s'inscrit dans le cadre d'une collaboration entre des équipes de recherche (équipes ENPC-Leesu et Cerema) et l'EPT Plaine Commun. Il a été co-encadré par Mme. Marie-Christine Gromaire (ENPC-Leesu) et M. Jérémie SAGE (équipe Cerema).

INTRODUCTION

Face au développement urbain que connaît le monde entier, les villes sont de plus en plus soumises à des pressions croissantes auxquelles les réseaux d'assainissement centralisés classiques sont insuffisants à gérer. La saturation et par la suite le débordement des réseaux d'assainissement est à l'origine des inondations, ainsi que la dégradation de la qualité des milieux récepteurs.

A cet égard, les pouvoirs publics ont de plus en plus recours au principe de la gestion à la source des eaux pluviales (EP), en amont des réseaux. Ce principe consiste à opter pour des solutions alternatives qui intègrent la nature au cœur des plans de gestion des eaux pluviales.

La Zone d'Aménagement Concerté (ZAC) Montjoie, notre site d'étude, est un aménagement situé à la Plaine Saint Denis qui représente un exemple d'un quartier résilient et durable faisant appel à des solutions alternatives pour gérer les eaux pluviales et retenir un volume important de ruissellement à travers la mise en œuvre des dispositifs divers de rétention, d'abattement et de régulation des eaux de pluie des parcelles avant de se rejeter dans le réseau d'assainissement. Les dispositifs que comprennent notre site d'étude sont les suivants : noues paysagères étanches qui longent les voiries et les cheminements piétons, toitures végétalisées et jardins de pluie.

Le stage s'inscrit dans le cadre de l'observatoire OPUR, un programme de recherche dans le domaine de l'hydrologie urbaine. La présente étude a pour objectif principal d'analyser et d'évaluer le système de gestion des EP de la ZAC Montjoie. Cette évaluation s'appuie sur :

- Une analyse des permis de construction et vérification de la conformité des réalisations sur terrain (domaine public et îlots privés) pour préciser les schémas de gestion des eaux et relever les informations incertaines ou manquantes ;
- Une caractérisation in-situ du fonctionnement des ouvrages et un suivi des débits restitués à l'exutoire en aval de l'Avenue Georges Sand ;
- Une modélisation hydrologique du système de gestion des EP sous le logiciel SWMM pour évaluer l'efficacité des dispositifs mis en place

Les résultats produits au cours de ce stage contribueront à améliorer les connaissances sur les performances des ouvrages de gestion en amont des réseaux d'assainissement. Ils s'inscrivent dans le cadre du projet d'observatoire pérenne de la gestion à la source des eaux pluviales, un des thèmes du programme de recherche pérenne dans le domaine de l'hydrologie urbaine (OPUR, <https://www.leesu.fr/opur/>).

Chapitre I: Etat de l'art

I.1) Contexte général de la gestion des eaux pluviales

I.1.1) Impact de l'urbanisation sur le cycle de l'eau et la qualité des milieux récepteurs

L'imperméabilisation des sols suite à l'urbanisation croissante que connaît le monde entier, conduit à une augmentation massive des volumes ruisselés, au détriment de la réalimentation du stock d'eau des sols, de l'alimentation des nappes et de l'évapotranspiration. De ce fait, l'urbanisation modifie le temps de réponse des bassins versants qui varie selon le degré d'urbanisation du bassin. En effet, la réponse d'un bassin versant urbain est plus rapide qu'un bassin versant rural. D'où l'augmentation des débits ruisselés, causant la saturation des réseaux d'assainissement et le refoulement des eaux du réseau qui débordent dans les rues (Inondation par ruissellement pluvial).

De plus, les rejets du réseau d'assainissement unitaire ou séparatif modifient la qualité des milieux récepteurs est toujours altérée. En effet, la quasi-totalité des activités humaines émettent des polluants. Ces derniers qui s'accumulent surtout pendant les périodes sur les surfaces urbaines sèches, seront transportés par les eaux de ruissellement lors des événements pluvieux. Ces eaux pluviales contaminées seront donc rejetées dans des milieux récepteurs sans traitement.

I.1.2) Limites d'une gestion « tout-tuyau » des eaux pluviales

Au 19^{ème} siècle et suite à la prolifération des épidémies en Europe qui étaient à l'origine de la surmortalité, les eaux stagnantes issues des eaux pluviales ou des eaux usées ont été considérées dangereuses et nuisibles. A ce moment, les premières opérations de gestion des eaux urbaines commencent en France, et plus précisément à Paris (THEBAULT et al. s. d.).

Après la loi du tout-à-l'égout du 10 Juillet 1894, les réseaux de collecteurs et d'égouts de la ville de Paris et de sa banlieue ont été développés et centralisés pour évacuer à la fois les eaux usées et les eaux pluviales à l'aval loin de la ville de Paris, dans le but d'assurer la salubrité du milieu urbain.

Dans les années 1950, et avec l'accélération de l'urbanisation, les capacités auto-épuratoires des milieux récepteurs sont devenues insuffisantes pour traiter les eaux, sans oublier que lors de fortes pluies, les réseaux unitaires débordent et les eaux usées polluent les rues. Il a été décidé de séparer les réseaux d'égouts et de passer du réseau unitaire au réseau séparatif. Les eaux usées vont directement à la première station d'épuration construite en 1940, alors que les eaux pluviales se rejettent directement dans les cours d'eau (THEBAULT et al. s. d.).

Cependant, dans quelques cas, les réseaux séparatifs se développent en amont des anciens réseaux unitaires, et alors les eaux pluviales finissent par rejoindre les eaux usées. De ce fait, les problèmes de saturation des réseaux d'égouts, des stations de traitement ainsi que la pollution des milieux récepteurs persistent.

Vers les années 1960, et avec le développement urbain en région parisienne, les réseaux d'eaux pluviales se montrent incapables de gérer la ressource en eau face à l'extension du tissu urbain. Donc, il fallait penser à d'autres solutions « alternatives » aux réseaux d'égouts, qui peuvent compenser les effets de l'urbanisation.

Ces solutions ont commencé par la mise en place des bassins de retenue où les eaux sont stockées et régulées avant leur évacuation. Dans les années 1970, la France s'est engagée dans une réflexion de gestion intégrée des eaux pluviales urbaines. Le but est de reprendre le cycle naturel de l'eau dans un cadre de développement d'urbanisme continu (THEBAULT et al. s. d.).

I.2) La gestion intégrée des eaux pluviales

I.2.1) Principes de la gestion intégrée des eaux pluviales

La gestion intégrée des eaux pluviales urbaines est une approche qui permet de gérer les EP urbaines à la source, c'est-à-dire au plus près de leur point de chute avant (éventuellement) de les rejeter, à débit régulé, dans les réseaux d'assainissement. Elle fait appel à des solutions alternatives au « tout-tuyau », souvent fondées sur la nature et intégrées dans les plans d'aménagement au cœur des milieux urbains. Ces techniques favorisent le stockage, l'infiltration et l'évapotranspiration des pluies courantes ainsi que la dépollution des EP.

Le principe de la gestion intégrée est de tenir compte des exigences environnementales en milieu urbain, et de garantir l'abattement des pluies courantes à la parcelle avant de se rejeter dans le réseau d'assainissement. Elle permet d'une part d'améliorer la résilience des villes face aux inondations par ruissellement, et d'autre part, elle permet de limiter la dégradation de la qualité des milieux récepteurs.

I.2.2) Cadre réglementaire

L'évolution de la loi sur l'eau au fil des années a permis de mener une gestion durable par des projets et des obligations qui visent la prévention des inondations en milieu urbain et la protection de la ressource en eau.

Dans le cadre européen, la loi sur l'Eau du 16 décembre 1964 a défini le principe de gestion de l'eau par grands bassins hydrographiques et la création d'établissements publics pour chaque bassin versant : le Comité du bassin qui élabore le plan de gestion des EP en fonction des besoins du bassin en cohérence avec les orientations nationales et les directives européennes, et l'Agence de l'Eau qui veille à l'exécution des actions fixées par le Comité du bassin (Vie-publique.fr 2019).

La loi sur l'eau du 3 janvier 1992 a considéré l'eau comme patrimoine commun de la Nation qu'il faut préserver. Elle a mis en place les outils de planification d'une gestion globale et équilibrée des EP : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) au niveau des grands bassins versants, et le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) pour les sous-bassins.

Les lois sur l'eau en France sont encadrées par la Directive-Cadre Européenne sur l'eau (DCE) publiée en 2000, qui fixe des plans d'actions pour mettre fin à la dégradation de la qualité des eaux et des milieux aquatiques et pour garantir un usage rationnel et durable de l'eau. L'objectif est d'atteindre un bon état des masses d'eau (Vie-publique.fr 2019).

La Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) du 30 Décembre 2006 est élaborée pour renforcer les moyens d'atteindre les objectifs de la DCE. Elle a apporté une nouvelle orientation concernant la prise en compte du changement climatique dans la gestion des eaux pluviales.

La Directive Inondation du 23 octobre 2007 est relative à la gestion des risques d'inondations causées par les effets combinés du changement climatique et l'urbanisation excessive. Elle fixe les objectifs de réduction des conséquences néfastes des inondations par ruissellement ou débordement sur la vie des humains et leurs biens.

En 2015, la loi portant sur la Nouvelle Organisation Territoriale de la République (NOTRe) a attribué à titre obligatoire qui les compétences « Eau et Assainissement » aux communautés d'agglomération et aux communautés de communes.

Les Articles 191 et 192 de la Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 de la lutte contre le dérèglement climatique et le renforcement de la résilience face à ses effets, ont fixé un objectif de réduction de l'artificialisation et de son rythme afin d'atteindre l'objectif national d'absence de toute artificialisation nette du sol en 2050 (MACRON 2021). Dans le cadre national, on trouve plusieurs articles concernant la réglementation des eaux pluviales dans plusieurs codes : code civil, code de l'environnement et code de l'urbanisme, qui imposent des prescriptions précises en matière de considération de gestion des EP dans les permis de construire (Devers 2005). En plus, la gestion des EP urbaines est intégrée dans quelques documents d'urbanisme : A l'échelle des bassins et régions, le SDAGE et le SAGE définissent les grandes orientations respectivement à l'échelle nationale et à l'échelle d'un bassin hydrographique de la gestion rationnelle et durable de la ressource en eau. A l'échelle locale, le zonage pluvial (annexé au Plan Local d'urbanisme (PLU)), et un outil d'aide à la décision. Il permet aux collectivités de définir les zones où il faut maîtriser l'imperméabilisation des sols, ainsi que les zones où il faut prévoir des dispositifs favorisant l'infiltration des eaux à la parcelle en amont des réseaux d'assainissement (Devers 2005).

I.3) Projet d'observatoire de la gestion à la source des eaux pluviales dans le programme OPUR

Le stage s'inscrit dans le cadre de l'observatoire OPUR, un programme de recherche dans le domaine de l'hydrologie urbaine, qui s'étend sur cinq phases. Il a été développé par le Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (Leesu) à partir de 1994. Il a pour but d'améliorer et d'enrichir les connaissances sur les flux d'eau et de contaminants en milieu urbain, en tenant compte des différents changements urbains et climatiques. OPUR est fondé sur un partenariat étroit entre les

chercheurs et les acteurs opérationnels de l'eau et de l'assainissement en Île de France. La phase actuelle du programme OPUR correspond à la phase 5 (2019-2023), qui est organisée en trois blocs : « Recherche », « Observation pérenne » et « Valorisation ». Le sujet du stage fait partie du thème O1 : Observatoire de la gestion à la source des eaux pluviales du Bloc « Observation Pérenne ». Cet observatoire est mis en place pour répondre au besoin de suivre sur de longues périodes les performances des ouvrages de la gestion à la source des eaux pluviales. Il a deux objectifs principaux :

- Analyser la durabilité des techniques alternatives de gestion à la source des eaux pluviales dans les quartiers où elles sont mises en œuvre.
- Évaluer la performance et l'efficacité des ouvrages de gestion intégrée des eaux pluviales à l'échelle d'un quartier fournissant un exemple d'application des mesures de gestion des eaux pluviales.

C'est dans le cadre de cet observatoire, que le présent stage a été proposé pour évaluer et caractériser le système de gestion des eaux pluviales d'un secteur de la ZAC Montjoie en vue d'un suivi de long terme. Le travail sur cet observatoire a été initié l'année dernière avec une documentation, des mesures terrains ainsi que des entretiens avec les acteurs du projet d'aménagement.

I.4) Présentation du site d'étude

I.4.1) Contexte géographique

La ZAC Montjoie se situe dans le quartier de la Plaine Saint-Denis dans la commune de Saint-Denis, en limite communale avec Aubervilliers. La zone d'étude correspond à l'extension nord-est de la ZAC Montjoie. Elle s'étend sur une superficie de 10 ha. Elle est limitée au nord par la rue du Landy, à l'est par la rue des Fillettes, au sud par la rue d'Amilcar Cabral et à l'ouest par la rue de la Procession. La zone d'étude est constituée de sept îlots privés qui comportent des logements, bureaux, un internat et des équipements publics. Pour les espaces publics, ils aménagées d'un réseau de noues étanches.



Figure 1: Localisation de la ZAC Montjoie et de l'extension nord-est (DOSSIER DE DECLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU 2013)

La zone d'étude est soumise à un climat de type océanique dégradé, suite à l'éloignement de la côte. L'influence océanique est présente mais le climat peut subir des influences continentales. Cette influence se répercute sur les pluies qui diminuent, les hivers qui deviennent plus froids et les étés plus chauds qu'un climat océanique (Les climats de France 2013)

Ce climat est altéré davantage à cause des effets du changement climatique, couplés aux effets de l'élargissement du tissu urbain, ce qui rend plus prégnant le phénomène des îlots de chaleur urbains (L'évolution du climat à Paris 2022).

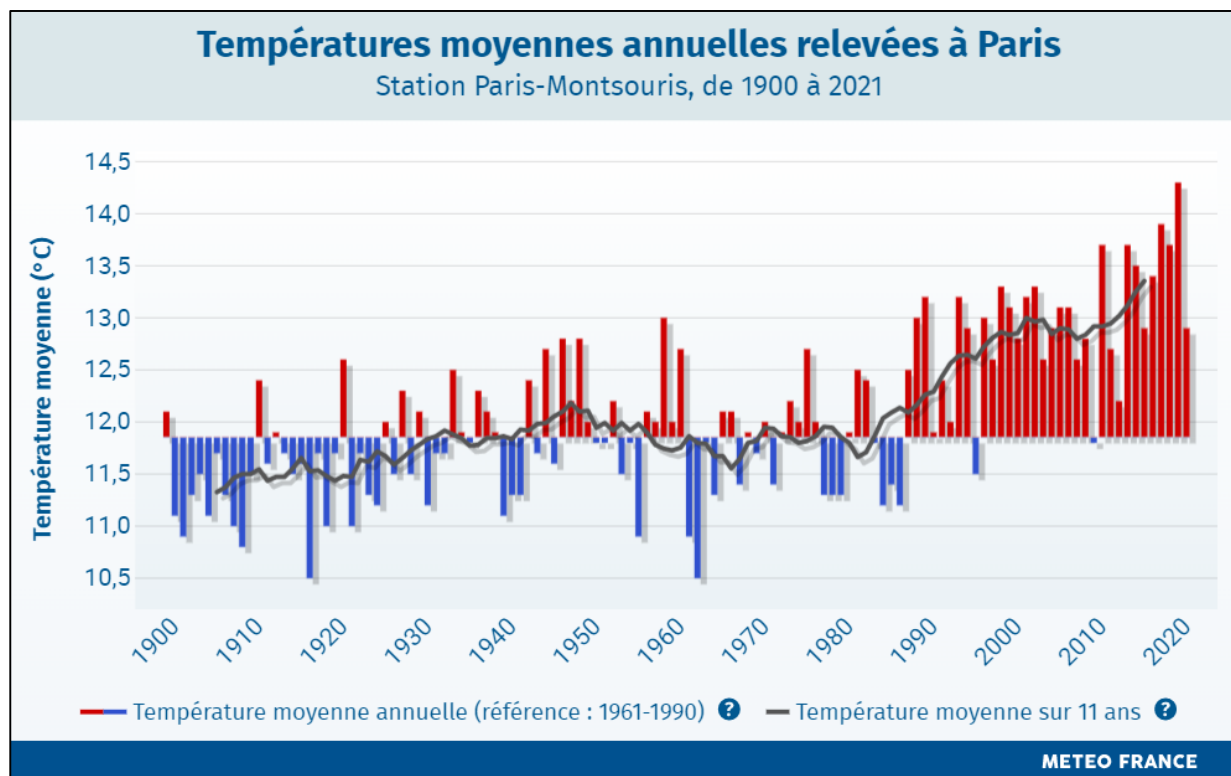


Figure 2: Températures moyennes annuelles relevées à Paris de 1900 à 2021 (L'évolution du climat à Paris 2022).

En ce qui concerne la géologie de la zone d'étude, la plus récente étude a été menée par FUGRO Géoconsulting à la demande de l'aménageur BNP Paribas. Les trois études du sol ont été réalisées sur les points suivants : 15/17 rue de Landy, 23 rue des Fillettes et 27/29 rue des Fillettes.

La figure 3 montre la succession géologique du sol au 15/17 rue de Landy (DOSSIER DE DECLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU 2013).

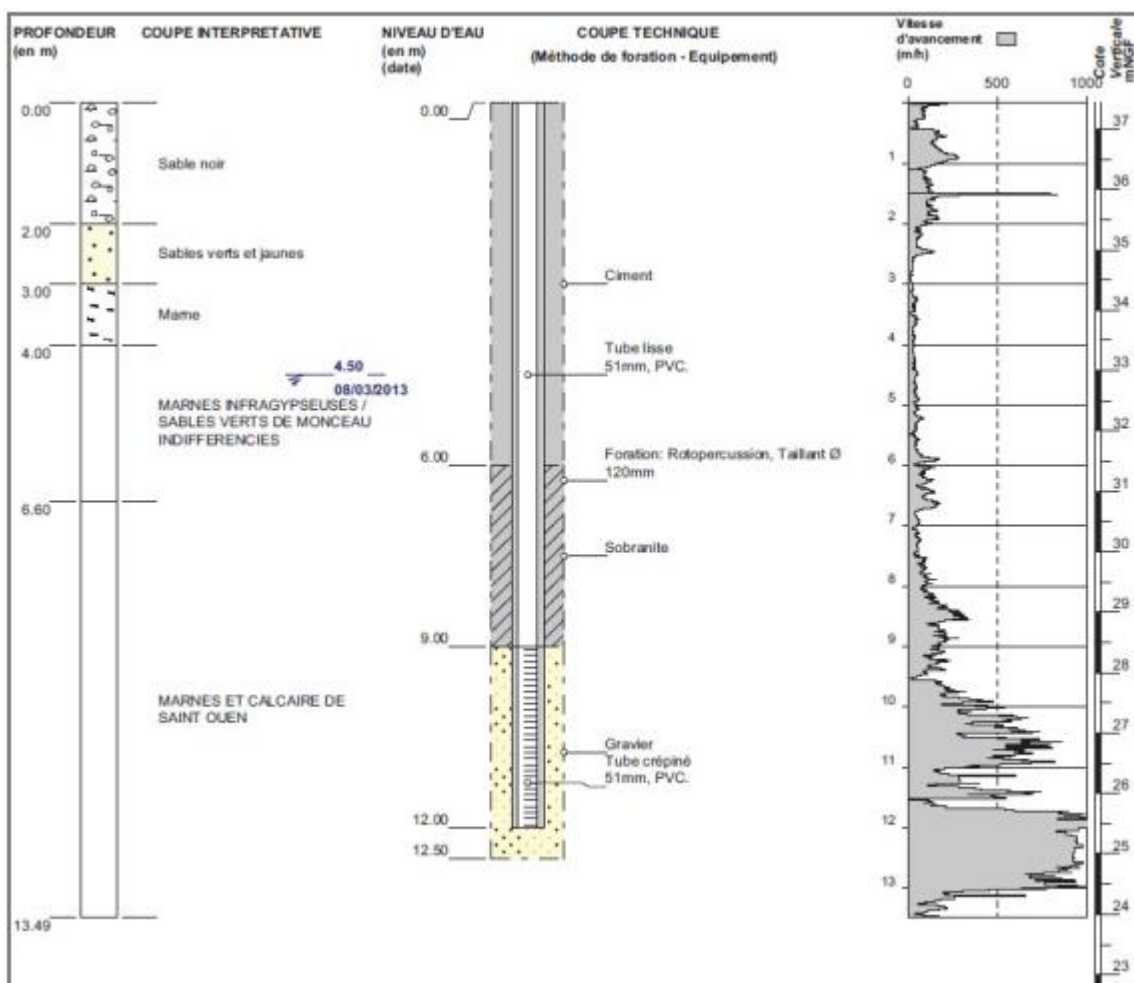


Figure 3: Coupe sur piézomètre au 15/17 rue de Landy montrant la succession géologique du sol (DOSSIER DE DECLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU 2013)

La zone d'étude est exposée à un risque naturel de dissolution du gypse antéludien. C'est pour cette raison que les noues des espaces publics sont étanches (DOSSIER DE DECLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU 2013)

I.4.2) Projet d'aménagement et historique de l'occupation du sol

La Plaine Saint-Denis était un ancien site fortement industrialisé entre les années 1850 et 1960. Avec la désindustrialisation, il est devenu un quartier urbain avec des activités du secteur tertiaire. La ZAC Montjoie a été créée en 1988, elle couvrait une superficie de 21 ha. Les opérations d'aménagement de cette zone ont été confiées à la société « SEGUANO Aménagement ». (DOSSIER DE DECLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU 2013)

En 2006, la ZAC Montjoie a été transférée de la ville de Saint-Denis à la Communauté d'agglomération de la Plaine Commune, qui a mené une réflexion d'étendre et élargir la partie nord-est de la ZAC Montjoie en 2007 et 2008. Cette extension a une superficie de 10 ha, qui porte ainsi la superficie totale de la ZAC Montjoie à 30 ha.

I.4.3) Principe de gestion des eaux pluviales

Le principe de gestion des eaux pluviales consiste à gérer les EP à la source, au plus près de leur point de chute. Dans l'espace privé, le principe de la gestion des eaux pluviales repose sur la création d'un réseau de collecte et de stockage des EP à ciel ouvert (toiture végétalisées, jardins de pluie, bassins de rétention...etc.) avant de se rejeter à débit régulé (10 l/s/h jusqu'à la pluie décennale) vers l'espace public (ATM et SEQUANO 2016). Ce dernier doit être capable de gérer les eaux de ruissellement issues de la voirie et des lots privés via un réseau de noues étanches. L'objectif de la gestion intégrée des EP est l'abattement des pluies courantes par la mise en œuvre des dispositifs qui assurent le stockage et la régulation des EP. De ce fait, l'aménagement de la ZAC Montjoie fournit un exemple d'application à l'échelle d'un quartier des principes de gestion des EP urbaines qui prennent en compte la gestion des EP et les exigences environnementales dans les projets d'aménagement et d'urbanisme.

Chapitre II: Matériel et Méthodes

II.1) Amélioration de la connaissance des principes de gestion des EP urbaines et de la conception du système

II.1.1) Organisation et traitement de données

Le travail sur ce sujet a été initié l'année dernière par un stagiaire qui a commencé une première documentation et caractérisation du site. Il a procédé à la collecte des données (plans de l'espace public, permis de construire des îlots privés, notices paysagères et hydrauliques) auprès des différents acteurs qui ont intervenus sur le projet. Tout d'abord, nous avons commencé par lire et parcourir tous les documents collectés, afin de mieux comprendre le fonctionnement du système de gestion des EP mis en place dans la ZAC Montjoie. Ensuite, ces documents ont été organisés et regroupés selon l'aménagement concerné (espace public ou îlots privés) et leur type ainsi que leur date de création (permis de construire, notice hydraulique, note paysagère, plan de masse, plan de récolement, les profils en long, fichiers SIG...etc.). Ainsi, une base de données a été créée et constituera la base de l'analyse et de l'évaluation du système de gestion des EP.

II.1.2) Actualisation de la connaissance du système

Pour comprendre le fonctionnement du système de gestion des eaux pluviales, nous avons procédé à une analyse approfondie de toute la base de données créée. Au niveau de l'espace public, nous nous sommes basés principalement sur les plans de récolement dans la mesure où ils décrivent les travaux réellement réalisés à la fin du chantier. Alors qu'au niveau des espaces privés où il y a sept lots privés (F2A, E2a, E2b, E3D, F1, E3abc), nous nous sommes référés aux documents les plus récents qui sont les permis de construire. Aucun document n'avait été collecté pour les lots F1 et E3D, ils ont été recueillis auprès de la Direction de l'Eau et de l'Assainissement de Plaine Commune (DEA).

Après avoir analysé les documents disponibles et demandés auprès de la DEA, une première visite de terrain a été effectuée, pour confirmer certains aspects de la conception des ouvrages de l'espace public. Il n'a pas été possible d'accéder aux lots privés, mais il a été possible d'observer quelques ouvrages depuis l'extérieur, et confirmer certaines connexions avec les noues. En faisant le lien entre les observations sur le terrain, l'analyse des photos aériennes et les permis de construire, on a pu confirmer la localisation des points de rejets dans le réseau de noues paysagères.

Les données qui ont été tirées de l'analyse des permis de construire et des visites terrain ont été synthétisées sous forme de tableaux pour chaque lot privé, où on trouve les caractéristiques de chaque lot et chaque dispositif de gestion des eaux pluviales. En se basant sur ces tableaux, nous avons schématisé le système de gestion des eaux pluviales sous forme d'organigrammes pour chaque lot privé en choisissant un code représentatif pour les diverses techniques alternatives mise en œuvre

dans la ZAC Montjoie, ainsi que les différentes fonctions qu'elles assurent.

II.2) Eléments de caractérisation in-situ

Outre la synthèse documentaire et les visites de terrain, l'analyse du fonctionnement du système de gestion des EP s'appuie également sur des éléments de caractérisation in-situ : des essais d'infiltrations et un suivi de débit.

II.2.1) Synthèse des données expérimentales disponibles.

Les données expérimentales sur les propriétés hydrodynamiques du sol produites dans le cadre du stage de l'année dernière, en faisant des tests d'infiltration avec la méthode Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) (Kanzar, Sahraoui, et Mariem 2016). C'est une méthode robuste, facile et peu coûteuse qui permet de caractériser le comportement hydrodynamique du sol. Elle repose sur une analyse granulométrique du sol et un essai d'infiltration à simple anneau.

Elle est utilisée pour déterminer la courbe de rétention d'eau $\theta(h)$ et la courbe de la conductivité hydraulique $K(h)$ définies par leurs paramètres de forme et d'échelle.

La méthode BEST repose sur l'équation de Van Genuchten (1980) pour la courbe de rétention :

$$\theta = \frac{\theta_s}{\left(1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right)^{\frac{m}{n}}}$$

Quant à la courbe de conductivité hydraulique, elle se base sur l'équation de Brooks et Corey (1964) :

$$K = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta$$

Avec : : Humidité du sol correspondante à la pression h

θ_s : Humidité du sol à saturation

K : Conductivité hydraulique du sol correspondante à l'humidité θ

K_s : Conductivité hydraulique à saturation

h_g : Paramètre d'échelle

m , n et η : Paramètres de forme

En effet, les essais et les prélèvements ont été réalisés dans quatre endroits répartis sur toute la zone d'étude. Le tableau I montre les paramètres estimés par la méthode BEST pour les différents essais.

Tableau I: Bilan des paramètres estimés par la méthode BEST

ID	m	n	η	K_s (m s-1)	h_g (mm)	S (mm s-0.5)	θ_s (m3/m-3)
Best1	0.1	2.223	11.959	2.34E-05	-63.4518	1.017	0.487
Best2	0.103	2.23	11.684	2.89E-06	-196.869	0.584	0.445
Best3	0.096	2.213	12.39	5.32E-06	-68.25	0.553	0.547
Best4	0.081	2.177	14.295	4.78E-06	-120.818	0.62	0.46

II.2.2) Contribution à un suivi du débit sur un sous-bassin versant

La zone d'étude est constituée de trois sous-bassins versants. La modélisation du système de gestion des eaux pluviales ne concernera que le sous-bassin versant associé à l'Avenue Georges Sand et l'est de la rue Amilcar Cabral (BVGS). Comme la montre la figure 4, BVGS est composé des cheminements piétons et des voiries, qui génèrent les eaux de ruissellement et qui se rejettent après dans un réseau de noues.



Figure 4: Délimitation du sous-bassin versant étudié BVGS

Les EP du BVGS sont collectées dans un réseau de noues en série. A l'extrémité aval de ce réseau de noues, au niveau de l'intersection de l'avenue de Georges Sand et la rue de Landy, les eaux circulant en surface de la noue sont collectées via une grille dans un premier regard et évacuées par un tuyau Ø 300 vers le réseau d'assainissement de la rue de Landy. Elles traversent un premier regard de visite, puis un second dans lequel est implanté un régulateur de débit à effet Vortex, modèle PVX120, comme la montre la figure 5.

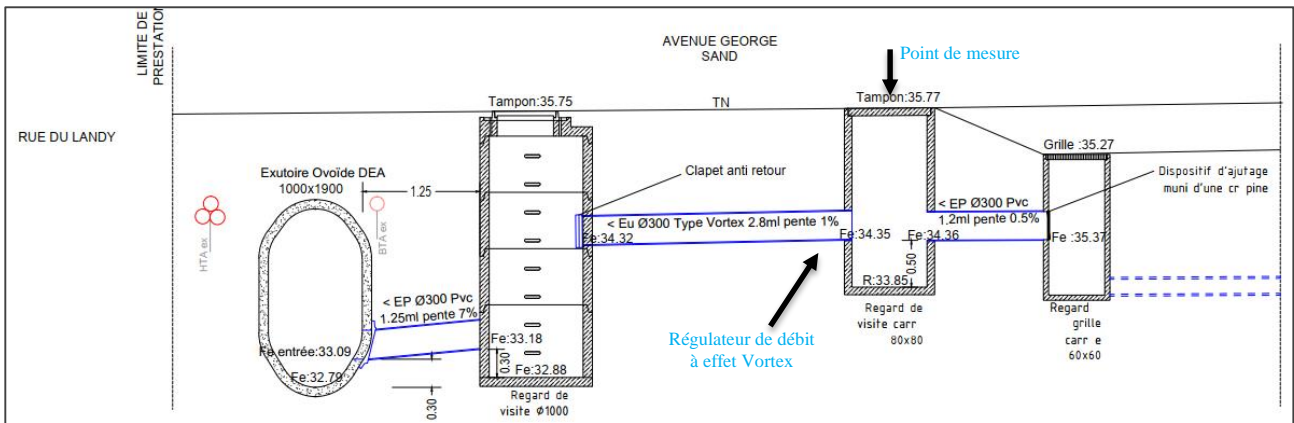


Figure 5: Point de mesure des hauteurs d'eau en amont du régulateur du débit (PLAN DE RECOLEMENT 2016)

Les mesures d'hauteurs d'eau ont été réalisées durant la période du 15/06/2022 au 01/08/2022, qui correspond à une durée de 77 jours, pour une pluie totale de 36.20 mm.

Le protocole de mesure repose sur l'utilisation de la sonde LevelTROLL. Elle mesure la pression hydrostatique de l'eau pour calculer la hauteur d'eau au-dessus du capteur. Ces hauteurs d'eau mesurées vont être transformées en débits en appliquant la loi du régulateur à effet Vortex PVX120. Ce suivi nous permettra donc de confronter les débits simulés à l'exutoire aux données acquises.

II.3) Modélisation hydrologique sous le logiciel SWMM

II.3.1) Présentation du logiciel SWMM

Storm Water Management Model (SWMM) est un logiciel de modélisation des systèmes de gestion des eaux pluviales, des réseaux unitaires ou d'autres systèmes de drainage, en hydrologie urbaine. Il a été développé par l'Environmental Protection Agency (EPA) pour modéliser la dynamique des écoulements (la quantité et la qualité du ruissellement) produit sur les bassins urbanisés. Il intègre un modèle hydrologique qui simule la transformation pluie-débit pour un événement pluvial unique ou une chronique continue reçues sur un ensemble de bassins versants (Rossman 2016a).

La partie routage du SWMM (modèle hydraulique) transporte le ruissellement généré à travers un réseau de conduites, ou des ouvrages hydrauliques de stockage, régulation et traitement des eaux. Cela permet d'observer et d'analyser le fonctionnement et la réponse d'un bassin versant ou d'un réseau d'eaux pluviales/usées face aux différents événements pluvieux en termes de quantité et de qualité des eaux ruisselées. SWMM utilise le modèle de réservoir non linéaire pour estimer le ruissellement de surface sur un bassin versant (Rossman 2016a). Il utilise l'équation de Manning pour exprimer le débit de sortie (Q) en (CFS):

$$Q = \frac{1.49}{n} A R^{2/3} S^{1/2}$$

Avec : n : le coefficient de Manning, A : la surface de la section transversale (ft²), R : Rayon

hydraulique (ft) et S : la pente (ft/ft)

SWMM présente la particularité de modéliser des bassins versants urbanisés mettant en œuvre les différentes techniques alternatives de gestion des eaux pluviales. Dans ce logiciel, ces techniques alternatives correspondent, aux structures « LID » (Low Impact Development), qui sont conçues pour la rétention des eaux pluviales à la parcelle, en favorisant l'infiltration et l'évapotranspiration. En effet, il existe différents types de LID, comme « Bio-retention Cells », « Rain Gardens », « Green Roofs », « Infiltration Trenches », « Vegetative Swales »...etc. La figure 6 représente un schéma du modèle générique de la performance LID de type « Bio-retention ». Ce modèle peut être personnalisé selon les besoins pour décrire le comportement d'autres types de contrôles LID. En effet, un LID de SWMM est une représentation 1D des ouvrages de gestion des EP. Il permet le stockage en surface et le transfert d'eau vertical à travers une, deux ou trois couches (selon le type du LID), avant stockage éventuelle dans une couche de stockage/ drainage sous-jacente et exfiltration possible vers le sous-sol.

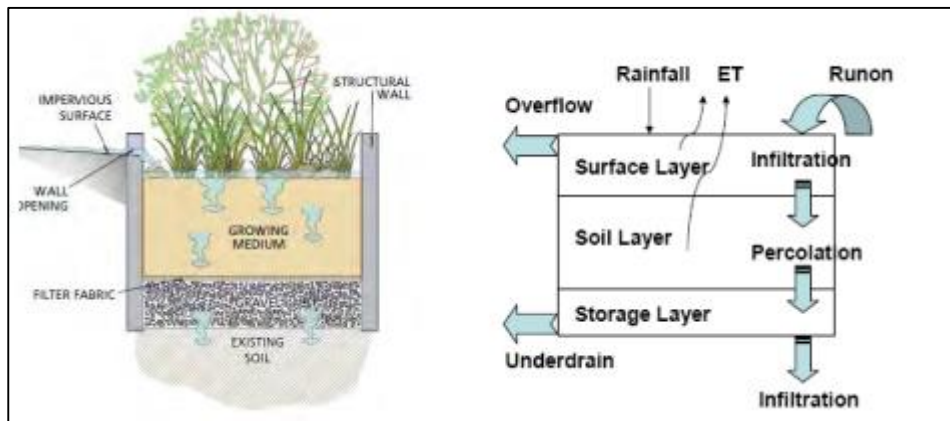


Figure 6: Schéma du modèle générique de la performance LID type « Bio-retention » (Rossman 2016b)

II.3.2) Bassin-versant étudié et objectifs de la modélisation hydrologique

Les apports depuis les parcelles pour des pluies courantes sont négligeables, du fait de l'abattement du ruissellement dans les ouvrages de gestion à la parcelle. Donc, on s'intéresse en premier lieu au fonctionnement du système dans l'espace public. Nous avons choisi de modéliser le système de gestion des EP du sous-bassin versant associé à l'Avenue Georges Sand et l'Est de la rue Amilcar Cabral « BVGS ». Il est composé des cheminements piétons et des voiries dont les eaux de ruissellement se rejettent dans un réseau de noues. Le fonctionnement du système de gestion des EP dans le BVGS se présente comme suit : Les eaux des précipitations tombent sur les surfaces imperméabilisées du bassin versant. Avant de se rejeter dans l'exutoire, ces eaux ruissèlent d'abord vers les talus de la noue, en suivant la pente du terrain. Ensuite, ces eaux suivent la pente des talus pour arriver au fond de la noue. Après, les eaux passent d'une noue à une autre en traversant des orifices calibrés et de diamètre croissant de l'amont vers l'aval. Ces orifices assurent la fonction de

régulation de ces eaux.

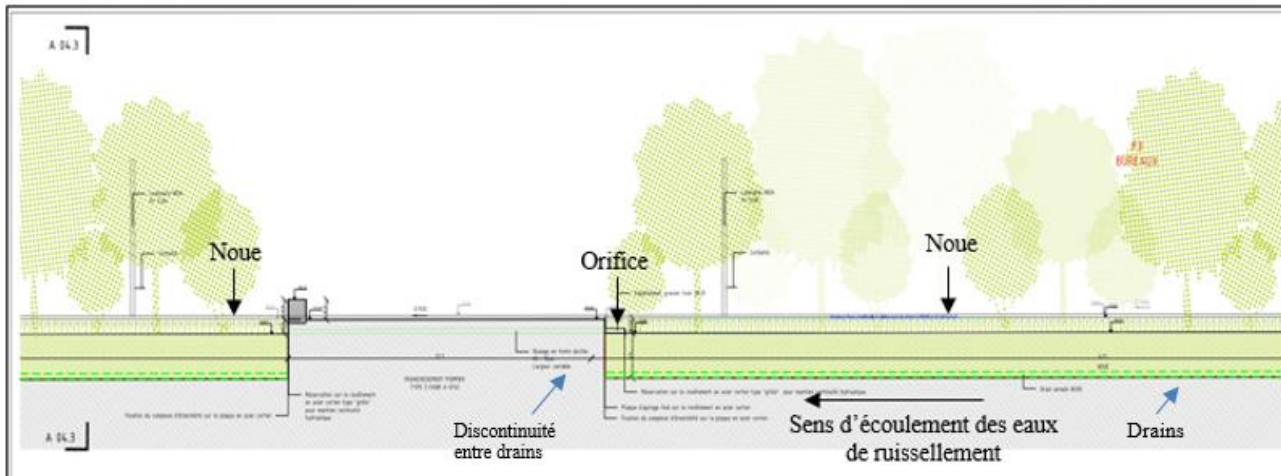


Figure 7: Profil long des noues du BVGS montrant le sens d'écoulement des eaux de ruissellement (SEQUANO 2014)

La modélisation hydrologique a pour objectif général de mieux comprendre le fonctionnement du système de gestion du BVGS. Les simulations seront lancées pour deux périodes différentes qui correspondent à deux séries temporelles de pas de temps de 5 min. Ces simulations permettront de :

- Sur la période d'observation étudiée du 15/06/2022 au 01/08/2022, de confronter les débits simulés à l'exutoire aux données acquises suite au suivi des hauteurs au point de mesure aval.
- Sur une chronique longue de précipitations et évapotranspiration en Île de France, du 01/01/1993 au 31/12/2008, pour analyser le fonctionnement du système de gestion des eaux pluviales à long terme.

II.3.3) Mise en œuvre du modèle :

La modélisation hydrologique sous le logiciel SWMM nécessitera en premier lieu la construction du modèle qui servira par la suite à la simulation du système de gestion des eaux pluviales. La mise en œuvre du modèle sous SWMM suppose un découpage du BVGS en sous-BV sous l'outil QGIS et la détermination de leurs caractéristiques géométriques. En effet le découpage se base sur les critères suivants : le premier critère est la nature des surfaces : surfaces d'apports (chaussées et cheminements piétons) et surfaces de rétention des EP (noues paysagères). Le deuxième critère est le sens d'écoulement des EP qui suit la pente du BVGS. En se basant sur ces critères, le BVGS a été découpé en 22 sous-BV correspondant aux chaussées et cheminement piétons et 8 sous-BV correspondant aux noues paysagères.

Pour la modélisation du BVGS sous SWMM, il fallait revoir la délimitation des noues paysagères. En effet, deux possibilités ont été proposées puisqu'il était un peu compliqué de représenter la forme géométrique des noues telle quelle dans la réalité ; la première consiste à considérer chaque noue comme bassin versant. Cette proposition ne prend pas en compte la pente des talus de la noue. Donc

on est passé à la deuxième proposition qui consiste à considérer les talus de la noue comme un BV et le fond de la noue comme un autre BV à part.

La deuxième proposition est celle qu'on a choisi puisqu'elle traduit fidèlement le comportement hydrologique des noues : les eaux ruisselées générées par les surfaces imperméabilisées s'écoulent premièrement vers les talus de la noue en suivant leur pente. Après, ces eaux sont récupérées dans le fond de la noue pour s'écouler vers l'exutoire en suivant une pente différente de celle des talus.

Donc chaque noue sera découpée en deux sous.BV : le premier correspond au fond de noue et le deuxième au talus de la noue dont 100 % de la surface de chacun sera affecté aux LID.

Le modèle sera constitué donc de : 22 BV imperméables (BV1, BV2,..., BV22), 8 BV fond de noue (FN1, FN2,..., FN8) et 8 BV Talus (T1, T2,..., T8). La figure 11 montre le sens d'écoulement des eaux de ruissellement dans SWMM.

Avant d'analyser la performance du système de gestion des EP, nous devons définir certaines options qui déterminent comment l'analyse sera effectuée. Pour le modèle d'infiltration on a choisi « Green-Ampt ». Il suppose que l'eau s'infiltre progressivement dans un sol supposé homogène et il considère que le front de saturation est horizontal. C'est un modèle simple qui est utilisé pour représenter l'infiltration dans les ouvrages de gestion des EP.

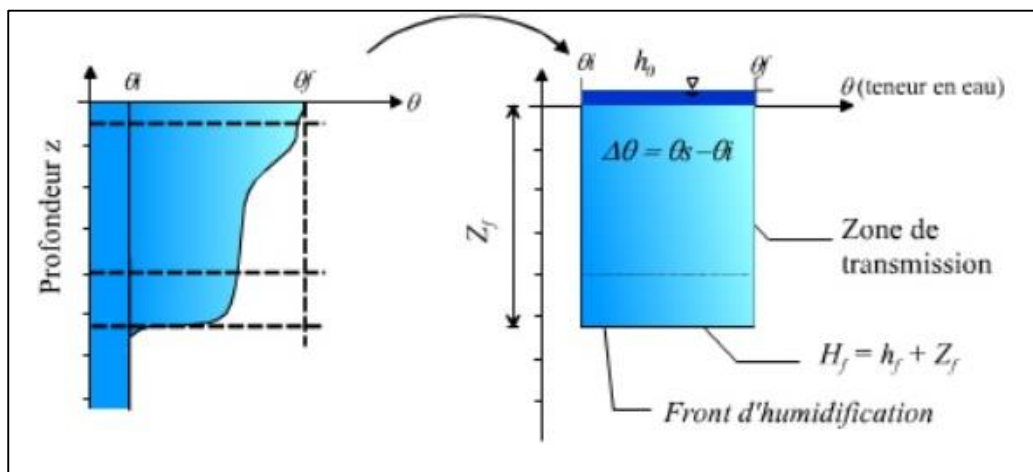


Figure 8: Modèle d'infiltration "Green-Ampt"

Chapitre III: Résultats

III.1) Connaissances et organigrammes sur le principe de gestion des EP urbaines

Dans la zone d'étude, les précipitations suivent un cheminement bien défini jusqu'à l'exutoire : les précipitations sont collectées et stockées à ciel ouvert au niveau des îlots privés à différents niveaux (toitures végétalisées, toitures avec système Nidarroof, jardins de pluie, bassin de rétention, espaces verts...). La végétation présente dans ces dispositifs permet aussi de décanter les polluants contenus dans les eaux de ruissellement. Dans les îlots privés, cheminements piétons et les terrasses accessibles privilégient des revêtements de sol poreux comme les platelages bois, béton drainant et pavage à joints larges. En effet, l'excédent d'eau qui ne sera pas capté ces toitures, se rejette vers des espaces verts en pied d'immeuble (bassins de rétention végétalisées, noues intérieurs...etc). Ensuite, les eaux qui ne seront pas captées par les ouvrages de gestion des EP dans les lots, seront dirigées vers les noues paysagères de l'espace public. Le rejet dans l'espace public se fait gravitairement à débit régulé. Pour expliquer davantage le cheminement des EP du point de leur chute jusqu'à l'exutoire, nous avons choisi le lot E3D comme exemple d'étude.

III.1.1) Exemple d'étude lot privé : Lot E3D

Ce lot présente beaucoup d'informations détaillées qu'on a trouvé dans les permis de construire du lot E3D réalisés en mois de mars 2014, ainsi que les notices de gestion des EP. Il est constitué d'un groupe scolaire, un gymnase et des logements. Il fait en totalité 7832 m² avec un débit de fuite de 7.8 l/s, puisque le règlement d'assainissement de la Plaine Commune impose un débit de rejet de 10 l/s /ha pour une pluie d'occurrence décennale.

La figure 9 représente l'organigramme de gestion qui synthétise le système de gestion des EP dans le lot E3D. Cet organigramme se lit de gauche à droite. Sur la première colonne, on trouve les surfaces d'apport (surfaces imperméables), qui sont représentés par des flèches blanches. Les eaux de ruissellement générées par ces surfaces d'apport se rejettent dans les ouvrages de gestion des eaux pluviales de la deuxième colonne. Ces derniers sont représentés par différentes formes géométriques selon l'état d'étanchéité et la fonction assurée. Il s'agit des toitures végétalisées, des espaces verts en pleine terre ou sur dalle, qui assurent des fonctions de stockage, régulation ainsi que l'abattement par exfiltration ou par évapotranspiration. A noter que les toitures végétalisées sont équipées de limiteurs de débit pour la régulation des eaux de précipitation avant leur rejet soit dans les noues intérieures, soit dans les bassins de rétention. Ces bassins de stockage étanches sont au nombre de deux ; le premier au RDC et le deuxième en R-1. Quand ces bassins seront pleins, les eaux stockées seront relevées par pompage pour qu'elles se rejettent dans les noues paysagères. L'annexe A est le code d'organigramme qui nous permettra de lire la figure 9.

Pour assurer la pérennité du principe de gestion des eaux pluviales, il faut éviter toute technisation des dispositifs de collecte et de transport par des pompes de relevage, or lorsqu'on se retrouve face à un aménagement de très grande surface qui génère des volumes d'eaux ruisselées importants, les ouvrages souterrains de stockage qui nécessitent l'utilisation des pompes pour les vider, seront permis à titre exceptionnel.

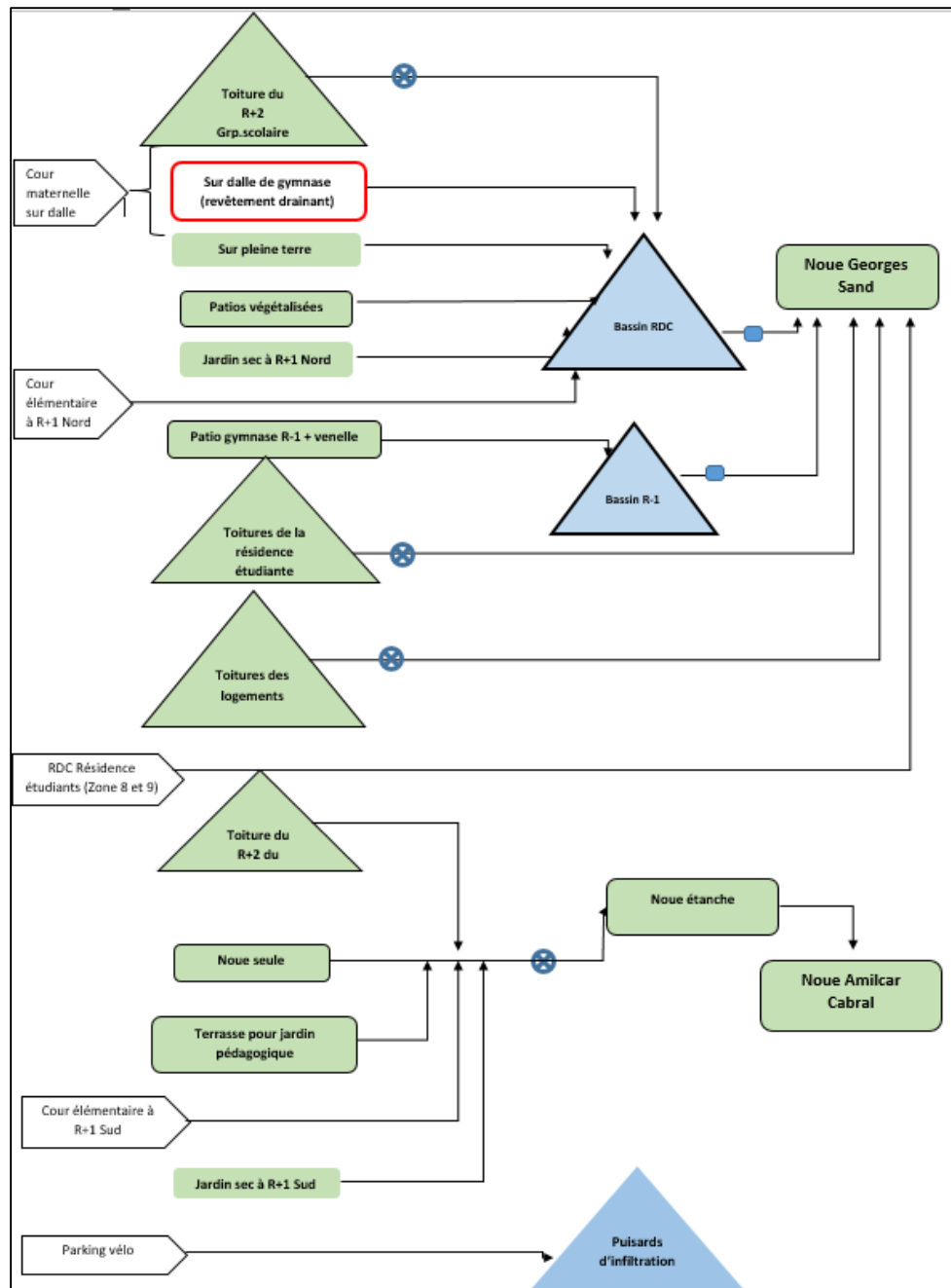


Figure 9: Analyse du permis de construire du lot E3D-Synthèse du système de gestion des EP sous forme d'organigramme

Toutes les données sur ce lot ou les autres lots privés sont tirées des permis de construire. Or, on n'avait pas la possibilité de visiter les lots privés pour faire une comparaison détaillée entre les données fournies par les permis de construire et ce qui est mis en œuvre dans la réalité. En outre, les

notices paysagères ou hydrauliques n'expliquent pas d'une manière détaillée le fonctionnement du système de gestion des eaux pluviales. Par exemple, on ne trouve pas des notes de calculs détaillées sur le dimensionnement des bassins de rétention...etc.

Une autre remarque qui laisse penser à l'incertitude des informations sur les lots privées, c'est que les données par exemple sur les surfaces des ouvrages de gestion des EP ou les volumes de stockage diffèrent d'un document à un autre.

Un exemple de cette incertitude de données est le volume de stockage des deux bassins de régulation présents dans le lot F2A

- Dans les permis de construire, maître d'ouvrage « SCI Saint-Denis » (29-6-2017), le volume du 1^{er} bassin de régulation est : $V1 = 22.5 \text{ m}^3$, et le volume du 2^{ème} bassin de régulation est : $V2 = 9 \text{ m}^3$
- Dans la notice hydraulique des ouvrages de régulation du Lot F2A (04-2016) réalisée par « LMP Conseils », $V1 = 15.2 \text{ m}^3$ et $V2 = 5 \text{ m}^3$

Cette contradiction entre documents et cette incertitude d'informations peuvent dépendre du stade de réalisation du projet auxquelles elles correspondent. Pour vérifier l'exactitude de ces données, des réunions avec les différents acteurs qui ont intervenus sur le projet doivent être programmées et des visites d'espace privé doivent être faites pour s'interroger sur la conformité des réalisations avec les informations sur les permis de construire en ce qui concerne la présence ou pas de certains ouvrages et leurs dimensions, ainsi que le devenir des EP ruisselées.

III.1.2) Exemple d'étude espace public : BVGS

En ce qui concerne le BVGS, il est drainé par des huit noues étanches en série qui longent les voiries : deux sur l'avenue d'Amilcar Cabral, et six noues sur l'avenue Georges Sand. Ces noues sont mises en œuvre pour récupérer par ruissellement superficiel direct les eaux générées par les surfaces imperméables de la voirie, ainsi que les éventuels rejets depuis les lots. Les eaux collectées par ce réseau de noues sont acheminées et rejetées vers un exutoire à un débit régulé par un limiteur de débit à effet Vortex PVX120.

Il a été décidé d'étanchéifier les noues pour éviter l'effondrement du terrain naturel suite à la dissolution du gypse antéludien et la formation des cavités en cas d'infiltration des eaux en sous-sol (DOSSIER DE DECLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU 2013).

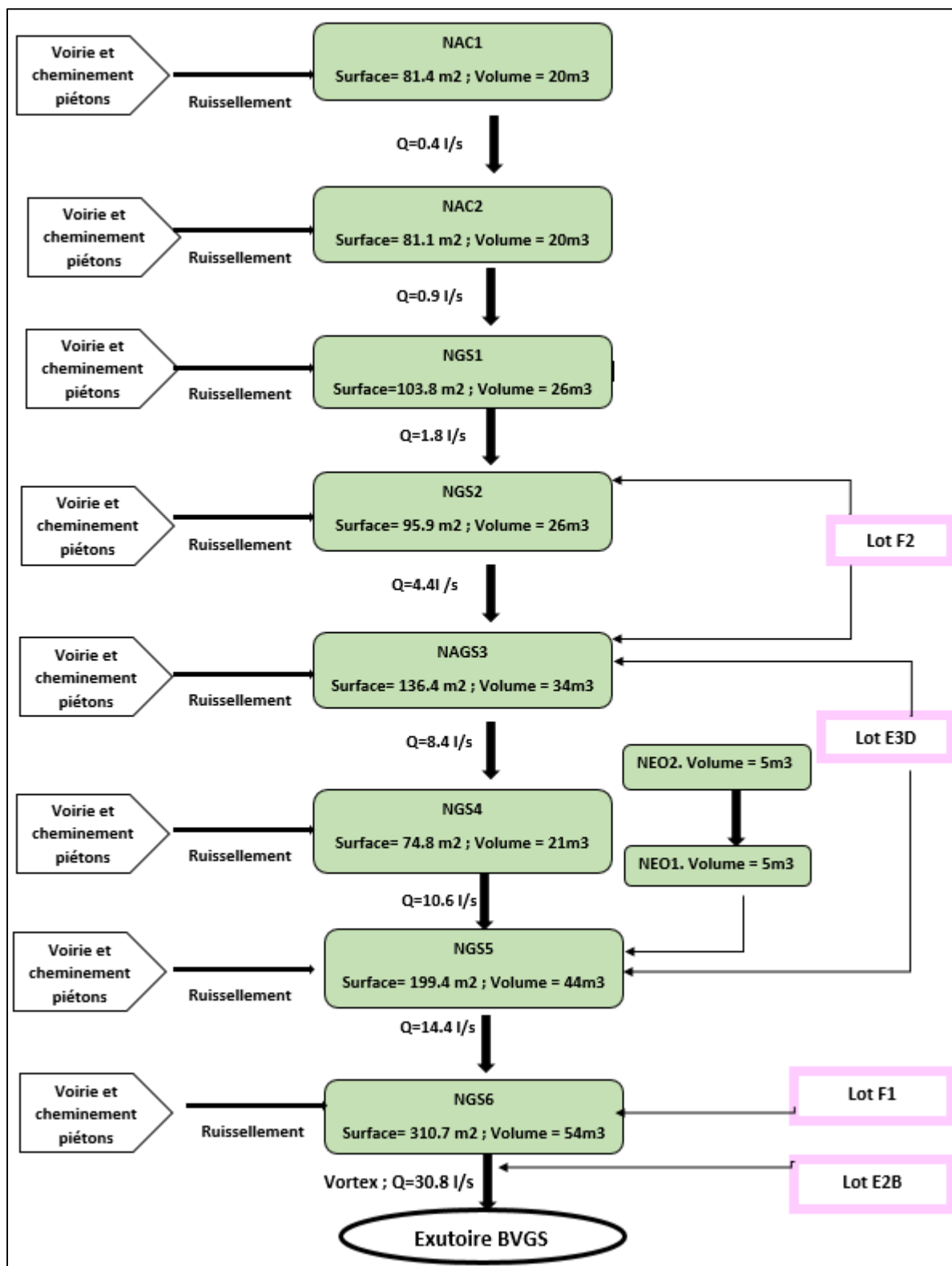


Figure 10: Organigramme BVGS-Espace public

III.2) Modélisation hydrologique du système

III.2.1) Mise ne œuvre du modèle

La figure 11 montre la carte du projet qui constituera la base de la construction du modèle sous le logiciel SWMM. Elle a été générée par l'outil QGIS et elle définit les différents composants du

système de gestion EP du BVGS. A noter que les sous BV de même couleur se rejettent dans la même noue suivant la pente du terrain. La même figure 11 montre le sens d'écoulement des eaux ruisselées.

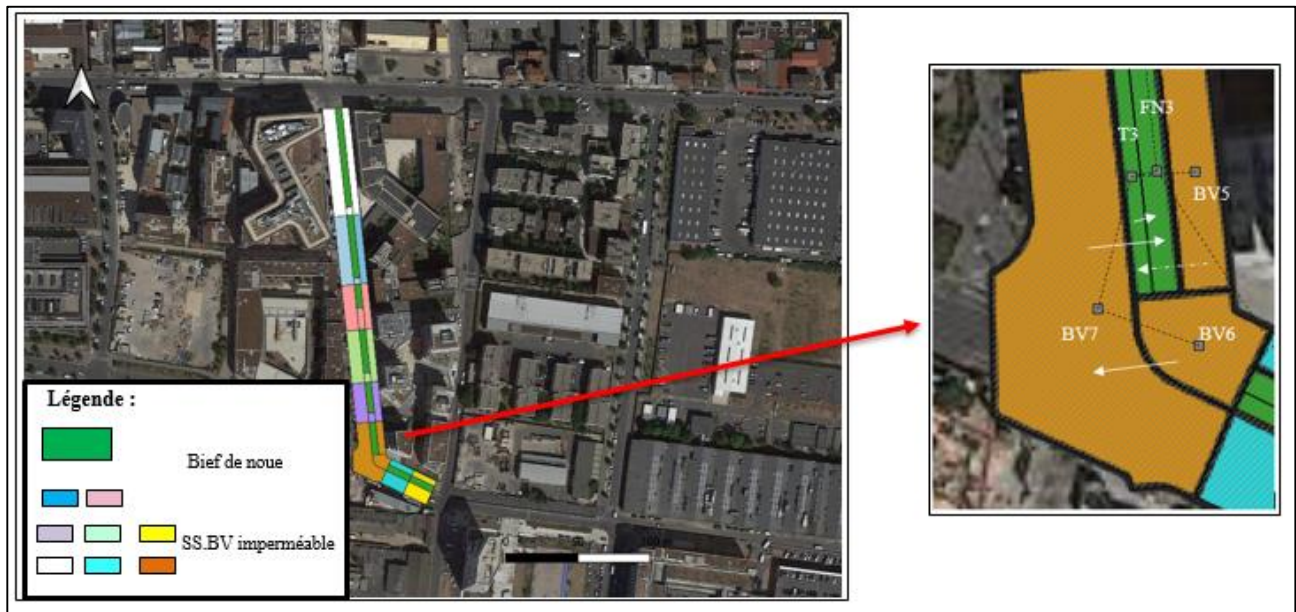


Figure 11: Délimitation des sous BV du BVGS / Sens d'écoulement des eaux ruisselées sur le BVGS

Dans le chapitre matériel et méthodes, on a mentionné que chaque noue sera découpée en sous.BV : le premier correspond au fond de noue et le deuxième au talus de la noue dont 100 % de la surface de chacun sera affecté aux LID. Donc, le projet contient deux LID, le premier nommé « Fond » de noue et le deuxième « Talus ».

Comme la montre la figure 12, les substrats des noues du BVGS sont répartis en deux couches : couche de surface de terre végétale de 30 cm, qui repose sur une couche composée d'un mélange de terre et pierre de 120 cm. Cette configuration de noue correspond dans SWMM au LID du type « Rain Garden ».

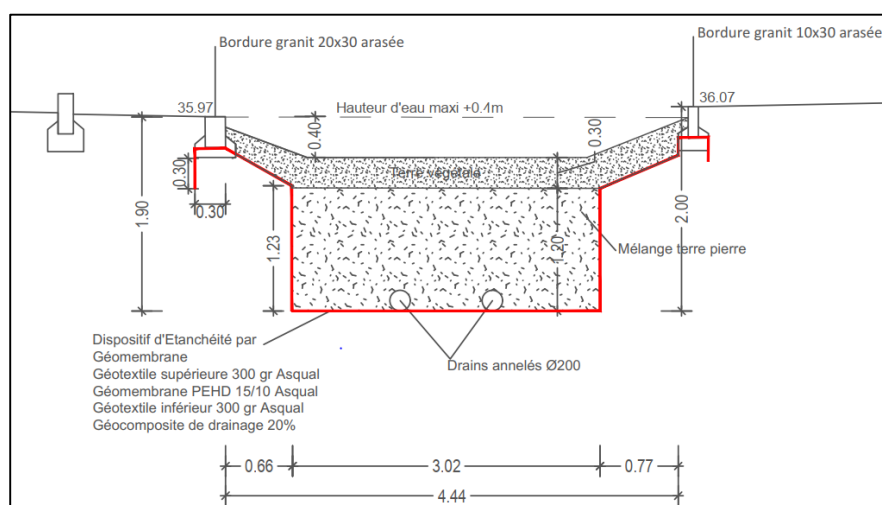


Figure 12: Substrat de la noue étanche du BVGS (SEQUANO 2017)

Pour la caractérisation du sol des noues des LID type « Rain Garden » sur SWMM, nous nous sommes basés sur les résultats de la méthode BEST, réalisées dans le cadre du stage de l'année dernière. La figure 13 résume tous les paramètres hydrodynamiques du sol des LID. L'annexe B présente le détail de calcul de ces paramètres.

Figure 13: Paramètres hydrodynamiques du sol des LID type « Rain Garden »

Maintenant que nous avons déterminé les paramètres du sol des LID, qui vont jouer sur les fonctions du stockage et d'abattement des pluies, il faut penser à intégrer la fonction de régulation dans les LID. Sur terrain, cette fonction est assurée par les orifices qui lient les noues. Or, SWMM ne permet pas de mettre des orifices entre les noues et de leur attribuer une loi de régulation. Donc, il fallait penser à d'autres alternatives pour représenter cette fonction. La première solution était de modifier la rugosité des noues pour ralentir l'écoulement dans les noues, ce qui peut simuler la même fonction des orifices. Les résultats du test de sensibilité que nous avons réalisé sur le coefficient de Manning ont montré que ce n'est pas possible de reproduire une régulation des débits à partir du seul coefficient de Manning.

La deuxième alternative consiste à représenter le stockage en surface des EP et la régulation des débits dans les noues d'une façon fictive dans le modèle, en insérant un « Storage Unit » à l'aval. Ce dernier sera connecté à l'exutoire du BVGS. Nous nous sommes basés sur cette solution puisqu'elle semble la plus proche de ce qui se passe sur terrain. En effet, on va mettre un volume de stockage qui correspond à 1 cm de hauteur d'eau dans les noues. Si cette valeur est dépassée, l'eau va au Storage Unit qui a la même surface que la noue. Si le volume des eaux ruisselées dépasse le volume de stockage du Storage Unit, elles se rejettent à débit régulé à l'exutoire qui est raccordé au réseau d'assainissement séparatif de la zone d'étude. Le débit régulé est assuré par la mise en œuvre d'un limiteur de débit à effet Vortex, modèle PVX 120. La loi de régulation du Vortex correspond à l'équation de la courbe Hauteur-Débit de la figure 14 :

$$Q = -0.0001 * H^2 + 0.0744 * H + 4.0444$$

Avec :

Q : Débit régulé (l/s)

H : Hauteur d'eau à l'amont du Vortex (cm)

Sur la figure 5 de l'exutoire du BVGS, on arrive à voir que le régulateur n'est pas au même niveau que le fond de la noue. Cela revient à dire que le débit à régulé ne dépend pas seulement du stock dans la noue (sur SWMM, le stockage se fait dans le Storage Unit), mais il dépend aussi de la charge hydraulique dans le tampon qui est égale à 92 cm. On tient compte de cette charge hydraulique pour la définition de la forme du Storage Unit dans SWMM.

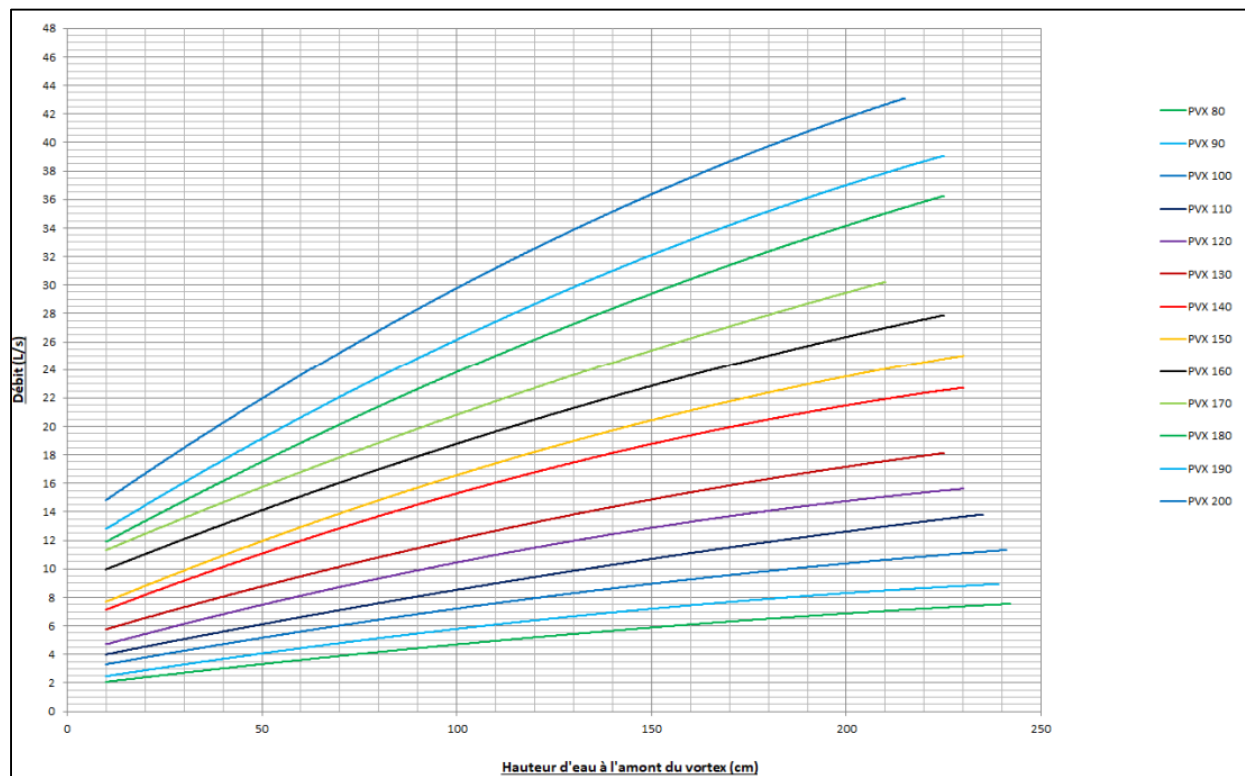


Figure 14: Courbes Hauteurs-Débits PVX (saint dizier ENVIRONNEMENT 2022)

III.1.1) Modélisation sur la période courte

La période de suivi des débits à l'aval du BVGS a été marquée par onze évènements pluvieux. Ces derniers ont été identifiés en considérant un temps de séparation entre les pluies de six heures. En d'autres termes, à partir d'une durée de six heures sans pluie, la série temporelle est considérée comme évènement pluvial isolé. Le temps de retour et l'intensité moyenne de chaque évènement pluvial sont calculés par une application développée par «Cerema ». L'annexe C montre l'interface graphique de cette application. Le tableau II regroupe l'ensemble des caractéristiques des évènements pluviaux durant cette période.

Tableau II: Caractéristiques des événements pluvieux

Événement pluvial	Date	Durée	Cumul (mm)	Intensité moyenne (mm/h)	Période de retour
1	19/06/2022	3 h 25 min	0.8	0.23	T<hebdomadaire
2	19/06/2022	6 h	10.4	1.73	mensuelle<T<bimestrielle
3	21/06/2022	40 min	0.4	0.6	T<hebdomadaire
4	24/06/2022	50 min	4.4	5.28	bimensuelle<T<mensuelle
5	24/06/2022	10 min	1.8	10.8	hebdomadaire<T<bimensuelle
6	25/06/2022	35 min	0.6	1.03	T<hebdomadaire
7	30/06/2022	6 h 55 min	9.4	1.36	mensuelle<T<bimestrielle
8	20/07/2022	7h 40 min	5.4	0.7	hebdomadaire<T<bimensuelle
9	20/07/2022	5 min	0.2	2	T<hebdomadaire
10	22/07/2022	10 min	0.4	2.4	T<hebdomadaire
11	22/07/2022	1h 55 min	2.4	1.25	T<hebdomadaire

Les résultats de la modélisation du système de gestion des EP sur cette période courte ont montré que le débit à l'exutoire est nul et que le système ne déborde pas.

Les résultats du suivi des hauteurs d'eau ont montrée qu'il y a une variation de débit à l'exutoire du BVGS comme la montre la figure 15. Le débit maximum estimé est de 4.88 l/s. Il correspond à une hauteur d'eau mesurée égale à 11.34 cm. Cette hauteur d'eau dans l'exutoire est beaucoup plus faible que la charge hydraulique théoriquement atteinte lorsque l'eau commence à s'accumuler dans la noue. Cette élévation correspond vraisemblablement à des apports limités vers le regard et non une mise en charge de la noue.

Vu les périodes de retour, et d'après la figure 15, cela indique qu'en période estivale, pour des pluies courantes, le système est capable d'assurer un abattement significatif. En effet, les hauteurs d'eau mesurées sont trop faibles. Il y a potentiellement une incapacité de SWMM à décrire finement les cheminements de l'eau dans l'ouvrage, et donc des apports vers les regards malgré une absence de mise en charge de la noue. En plus, l'origine de la différence de débit entre les résultats de simulation et ce qui a été mesuré peut être liée aux conditions initiales. Il se peut que la teneur en eau initiale du sol dans la noue ne soit pas complètement homogène. Ce paramètre peut modifier les résultats de simulation en termes du ruissellement généré ainsi que le rejet à travers de dispositif de régulation.

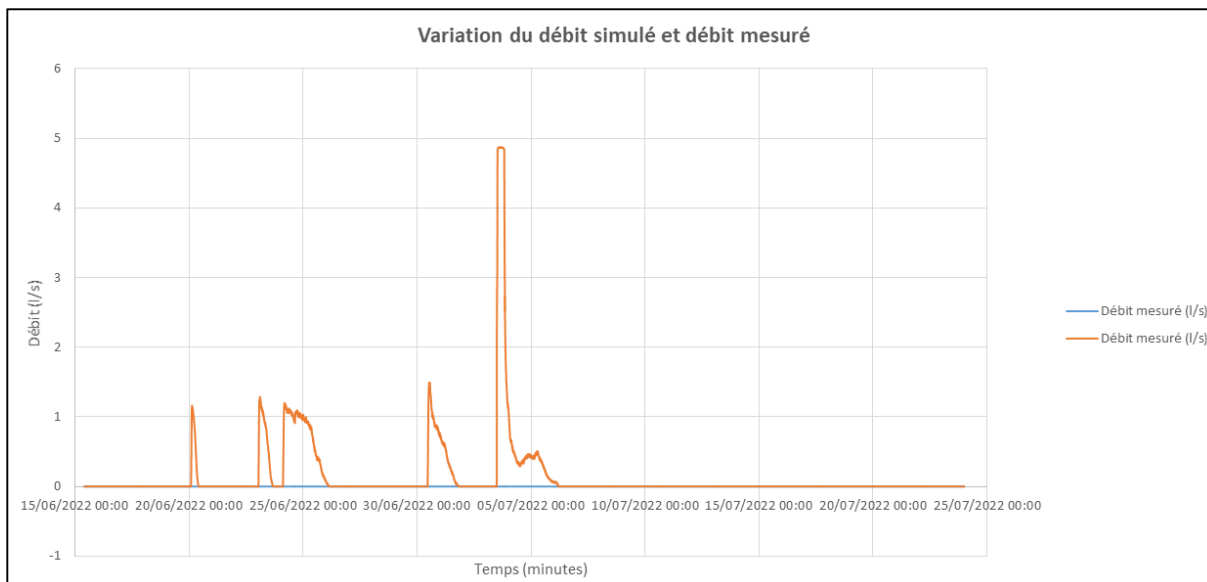


Figure 15: Variation du débit simulé et débit mesuré sur la période du 15/06/2022 au 24/07/2022

D'après la figure 16, le système reçoit une pluie de 36.2 mm. On remarque que le stockage dans les LID a diminué de 12.87 mm, et que les pertes par évapotranspiration sont supérieures à la lame d'eau précipitée avec une différence égale à 13.65 mm. Cela peut être expliqué par le fait que toutes les eaux dans le réseau de noues ainsi qu'une portion d'eau qui était stockée dans les LID à l'état initial, s'évaporent du sol et transpirent par la végétation.

Status Report		
*****	Volume	Depth
Runoff Quantity Continuity	hectare-m	mm
*****	-----	-----
Initial LID Storage	0.029	52.206
Total Precipitation	0.020	36.200
Evaporation Loss	0.027	49.850
Infiltration Loss	0.000	0.000
Surface Runoff	0.000	0.000
Final Storage	0.021	39.332
Continuity Error (%)	-0.877	

Figure 16: Bilan hydrologique du sous-bassin versant étudié "BVGS" sur la période courte

III.1.2) Modélisation sur la période longue

L'application sur une période longue, la simulation porte sur 15 ans de précipitations.

D'après la figure 17, Le BVGS reçoit une pluie de 9272.457 mm, 79% des précipitations sont transformés en ruissellement, 20% d'eau est perdu par évapotranspiration et 1% de la quantité précipitée a été stocké dans les LID, alors que l'infiltration est nulle parce que les noues paysagères du système de gestion des EP sont étanches, donc l'eau ne s'infiltré pas dans le sous-sol.

	Volume hectare-m	Depth mm
*****	-----	-----
Runoff Quantity Continuity		

Initial LID Storage	0.029	52.206
Total Precipitation	5.067	9272.457
Evaporation Loss	1.023	1871.486
Infiltration Loss	0.000	0.000
Surface Runoff	4.076	7458.509
Final Storage	0.060	110.073
Continuity Error (%)	-1.238	

Figure 17: Bilan hydrologique du sous-bassin versant étudié "BVGS" sur la période longue

Afin de faciliter la manipulation et l'interprétation des données, les débits simulés sur SWMM ont été convertis en débits journaliers. Ces derniers ont été convertis en lame d'eau équivalente sur le BVGS et représentés sous forme de débits classés. Ces débits classés normalisés ont été comparés à une situation de référence qui correspond aux précipitations (absence de gestion des EP). Sur la figure 18, on a tracé la courbe de la lame d'eau écoulée (mm) ainsi que la courbe des précipitations (mm), pour analyser le fonctionnement du système de gestion des EP. La lame d'eau écoulée correspond à la somme des débits à l'exutoire et les débits d'eaux qui débordent dans le tout le système.

Les apports depuis les lots privés pour des pluies courantes sont négligeables, du fait de l'abattement du ruissellement dans les ouvrages de gestion à la parcelle. D'après la figure 18, on remarque que pour les événements fréquents (période de retour ≤ 6 mois), la courbe de la lame d'eau écoulée reste au-dessous de la courbe des précipitations. Donc pour ces événements fréquents, le système de gestion des EP est capable d'assurer l'abattement de l'ensemble les pluies courantes d'une période de retour hebdomadaires et mensuelles.

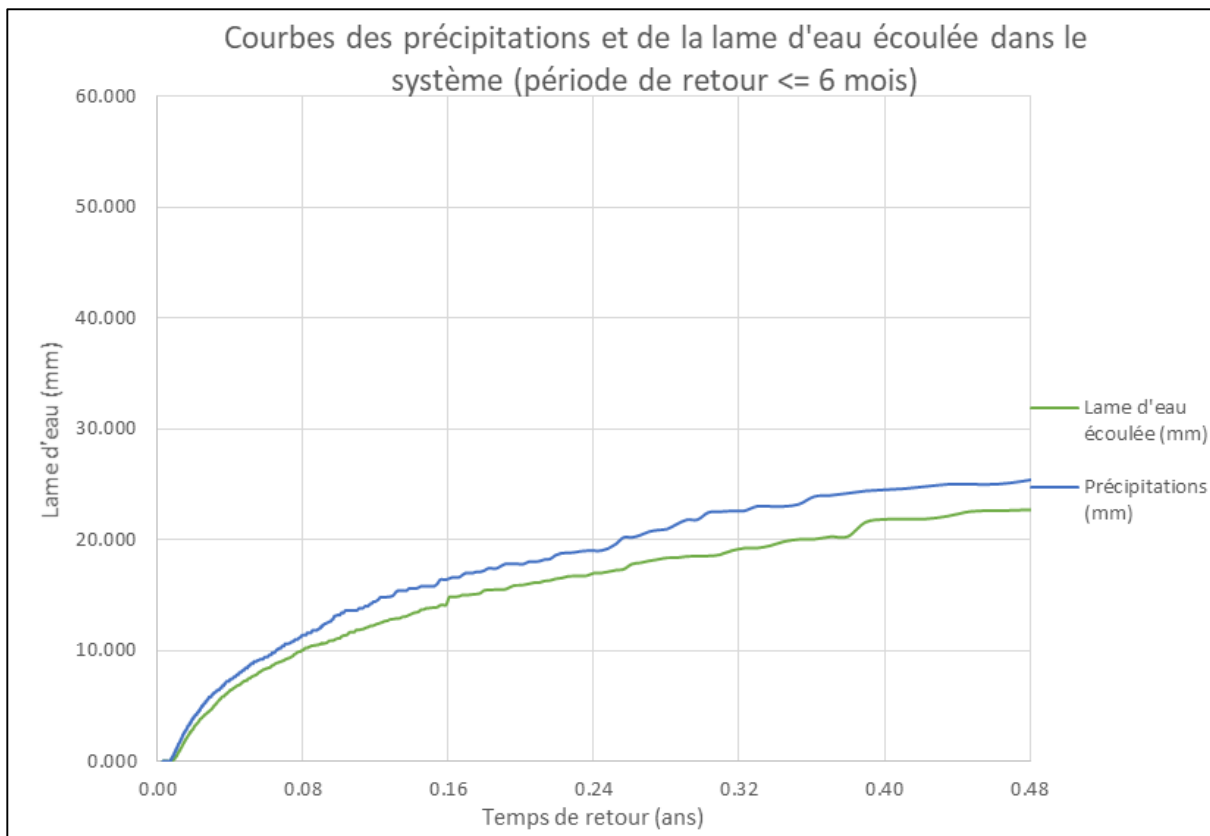


Figure 18: Courbes des précipitations et de la lame d'eau pour une période de retour ≤ 6 mois

Pour des périodes de retour élevées (5 ans), l'hypothèse d'abattement des pluies courantes par les ouvrages de gestion des EP dans les lots privés, n'est plus réaliste. En effet, sur la figure 19, la courbe de la lame d'eau écoulee est sous la courbe des précipitations. On remarque aussi que pour une période de retour de 3 ans, le système commence déjà à déborder. Pour une période de retour de 5 ans, Le volume d'eau qui débordé augmente encore. On peut conclure que pour des périodes de retour de quelques années, le système de gestion des EP fournit une atténuation des débits et non pas un abattement total des pluies.

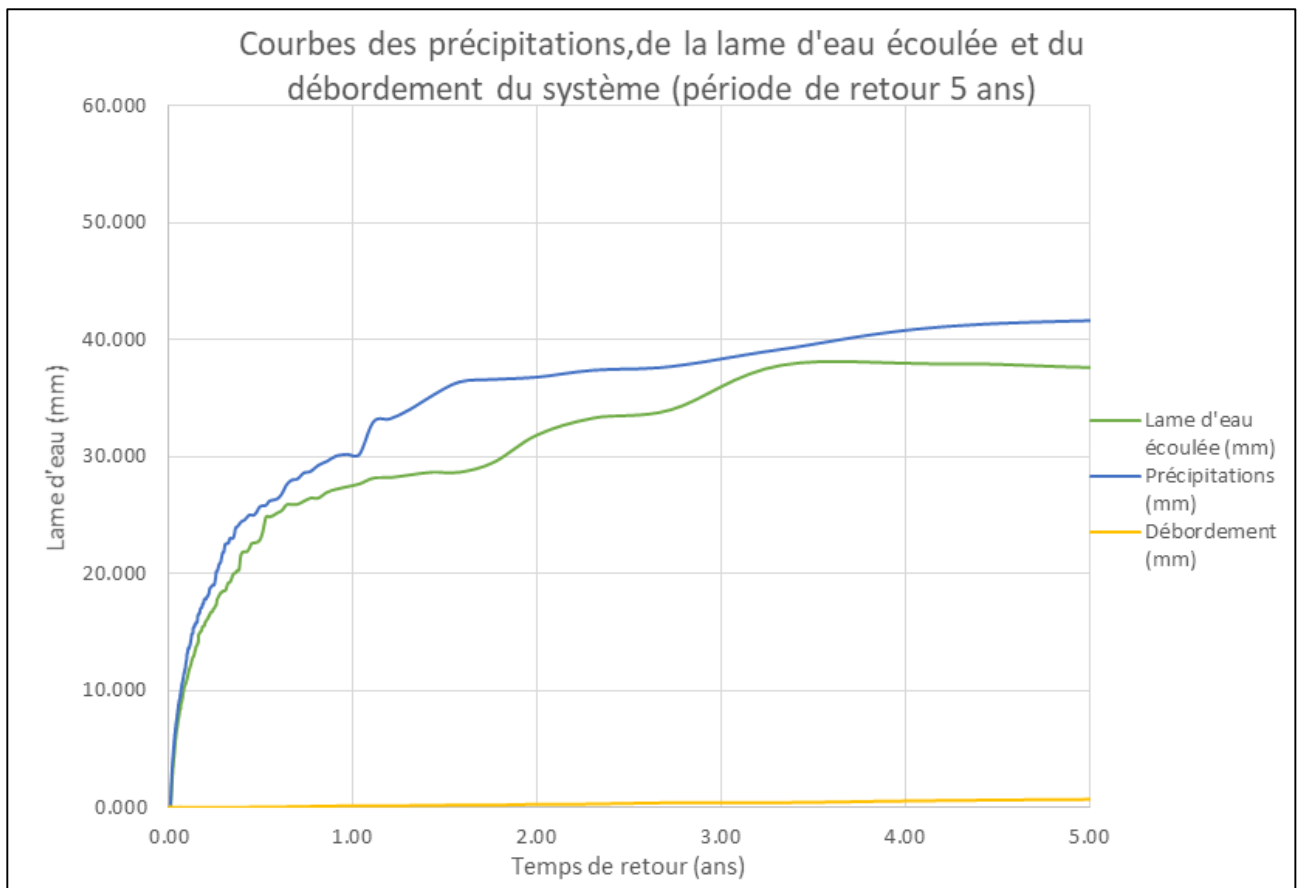


Figure 19: Courbes des précipitations, de la lame d'eau écoulee et du débordement du système (période de retour 5ans)

Chapitre IV : Discussion

Au cours du travail élaboré, on a fait face à plusieurs limitations. En effet, l'analyse des permis de construire nous a permis de comprendre comment les EP sont acheminées de la source jusqu'à l'exutoire. Mais, on n'a pas pu caractériser d'une façon complète et détaillée tous les ouvrages de gestion mis en place dans la zone d'étude. En effet, les informations concernant l'aménagement de cette zone, diffèrent d'un document à un autre. Cette incertitude d'informations peut être liée au stade de réalisation du projet. En plus, on ne pouvait pas visiter les îlots privés pour confronter les données sur les documents d'aménagement avec ce qui a été réellement réalisée sur terrain.

En ce qui concerne la modélisation du système de gestion des EP, on était trop limité par le logiciel utilisé. En effet, SWMM ne permet pas de représenter les LID comme elles se présentent sur terrain. C'est pour cela qu'on a choisi de représenter les noues sous forme de jardin de pluie en modifiant ses paramètres pour s'approcher un peu de la réalité. En plus, SWMM ne permet pas de représenter la fonction de régulation des eaux par les noues. C'est pour cette raison qu'on a choisi de représenter cette fonction d'une façon fictive par un Storage Unit tout à l'aval. Ensuite, le test de sensibilité sur le coefficient de Manning a montré que SWMM ne tient pas compte de la rugosité du sol dans le calcul du ruissèlement ou le calcul du rejet à débit régulé. Toutes ces incompatibilités entre les LID dans SWMM et la réalité de la ZAC Montjoie peuvent modifier significativement les résultats de simulations. On suppose que ces derniers dépendent aussi des conditions initiales pour une pluie de courte période. Pour vérifier cette hypothèse, ça sera intéressant de lancer la simulation (avec les données de la série de 15 ans), mais sur période plus courte de quelques mois pour juger le poids des conditions initiales pour la période courte. En plus, ça sera un plus de lancer des simulations en changeant à chaque fois la teneur en eau initiale du sol des LID, pour voir si les résultats changent vraiment si par exemple le sol est considéré complètement sec ou humide à l'état initial.

Conclusion

Le travail élaboré a pour objectif principal d'analyser et d'évaluer le système de gestion des EP de la ZAC Montjoie. Le stage s'inscrit dans le cadre du projet d'observatoire pérenne de la gestion à la source des eaux pluviales du programme OPUR. Le travail repose principalement sur l'analyse des documents d'aménagement de la zone d'étude. Cette analyse nous a permis de synthétiser le système de gestion des EP sous formes d'organigrammes. Ces derniers facilitent la compréhension du processus d'acheminement des eaux pluviales du point de leur chute jusqu'à l'exutoire. En effet, pour des pluies courantes, les ouvrages de gestion des EP à la parcelle assurent l'abattement des EP.

Pour mieux évaluer l'efficacité du système de gestion des EP, on a modélisé ce système sous le logiciel SWMM, mais on s'est contenté de le représenter que pour le sous-bassin versant Georges Sand « BVGS », en supposant que les apports depuis les parcelles pour des pluies courantes sont négligeables, du fait de l'abattement du ruissellement dans les ouvrages de gestion à la parcelle. Les résultats de simulation nous ont permis d'affirmer que le système de gestion des EP du BVGS est capable d'assurer un abattement des pluies courantes d'une période de retour hebdomadaire ou mensuelle, et une atténuation du débit pour des périodes de retour de quelques années. Ces résultats de simulation pour les pluies courantes dépendent de plusieurs facteurs, essentiellement les conditions initiales de saturation du sol des LID. Donc, il est fortement recommandé de réaliser des tests de sensibilité sur l'état de saturation initiale du sol des LID pour pouvoir qualifier le poids des conditions initiales pour la période courte.

Références bibliographiques

- ATM, et SEQUANO. 2016. « ANALYSE TECHNIQUE DCE - GESTION DES EAUX PLUVIALES PHASE 2 ».
- Berlioz, Jean-Pierre et al. 2020. « Travaux d'aménagement et d'entretien des constructions paysagères. » : 36.
- Devers, Gilles. 2005. « Cadre réglementaire de la gestion des eaux pluviales ». <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1629658305825130>.
- DGALN. 2021. « Gestion durable des eaux pluviales.: le plan d'action ».
- « DOSSIER DE DECLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU ». 2013.
- Kanso, Tala. 2021. « Mesure et modélisation du bilan hydrologique de dispositifs rustiques de gestion à la source des eaux de ruissellement de chaussées ». phdthesis. Université Paris-Est ; École Doctorale des Sciences et de Technologie (Beyrouth). <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03478830> (29 août 2022).
- Kanzar, S., H. Sahraoui, et S. Ben Mariem. 2016. « Estimation Des Paramètres Hydrodynamiques Des Sols Par La Méthode Beerkan ». *Journal of New Sciences* 15). <https://www.jnsciences.org/agri-biotech/41-volume-special-conference-iabc-2015/217-estimation-des-parametres-hydrodynamiques-des-sols-par-la-methode-beerkan.html> (30 août 2022).
- MACRON, EMMANUEL. 2021. « Journal officiel de la république française ». https://www.legifrance.gouv.fr/download/file/x7Gc7Ys-Z3hzgxO5Kgl0zSu1fmt64dDetDQxhvJZNMc=/JOE_TEXTE.
- « PLAN DE RECOLEMENT ». 2016.
- Rossman, Lewis A. 2016a. « Storm Water Management Model ». : 233.
- . 2016b. « Storm Water Managment Model Reference Manual Volume III-Water Quality ».
- saint dizier ENVIRONNEMENT. 2022. « Courbe de régulation, limiteur de débit à effet Vortex, Modèle Eaux pluviales Type PVX ».
- SEQUANO. 2014. « PROFILS EN LONG-RUE G.SAND ».
- . 2017. « PROFIL EN TRAVERS AVENUE GEORGES SAND ».
- THEBAULT, Emma et al. « La gestion patrimoniale des ouvrages et aménagements dédiés à la gestion des eaux pluviales urbaines. »
- Vieillard-Baron, Hervé. 2011. « La Plaine Saint-Denis : un ancien territoire industriel au centre des contradictions métropolitaines. (La Plaine Saint-Denis : a former industrial area at the heart of metropolitan contradictions) ». *Bulletin de l'Association de Géographes Français* 88(2): 164-73.

Webographie

- « Les climats de France ». 2013. <https://blog.univ-angers.fr/lesclimatsdefrance/2013/11/24/le-climat-oceanique-degrade/>.
- « Les dates de la politique de l'eau : chronologie ». 2019. *vie-publique.fr*. <https://www.vie-publique.fr/eclairage/24019-chronologie-les-dates-de-la-politique-de-leau> (30 août 2022).
- « L'évolution du climat à Paris ». 2022. *Agence Parisienne du Climat*. <https://www.apc-paris.com/evolution-climat>.

LISTE DES ABREVIATIONS

BEST: Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters

BVGS: Bassin versant Georges Sand

ZAC : Zone d'Aménagement Concerté

DCE : Directive-Cadre Européenne sur l'eau

DEA : Direction de l'Eau et de l'Assainissement

EP : Eaux Pluviales

LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques

NOTRe : Nouvelle Organisation Territoriale de la République

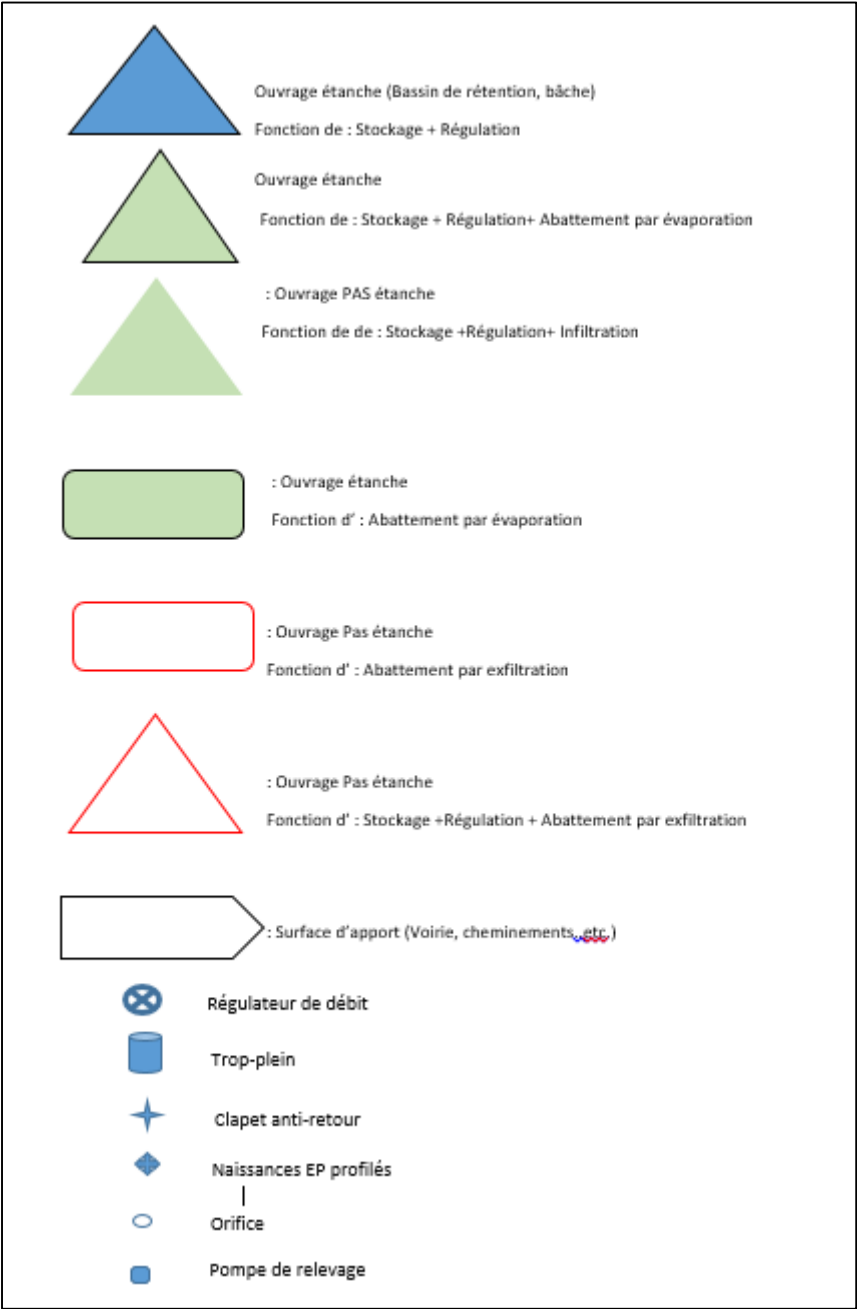
PLU : Plan Local d'Urbanisme

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

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

SWMM: Storm Water Management Model

Annexe A : Code de l’organigramme de la figure 9



Annexe B : Détails de calcul des paramètres hydrodynamiques du sol des LID

En se basant sur le tableau I, la porosité correspond à la moyenne arithmétique des teneurs en eau à saturation des quatre essais BEST.

La conductivité hydraulique K_s , est la moyenne géométrique des K_s de quatre essais Best. On a choisi de la calculer par la moyenne géométrique car elle est la plus représentative en termes de comportement à l'infiltration.

La pente de conductivité (Conductivity Slope) Elle est la pente moyenne de la courbe du Log (K_h) en fonction du déficit d'humidité du sol. Pour avoir le déficit d'humidité, il faut soustraire la porosité de la teneur en eau ($\theta_s - \theta(h)$).

Field capacity et Wilting Point correspondent respectivement à la moyenne arithmétique des teneurs en eau à la capacité au champ et celles au point de flétrissement des quatre essais Best.

Suction Head (in ou mm), c'est la valeur moyenne de la succion capillaire du sol le long du front de d'humidification. Pour la calculer :

$$\Psi = 3.23 K^{-0.328}$$


Avec K : conductivité hydraulique à saturation (in/h)

Pour le pourcentage de saturation initiale (% initially Saturated), elle exprime la proportion initiale du stock d'eau initial dans le sol. En effet le 0% correspond au point de flétrissement et 100% correspond à la saturation.

Pour notre cas d'étude, le pourcentage de saturation initiale correspond à la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ (θ_f) et la teneur en eau au point de flétrissement (θ_{wp})

$\theta_F - \theta_{wp} = 0.25 - 0.11 = 0.12$, Ce qui correspond à 32.6 % de saturation initiale

Annexe C : Interface graphique de l'application développée par Cerema

 DÉTERMINATION DE LA PÉRIODE DE RETOUR D'UN ÉVÈNEMENT PLUVIEUX

CHOIX DE LA STATION ET SAISIE DES PARAMÈTRES DE PLUIE

Sélectionner la station à utiliser

Station sélectionnée

STAT PARIS-MONTSOURIS, 1982-2018, HEBDO-2ANS, 6MIN-24H

STAT PARIS-MONTSOURIS, 1982-2018, HEBDO-2ANS, 6MIN-24H

Entrer le cumul de pluie (mm)

Cumul (mm)

4.4

Entrer la durée de la pluie (min)

Durée (minutes)

50.0

Afficher coefficients de Montana

Intensité moyenne (mm/h)

Afficher graphe

5.28

Valider

RÉSULTATS

bi-mensuelle

< Période de retour <

mensuelle

3.33 mm

< Cumul <

4.82 mm

3.99 mm/h

< Intensité moyenne <

5.79 mm/h

RESUME

Ce stage s'inscrit dans le cadre du Projet d'observatoire de la gestion à la source des eaux pluviales dans le programme OPUR. Il vise à évaluer et caractériser le système de gestion des eaux pluviales urbaines de la ZAC Montjoie à Saint-Denis. Cette caractérisation s'appuie sur une analyse des documents d'aménagement de la zone d'étude qui nous a permis de synthétiser le fonctionnement du système de gestion des eaux pluviales, dans les îlots privés ainsi que l'espace public, sous formes d'organigrammes. Dans le même sens, une modélisation hydrologique du sous-bassin versant Georges Sand a été réalisée avec l'outil SWMM. Il nous a permis d'évaluer la réponse du système de gestion des eaux pluviales mis en œuvre pour des pluies de différents périodes de retour. A la fin, des améliorations de la démarche suivie pour aboutir à ces résultats, ont été proposés afin d'avoir des résultats qui traduisent fidèlement ce qui se passe sur terrain.

Mots-clés : gestion, eaux pluviales, ouvrages, modélisation, pluies courantes, abattement

Abstract

This internship is a part of the Observatory Project of Stormwater Management at the Source in the OPUR program. It aims at evaluating and characterizing the urban stormwater management system of the ZAC Montjoie in Saint-Denis. This characterization is based on an analysis of the planning documents of the study area which allowed us to synthesize the functioning of the stormwater management system, in the private blocks as well as the public space, in the form of flowcharts. In the same sense, a hydrological modelling of the Georges Sand sub-catchment was carried out with the SWMM tool, which allowed us to evaluate the response of the implemented stormwater management system for rainfalls of different return periods. At the end, improvements of the approach followed to reach these results, were proposed in order to have results which faithfully translate what happens on the ground.

Keywords: management, stormwater, structures, modeling, current rainfall, abatement

DURMONT Jean-François

STAGE DE MISE EN SITUATION PROFESSIONNELLE
RAPPORT FINAL TECHNIQUE

Évaluation de l'aménagement de gestion des eaux pluviales
sur la ZAC de Montjoie au moyen d'une modélisation sur le
logiciel SWMM.



Tuteurs :

Marie-Christine GROMAIRE – Directrice de Recherche, Leesu – marie-christine.gromaire@enpc.fr

Jérémie SAGE – Chercheur, TEAM (CEREMA) – jeremie.sage@cerema.fr

Stage du 03 Avril 2023 au 11 Aout 2023

Leesu – Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains
École des Ponts ParisTech, 6-8 Avenue Blaise Pascal Cité Descartes.
Champs sur Marne 77455 Marne-la-Vallée Cedex 2 France



Table des matières

Résumé.....	3
Abstract	3
Remerciements	3
Table des figures et tableaux.....	4
I. Présentation de la structure d'accueil.....	5
II. Contexte et objectifs du stage	5
1) Contexte historique et réglementaire de la gestion des eaux pluviales.....	5
2) Sujet, objectifs et enjeux de mon stage	6
III. Méthodologie	7
1) Présentation de la zone d'étude : la ZAC de la Montjoie.....	7
2) Données disponibles.....	9
3) Modélisation sous SWMM.....	10
a) Principe général	11
b) Modélisation des bassins versants (BV) et des techniques alternatives (Low Impact Development - LID)	11
c) Représentation de la zone d'étude avec SWMM.....	13
4) Pré-traitement, mise en forme et visualisation des données	14
5) Analyse de la sensibilité du modèle	14
a) Définition	14
b) Principe de l'algorithme utilisé, modèle de référence, et variables d'intérêt en sortie évaluées.....	16
c) Paramètres d'entrée et domaine de variation	16
6) Performance hydrologique du dispositif étudié dans le modèle	18
7) Confrontation aux observations.....	18
IV. Résultats	18
1) Pré-traitement, mise en forme et visualisation des données	18
2) Analyse de la sensibilité du modèle	19
a) Volume d'eau cumulé en sortie.....	19
b) Teneur en eau & vide disponible dans les biefs en amont et en aval du modèle.....	20
3) Performances du modèle.....	21
1) Analyse générale	21
2) Bilan mensuel.....	21
3) Bilan par évènements pluvieux	21
4) Confrontation aux observations :.....	22
V. Discussions et perspectives	23
1) Discussions.....	23
2) Perspectives	25
Bibliographie	26
Annexes :	28

Résumé

Évaluation d'un aménagement de gestion des eaux pluviales sur la ZAC de Montjoie à Saint-Denis au moyen d'une modélisation sous SWMM afin de déterminer si un système reposant uniquement sur l'évapotranspiration est possible là où l'exfiltration est impossible en raison de contraintes géologiques ou de pollution des sols.

Mots clés : Hydrologie urbaine, ruissellement, modélisation, ouvrages, techniques alternatives, pluies courantes, abattement, évapotranspiration, infiltration, rétention.

Abstract

Assessment of a stormwater scheme on the ZAC Montjoie in Saint-Denis (France) through a SWMM modelling to determine whether a system based only evapotranspiration is feasible in a context where exfiltration is not possible due to geologic constraints or soil pollution.

Keywords: Urban hydrology, runoff, modelling, stormwater structures, LID, standard rainfall, abattement, evapotranspiration, infiltration, retention.

Remerciements

Je tiens à remercier Marie-Christine Gromaire pour m'avoir accueilli au sein de la « salle des stagiaires » du Leesu pendant ces quelques mois ainsi que pour son encadrement, suggestions et conseils toujours avisés. Jérémie Sage, diplômé de l'ENTPE, pour son co-encadrement, les diverses discussions informelles et qui a su répondre à mes fréquentes sollicitations par mail. Enfin, mes collègues « de salle » ou de laboratoire (permanents, doctorants ou post-doctorants) avec qui j'ai régulièrement partagé des cafés, repas et autres moments de convivialité au cours de mon stage et qui n'ont jamais été avares pour discuter et échanger.

Crédits Photo Couverture :

DURMONT Jean-François – avril 2023 : Aperçu de l'aménagement de gestion des eaux pluviales (noue) sur la rue Georges Sand à Saint Denis (à proximité de l'ARS et du lycée polyvalent Angela Davis).

Table des figures et tableaux

Figure 1 – Zone étudiée (zone hachurée plus parcelles privées ainsi que les ouvrages associés)	8
Figure 2 – Représentation schématique (profil en long) de l'ouvrage de gestion des eaux pluviales (partie publique) sur la ZAC de Montjoie le long de l'avenue A. Cabral et la rue G. Sand.	9
Figure 3 – Représentation schématique (profil en travers) de l'ouvrage de gestion des eaux pluviales (partie publique) sur la ZAC de Montjoie le long de l'avenue A. Cabral et la rue G. Sand.	9
Figure 4 – Modélisation des BV et du ruissellement dans SWMM (Rossman & Huber, 2016a)	11
Figure 5 – Modélisation des LID sous SWMM (Rossman & Huber, 2016b)	12
Figure 6 – Modélisation du dispositif de gestion des eaux pluviales étudié de la ZAC sous SWMM	14
Tableau 1 – Paramètres d'entrée testés, valeurs de références et domaines de variation	17
Tableau 2 – Sensibilités obtenues pour le volume d'eau cumulé en sortie pour chacun des paramètres testés	19
Tableau 3 – Sensibilités obtenues pour la teneur en eau et la proportion de vide disponible pour chacun des paramètres testés	20
Tableau 4 – Abattements mensuels : valeurs remarquables (moyenne & médiane des abattements mensuels) sur la période d'intérêt (1er mars 2022 – 31 mai 2023)	21
Tableau 5 – Abattements par évènements pluvieux : valeurs remarquables sur la période d'intérêt (1er mars 2022 – 31 mai 2023)	22

I. Présentation de la structure d'accueil

Situé à l'École des Ponts ParisTech et à l'Université Paris-Est Créteil, le Leesu¹ est un laboratoire de recherche en sciences de l'environnement, spécialisé sur la gestion des eaux urbaines et leurs devenir. Il traite de sujets portant sur l'hydrologie urbaine (ruissellement, gestion des eaux pluviales), la biogéochimie, le transfert et devenir des contaminants chimiques et microbiologiques du milieu urbain (villes) au milieu récepteur (rivière, sols, nappes phréatiques...), l'usage de l'eau, ses pratiques et politiques associées ainsi que leurs évolutions.

Les recherches du LEESU se structurent en trois thématiques :

- **Innovations pour la gestion durable de l'eau et de la ville** : Analyse des innovations en matière de gestion urbaine de l'eau et de l'assainissement, évaluation de leur performance, optimisation de leur fonctionnement, et caractérisation de leur déploiement éventuel ;
- **Fonctionnement, résilience et adaptation des systèmes de gestion des eaux urbaines** : Evaluation, à l'échelle urbaine, de l'effet de différents scénarios de changements et les impacts du déploiement d'un panel de solutions, analyse de leur résilience et modélisation des scénarios d'adaptation face aux changements globaux ;
- **Protection des écosystèmes et des ressources naturelles** : Impact des pressions anthropiques sur les milieux récepteurs, évaluation des services écosystémiques et de la qualité sanitaire de ces milieux, approche intégrée considérant le fonctionnement hydrodynamique, biogéochimique, écologique et socio-politique des écosystèmes étudiés.

II. Contexte et objectifs du stage

1) Contexte historique et réglementaire de la gestion des eaux pluviales

La thématique principale de mon sujet de stage est l'hydrologie urbaine. Il s'inscrit dans un contexte historique et réglementaire de la gestion des eaux urbaines dont voici un bref résumé.

Dès la moitié du XIX^{ème} siècle, la gestion des eaux usées urbaines en Europe relève du concept hygiéniste et repose sur leur évacuation rapide le plus loin possible des villes :

« [...] Lorsqu'elle s'est chargée de matières organiques, non seulement l'eau ne peut plus être utilisée à nouveau, mais au contraire sa présence même est nuisible : si elle restait alors stagnante, [...] l'eau deviendrait en peu de temps une cause grave d'insalubrité. Dès lors, il faut se préoccuper avant tout de l'éloigner le plus rapidement possible, en facilitant son écoulement, soit à la surface du sol, soit au moyen de conduits souterrains ; il faut en débarrasser les habitations, les voies publiques, et la conduire en un temps très court à une distance telle que la décomposition des matières organiques ne puisse plus avoir d'influence fâcheuse sur l'agglomération urbaine. » (Bechmann, 1888).

Les premiers réseaux d'assainissement moderne apparaissent à Hambourg (1854) et Londres (à la suite à l'épisode de la « Grande Puanteur » en 1858). En France, Paris s'équipe d'un réseau complet d'égout pendant la seconde moitié du XIX^{ème} siècle avec les travaux de l'ingénieur Eugène Belgrand sous l'impulsion du préfet Haussmann. La loi du 10 juillet 1894 rend obligatoire le raccordement des habitations parisiennes aux égouts pour la gestion des eaux usées.

Cette vision hygiéniste rencontre ses limites au cours du XX^{ème} siècle avec l'urbanisation extensive et l'imperméabilisation grandissante des sols (via la connexion de bassins versants urbains supplémentaires à un réseau existant). Ce qui a provoqué une augmentation du volume d'eau à gérer par les réseaux (eaux usées et eaux pluviales), un ruissellement sur des surfaces imperméabilisées et

¹ Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains.

polluées par des activités anthropiques, et une concentration ainsi qu'une accélération vers un même point de rejet (exutoire) entraînant des inondations par débordement.

Le problème de la gestion du volume n'a pas été résolu avec le développement des réseaux séparatifs dans les années 60 car ils n'ont pas pour autant remplacé le réseau unitaire existant et que les conséquences de l'urbanisation excessive sont les mêmes en réseau unitaire ou séparatif. Les stations d'épuration (STEP) en aval du réseau restent sous-dimensionnées d'un point de vue hydraulique en raison de la forte variabilité du volume des eaux pluviales issues des secteurs unitaires. Elles s'avèrent en outre non adaptées à leur traitement². Qui plus est, le développement de bassins et déversoirs d'orage en amont des STEP pour désengorger les réseaux avec le délestage direct du trop-plein vers les milieux récepteurs est une solution peu satisfaisante au regard de l'impact sur ces derniers et de l'objectif de bon état des masses d'eau.

C'est dans ce contexte que sont apparues au début des années 70, les techniques alternatives (au réseau)³ : le meilleur moyen de ne pas surcharger le réseau est de faire en sorte de ne pas rejeter les eaux pluviales dans celui-ci et de gérer les eaux pluviales en amont avec de la gestion à la source ; cela consistait à limiter essentiellement les débits de fuite des ouvrages. De nos jours, l'objectif étant de se rapprocher le plus possible du cycle naturel de l'eau en milieu urbain en intégrant cette gestion dans l'aménagement du territoire et en préconisant l'infiltration⁴ au proche du point de chute lorsque cela est possible.

D'un point de vue réglementaire, on peut citer la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 qui instaure des outils de planification avec la création des SDAGE et les SAGE⁵ qui peuvent, quant à eux, être créés à l'échelon inférieur des sous-bassins. Documents opposables⁶, ils s'appliquent à toutes les décisions administratives en lien avec le domaine de l'eau. Cette loi instaure également une obligation de déclaration « Loi sur l'eau » ou IOTA⁷ pour les projets susceptibles d'avoir un impact sur la ressource en eau, y compris le rejet des eaux pluviales, ainsi que le principe de zonage : les collectivités locales sont chargées de délimiter leurs territoires via les zonages d'assainissement collectif, non collectif et pluvial après diagnostics et validation par enquête publique. En particulier, le zonage pluvial sur un territoire, permet de définir des préconisations ciblées pour la maîtrise de l'imperméabilisation des sols, du débit ainsi que de l'écoulement des eaux pluviales et de leur pollution associée⁸. Les PLU et PLUi⁹ d'un territoire doivent être en adéquation avec les SDAGE et SAGE locaux en intégrant ces zonages.

2) Sujet, objectifs et enjeux de mon stage

Mon stage s'inscrivait dans le programme de recherche pérenne OPUR. Il s'agit d'un observatoire d'hydrologie urbaine, coordonné par le Leesu et dont la cinquième phase arrive à échéance en 2023. En particulier, les thèmes R3 « Gestion à la source des eaux pluviales » et O1 « Observatoire de la

² La pollution des eaux pluviales est essentiellement issue du ruissellement des eaux pluviales sur la chaussée là où la pollution des eaux usées domestiques est essentiellement de nature organique et biodégradable.

³ Avec les villes nouvelles telles que Marne la Vallée et Saint Quentin en Yvelines. (Thebault et al., 2020)

⁴ On entend ici l'infiltration dans le sol naturel, c'est-à-dire en dehors de l'ouvrage. Pour éviter la confusion, on lui préférera le terme d'exfiltration.

⁵ Respectivement les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux pour chacun des grands bassins hydrographiques et les Schémas d'Aménagement et de Gestion de l'Eau.

⁶ Un document opposable à des tiers est un document que tout le monde doit respecter même si le tiers en question n'a pas été partie prenante dans sa rédaction et sa validation.

⁷ Installations, Ouvrages, Travaux, ou Activités.

⁸ Cerema. Guide du zonage pluvial. De son élaboration à sa mise en œuvre. Bron : Cerema, 2020.

Collection : Références. ISBN : 978-2-37180-459-3

⁹ Respectivement Plans Locaux d'Urbanisme et Plans Locaux d'Urbanisme Intercommunal.

gestion à la source des eaux pluviales » auxquels contribue mon travail, visent l'analyse, l'évaluation et l'optimisation des nouvelles solutions de gestion intégrée des eaux pluviales¹⁰.

Il s'agissait d'analyser et évaluer le fonctionnement hydrologique d'un système de gestion des eaux pluviales au sein d'un quartier aménagé récemment en région parisienne à Saint Denis, dans le respect des règles locales de gestion à la source des eaux pluviales. L'enjeu était de savoir si l'abattement des volumes issus du ruissellement, via des solutions reposant essentiellement sur l'évapotranspiration, est possible là où l'exfiltration n'est pas possible du fait de la nature du sol : présence de gypses ou sols pollués d'anciennes friches industrielles. En effet, l'évapotranspiration reste un processus difficile à anticiper et il n'existe pas de méthode simple (en dehors des toitures végétalisées) pour l'évaluer ou prévoir les performances d'ouvrages hydrologiques reposant uniquement sur ce processus.

In fine, il s'agissait d'avoir un retour d'expérience sur ce type d'aménagement et plus précisément :

- D'analyser le fonctionnement du système à partir des observations disponibles
- De modéliser et évaluer la capacité à reproduire le comportement observé.
- De s'appuyer sur le modèle pour évaluer les performances du système.

Pour le second point, la modélisation ayant été réalisée sous SWMM, il s'agissait en fin de compte d'évaluer si le modèle SWMM était apte à décrire le système de la ZAC de Montjoie

Toutefois, les objectifs de mon stage ont évolué en raison de difficultés qui sont abordées plus loin dans ce rapport.

Il est enfin à noter que dans le cadre du suivi à long terme et à l'évaluation du dispositif de gestion des eaux pluviales sur la ZAC, ce stage fait suite à deux stages précédents réalisés en 2021 par Walid SEFRI (Université de Lille) et en 2022 par Maryam LACHAAL (Université de Lorraine).

III. Méthodologie

1) Présentation de la zone d'étude : la ZAC de la Montjoie

La Zone d'Aménagement Concertée (ZAC) de Montjoie se trouve sur le secteur de la Plaine à Saint Denis à proximité du stade de France et d'Aubervilliers au nord de Paris. C'est un ancien secteur industriel à proximité des autoroutes A1 et A86 qui a muté en partie vers un quartier urbain comprenant logements, bureaux, équipements sportifs et scolaires, le tout structuré avec l'arrivée du futur tramway T8 et de la ligne 15 du métro parisien dans le cadre du projet du Grand Paris. Le projet est toujours en cours, porté par l'aménageur SEQUANO¹¹, et couvre une superficie de 30ha.

La zone d'étude de ce stage correspond à une partie de l'aménagement réalisé dans le cadre de la phase 1 de la ZAC (limitée au nord par la rue de Landy, la rue des Fillettes à l'est, la rue Amilcar Cabral au sud, et la rue de la Procession à l'Ouest). Elle s'articule autour de la rue Georges Sand, et le début de l'avenue Amilcar Cabral en ce qui concerne l'espace publique. Elle couvre quatre parcelles privées : une dédiée au logement (Lots F2A & F2B), une au logement et à une école élémentaire (Lot E3d), une dédiée à des activités de bureaux (Lot E2b), et une occupée par le lycée polyvalent Angela Davis (Lot F1)

La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, page suivante, représente la zone étudiée de façon synthétique :

¹⁰ (OPUR 5 : 2019-2023 - OPUR, un observatoire d'hydrologie urbaine en Île-de-France, s. d.)

¹¹ Société d'économie mixte regroupant principalement des acteurs publics (département de Saint Denis, des établissements publics territoriaux et des communes), la caisse des dépôts, des bailleurs sociaux, ainsi que des acteurs privés.

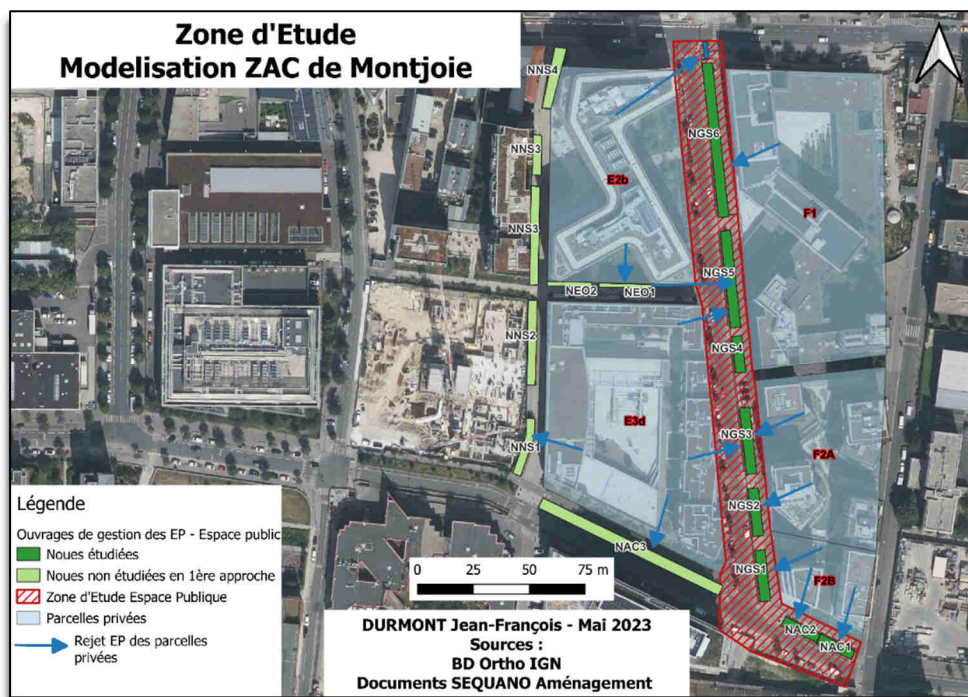


Figure 1 – Zone étudiée (zone hachurée plus parcelles privées ainsi que les ouvrages associés)

Le réseau sur la ZAC est séparatif. L'objectif est de gérer à la source les eaux pluviales. Le but de cette gestion à la source est de réguler le débit rejeté vers le réseau unitaire auquel la ZAC est connectée afin de respecter un débit de fuite maximum au global de 10 l/s/ha jusqu'à la période de retour décennale¹², tout en assurant un certain abattement (non quantifié lors de la conception) du ruissellement des pluies courantes. Sur l'espace public, des noues étanches (exfiltration impossible), mais comportant un massif de sol végétalisé de 30 cm, reposant sur un mélange terre-pierre de 120 cm collectent les eaux des surfaces imperméables (voiries et trottoirs) ainsi que des éventuels rejets depuis les parcelles privées. Les ouvrages mis en place sur les parcelles privées visent d'une part l'abattement du ruissellement en privilégiant la gestion à la source de l'eau dans des ouvrages végétalisés (toitures végétalisées, bassins de rétentions végétalisés...etc.) et le stockage / régulation du ruissellement avant rejet à débit limité vers les noues de l'espace public. Sur les parcelles privées, les ouvrages de rétention au sol n'ont pas été étanchés, l'exfiltration d'une partie des flux est donc possible sans que ce processus ait été explicitement pris en compte lors du dimensionnement.

La zone d'étude correspond à un bassin versant, caractérisé lors de précédentes phases du projet. Les noues de l'espace public sont divisées en 8 biefs de stockage, connectées en série via des ajutages, sont en pente et sont étanches. L'abattement du volume au niveau de ces ouvrages se fait uniquement par évapotranspiration de l'eau infiltrée au cours des événements pluvieux dans le sol des noues, dont le fonctionnement et dimensionnement est mal maîtrisé. L'excédent d'eau est ensuite évacué dans le réseau unitaire ovoïde existant en dessous de la rue de Landy à l'intersection avec la rue Georges Sand après un dispositif de régulation de débit de type Vortex commercialisé par la société Saint Dizier Environnement.

La Figure 2 ainsi que la Figure 3, page suivante, représentent de façon schématique le système suivi dans une coupe en long et en travers ainsi que les éléments remarquables associés.

¹² (ZAC Extension Montjoie – Dossier de déclaration au titre de la loi sur l'eau, 2013)

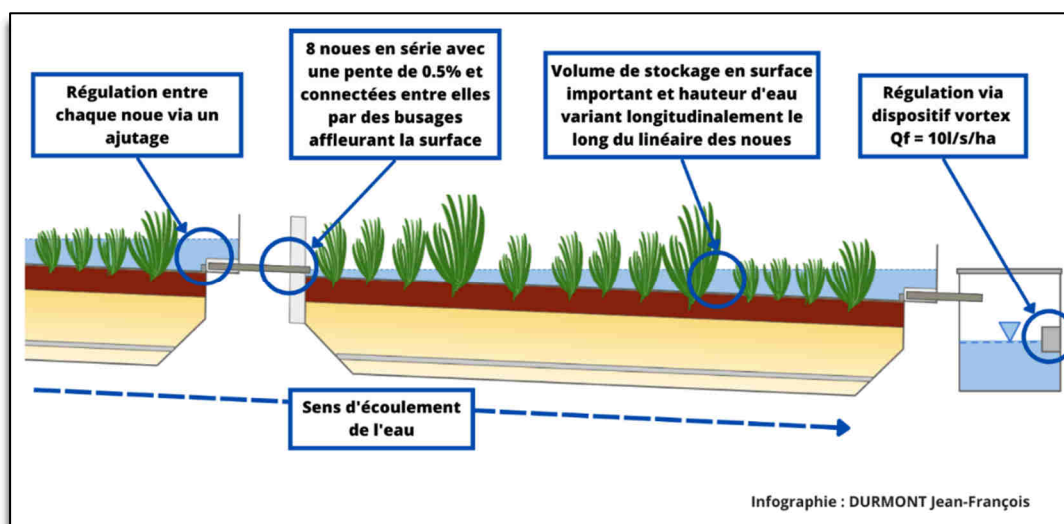


Figure 2 – Représentation schématique (profil en long) de l'ouvrage de gestion des eaux pluviales (partie publique) sur la ZAC de Montjoie le long de l'avenue A. Cabral et la rue G. Sand.

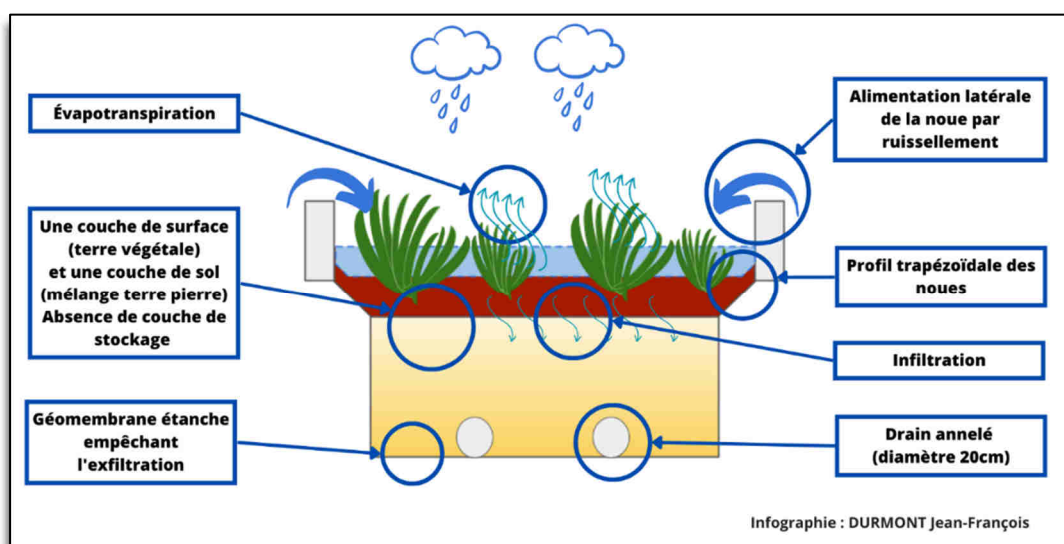


Figure 3 – Représentation schématique (profil en travers) de l'ouvrage de gestion des eaux pluviales (partie publique) sur la ZAC de Montjoie le long de l'avenue A. Cabral et la rue G. Sand.

Ces ouvrages n'ont pas été conçus dans un objectif de dépollution mais contribuent néanmoins à la réduction des flux polluants, d'une part en favorisant la réduction des flux de ruissellement rejoignant le réseau et d'autre part en favorisant des processus tels que la décantation, l'adsorption et la biodégradation des composés piégés dans le sol. Les pluies courantes ayant lieux sur les parcelles privées sont supposées essentiellement gérées par les dispositifs de gestion des eaux pluviales de celles-ci. En ce qui concerne les pluies dites exceptionnelles (période de retour supérieure à 10 ans), une mise en charge des noues de l'espace public et une surverse de celles-ci est possible : le dispositif de régulation à l'aval est « by-passé » et l'évacuation se fait directement par le réseau via un avaloir sans limitation de débit.

2) Données disponibles

Les données disponibles pour ce stage et utilisées dans la modélisation sont issues :

- D'une collecte de documents et fichiers d'ordre technique (plans de projet, de récolement, données SIG, études, dossier de déclaration loi sur l'eau... etc.) obtenus auprès des différentes parties prenantes du projet. Ces données issues des documents techniques ont

été collectées lors des stages précédents et ont été utilisées pour comprendre le dimensionnement et le principe de gestion des eaux pluviales sur la ZAC décrits précédemment ;

- D'essais et d'un suivi métrologique in situ, supervisés par le Leesu et le CEREMA. En l'occurrence une caractérisation hydrodynamique du sol des noues se trouvant sur l'espace public au moyen de la méthode BEST¹³ (réalisés au cours des stages précédents et dont les résultats sont disponibles sur l'Annexe 1 page 29) ainsi que le suivi de la hauteur d'eau en aval de l'ouvrage et en amont du dispositif à effet Vortex au moyen d'une sonde piézométrique autonome LevelTROLL commercialisée par la société In-Situ (sonde installée au cours du stage précédent mais dont les données ont été exploitées par mes soins). Cette chronique temporelle de la hauteur d'eau a pu être convertie en chronique temporelle de débit (hydrogramme) au moyen d'une relation univoque hauteur – débit communiquée par la société Saint Dizier Environnement¹⁴ (cf. Annexe 2 page 30). L'objectif était d'avoir une première estimation des débits à l'aval du système avec un dispositif de suivi simple. Quant aux données issues des essais BEST, elles ont été utilisées dans le paramétrage du modèle numérique développé sous SWMM ;
- De données pluviométriques communiquées par la Direction Eau et Assainissement (DEA) du département de la Seine Saint Denis et provenant de pluviomètres installés à proximité du site, en l'occurrence respectivement Saint-Ouen (Parc Albert Dhalenne à 2.9 km du site d'étude) & Saint Denis (Cimetière de Saint Denis à 5 km). Ces données ont été utilisées comme données d'entrée dans le modèle numérique ;
- De données d'Evapotranspiration Potentielle (ETP) provenant du projet Sense-City et dont les données proviennent d'un dispositif de mesure sur le campus de Champs sur Marne¹⁵, ainsi que celles mises à disposition par l'observatoire de recherche atmosphérique SIRT¹⁶. Tout comme la pluie, ces données ne proviennent donc pas d'un suivi métrologique direct sur le site d'étude. Celles-ci ont également été utilisées comme données d'entrée dans le modèle numérique.

Une partie de ces données « sources » ont été bancarisées et synthétisées par les stagiaires m'ayant précédé et ayant contribué au suivi et à l'évaluation du site. Pour ma part, j'ai essentiellement travaillé à :

- Mettre en forme et prétraiter les données ;
- Confronter et visualiser graphiquement les données.

Ce travail (cf. III.4) pour plus de détails) a été réalisé en grande partie sur l'environnement de développement Spyder avec le langage de programmation Python.

3) Modélisation sous SWMM

Storm Water Management Model (SWMM) est un logiciel américain en open-source développé par des chercheurs de l'Environmental Protection Agency (EPA) et constitue une référence en matière d'hydrologie urbaine. Une partie de mon travail a consisté à comprendre le fonctionnement général du logiciel et certains principes de modélisation que SWMM utilise.

¹³ Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters

¹⁴ Il s'avère que ce suivi s'avère peu satisfaisant. Cela est abordé plus loin dans ce rapport

¹⁵ (Sense-City – Présentation du projet, s. d.)

¹⁶ (SIRT – Atmospheric Observatory Research, s. d.)

a) Principe général

La modélisation sous SWMM se veut conceptuelle, notamment en ce qui concerne la transposition géographique dans la modélisation des bassins versants. Ce logiciel permet de modéliser différents objets comme des réservoirs avec des paramètres relativement simples, ainsi que des processus en hydraulique et en hydrologie urbaine, i.e. une partie du cycle de l'eau en milieu urbain. Un modèle SWMM comprend :

- Des bassins versants (BV) qui récoltent la pluie, infiltrent, évapotranspirent de l'eau, et génèrent du ruissellement ;
- Des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales implémentés sur ces BV, et désignés par le terme « LID » (Low Impact Development) dans SWMM. Et la proportion imperméable / perméable de ces BV. Ici, on étudie un projet d'aménagement à l'échelle d'un quartier que l'on divise en sous-bassins. On peut donc séparer les sous BV en sous BV imperméables à 100% (trottoirs et chaussée) et sous-BV perméables qui sont complètement occupés par des LID (noues ou autre techniques alternatives) ce qui permet de pouvoir leur affecter à 100% du ruissellement incident provenant de BV d'apport ;
- Des nœuds et arcs qui permettent de connecter ces différents BV. Ceux-ci servent à modéliser le réseau et peuvent respectivement représenter des exutoires ou des tuyaux. Ils peuvent également permettre de modéliser des réservoirs de stockage d'eau (storage unit) ;
- Enfin, les compartiments (atmosphère, sols, réseaux) dans lesquels évoluent les différents objets et qui permettent de modéliser les différents flux entre ceux-ci comme la précipitation, l'infiltration, l'évapotranspiration ou le ruissellement. Ici, les ouvrages sont isolés du sol et les seules interactions avec l'atmosphère sont la précipitation et l'évapotranspiration.

b) Modélisation des bassins versants (BV) et des techniques alternatives (Low Impact Development - LID)

SWMM conceptualise un BV comme une surface rectangulaire avec une pente uniforme, une largeur caractéristique W [m] (Width) et qui draine les eaux selon un seul « conduit » comme représenté ci-dessous sur la Figure 4 :

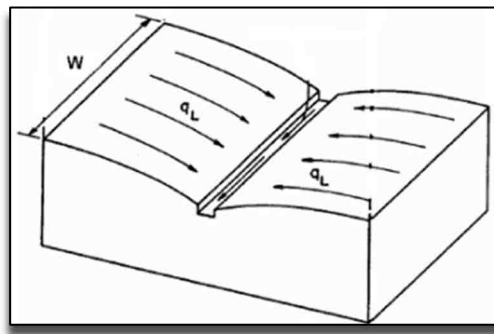


Figure 4 – Modélisation des BV et du ruissellement dans SWMM (Rossman & Huber, 2016a)

La mise en équation du ruissellement est basée sur un bilan hydrologique ainsi que sur l'équation de Manning Strickler rappelée ci-après :

$$Q = K_s \cdot S \cdot R_h^{2/3} \cdot S^{1/2}$$

Où :

Q : Débit volumique de ruissellement (généralement exprimé en m^3/s ou l/s). L'intensité du ruissellement¹⁷ [mm/h] est donnée par la relation : $r = \frac{Q}{A}$ où A (Area) est l'aire du bassin versant.

K_s : Coefficient de Strickler¹⁸ [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]. Le coefficient de Manning que l'on trouve dans la littérature désigne l'inverse de ce coefficient.

S : Surface mouillée [m^2] au travers de laquelle l'écoulement a lieu.

R_h : Rayon hydraulique [m]. On a $R_h = \frac{S}{P}$ où P est le périmètre mouillé [m] de la surface mouillée S au travers de laquelle s'effectue l'écoulement.

s : Pente [m/m] (slope) du plus long chemin d'écoulement.

Le bilan hydrologique avec l'utilisation de Manning Strickler amène à une équation différentielle non linéaire que SWMM résout par itération via un modèle numérique, en l'occurrence un schéma de Runge-Kutta du 5^{ème} ordre (Rossman & Huber, 2016a).

Concernant les LID, c'est une représentation 1D qui est utilisée. Chaque LID est décrit par une succession de 1 à 3 couches comme représenté ci-dessous sur la Figure 5 :

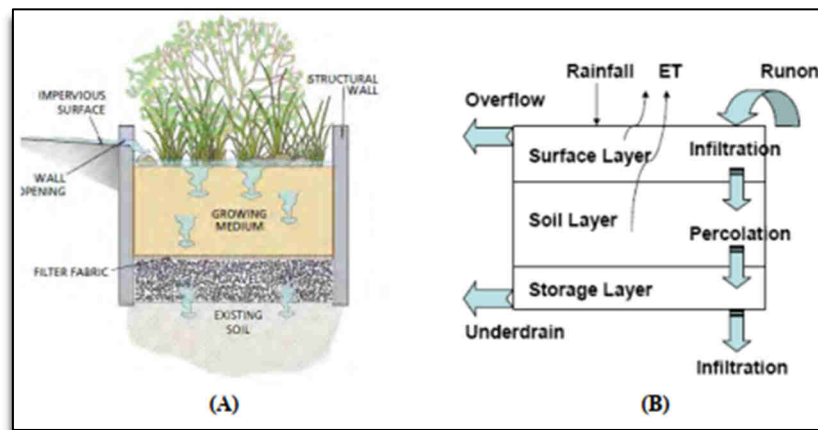


Figure 5 – Modélisation des LID sous SWMM (Rossman & Huber, 2016b)

La mise en équation se base sur le calcul des flux entre les couches et le bilan de masse au sein de chacune. L'infiltration est quant à elle modélisée au moyen du modèle de Green-Ampt¹⁹ et est limitée par le volume de stockage disponible dans les couches.

Divers paramètres hydrodynamiques des couches viennent compléter la modélisation des LID.

Enfin, SWMM permet également de modéliser de façon simplifiée l'exfiltration vers le sous-sol (nulle dans notre cas d'étude) et la vidange des couches par évapotranspiration entre deux événements pluvieux.

¹⁷ Bien qu'étant tous deux dimensionnellement homogènes à une longueur par unité de temps, cette intensité de ruissellement n'est pas à confondre avec une vitesse de ruissellement qui est donnée par $v = \frac{Q}{S}$. Il s'agit bien d'un débit surfacique ramené à la surface A du BV.

¹⁸ À ne pas confondre avec la conductivité hydraulique à saturation (perméabilité) et généralement symbolisée de la même façon.

¹⁹ Le modèle d'infiltration de Green-Ampt est un modèle simplifié de l'équation de Richard et adapté à l'infiltration pour les ouvrages de gestion des eaux pluviales. Dans ce modèle, la porosité, la conductivité hydraulique et la succion sont supposées constantes et isotropes.

c) Représentation de la zone d'étude avec SWMM

Pour le cas d'étude, les noues de l'espace public ont chacune été modélisées par deux bassins versants : un qui représente les talus et l'autre qui représente le fond de noue. Bien que les noues présentent deux talus, il est possible de les regrouper sous SWMM car la modélisation des BV est conceptuelle (on modélise un BV de surface équivalente double). À ces derniers est associée une largeur caractéristique double (car ils récupèrent le ruissellement de deux BV latéraux) qui correspond à deux fois la longueur des biefs de chacune des noues. La largeur caractéristique des fonds des noues correspond, quant à elle, à la largeur réelle des fonds de noues du site.

Il existe plusieurs types de LID modélisables. La déclinaison « Rain Garden » a été choisie. Bien qu'il existe un type de LID « Vegetative Swales », le type « Rain Garden » a été privilégié car il correspond mieux au fonctionnement hydrologique réel du cas étudié. En effet, le type de LID « Vegetative Swales » ne permet pas de représenter un système étanche comme c'est le cas sur notre site d'étude. Ce type d'objet ne permet pas en outre de modéliser le rôle de stockage des noues en surface et par défaut, la quantité d'eau en surface est calculée de la même façon que sur les BV, via la formule de Manning Strickler.

Le rôle de stockage / régulation (à la surface des noues et dans la couche de sol) a été quant à lui modélisé par un storage unit à l'aval des noues car les LID de type « Rain Garden » ne permettent que d'une part de modéliser un stockage dans la couche de sol et que d'autre part, il n'y a pas de couche de stockage à proprement dit dans le dispositif étudié – le seul stockage possible étant celui permis par la porosité du sol en fond de noues après infiltration. Un storage unit est un nœud auquel est associée une équation de stockage. Celle-ci repose sur une relation hauteur-surface miroir qui se base sur le principe d'une noue unique équivalente à l'ensemble des noues présentes sur le site et de section trapézoïdale (la surface miroir du volume stocké évoluant linéairement à la hauteur d'eau) et qui permet par conséquent de calculer le volume stocké. Cette relation ne tient cependant pas compte de la pente du linéaire des noues, ni des pentes latérales, ni des ajutages successifs. La régulation vortex, est également modélisée au moyen d'un nœud et associée à une relation univoque hauteur-débit²⁰ donnée en Annexe 2 page 30.

Enfin, les sous BV d'apports ont été modélisés directement avec le type d'objet correspondant sous SWMM. Les arcs permettent de relier l'ensemble et rendent compte d'un transfert d'eau via un ruissellement « incident » en cascade d'un sous BV à un autre.

Le modèle que j'ai utilisé dans le cadre de mon travail a été en grande partie mis au point par Maryam LACHAAL bien que j'y ai apporté quelques modifications mineures. Quoique le dispositif étudié soit connecté à des parcelles privées, nous avons fait l'hypothèse que l'ensemble des pluies courantes étaient gérées par les techniques alternatives se trouvant sur ces parcelles, si bien que seule la partie publique a été modélisée.

J'ai alimenté ce modèle avec des chroniques temporelles d'intensité de pluie (hyétochrome), ainsi que d'évapotranspiration potentielle (ces données encadrant la période de simulation du modèle). Les essais BEST ainsi que des données issues des documents techniques ont servi au paramétrage du modèle. Citons notamment les caractéristiques du sol dans les LID (porosité, perméabilité, teneur en eau au point de flétrissement, teneur en eau à la capacité au champ, épaisseurs des couches...etc.) et des sous-BV (pentes, aires, largeurs caractéristiques...etc.).

Le modèle est schématiquement représenté sur la Figure 6, page suivante, et un aperçu avec l'interface du logiciel est visible sur l'Annexe 3 page 31 :

²⁰ SWMM demande une série hauteur-débit et extrapole entre chacun des points

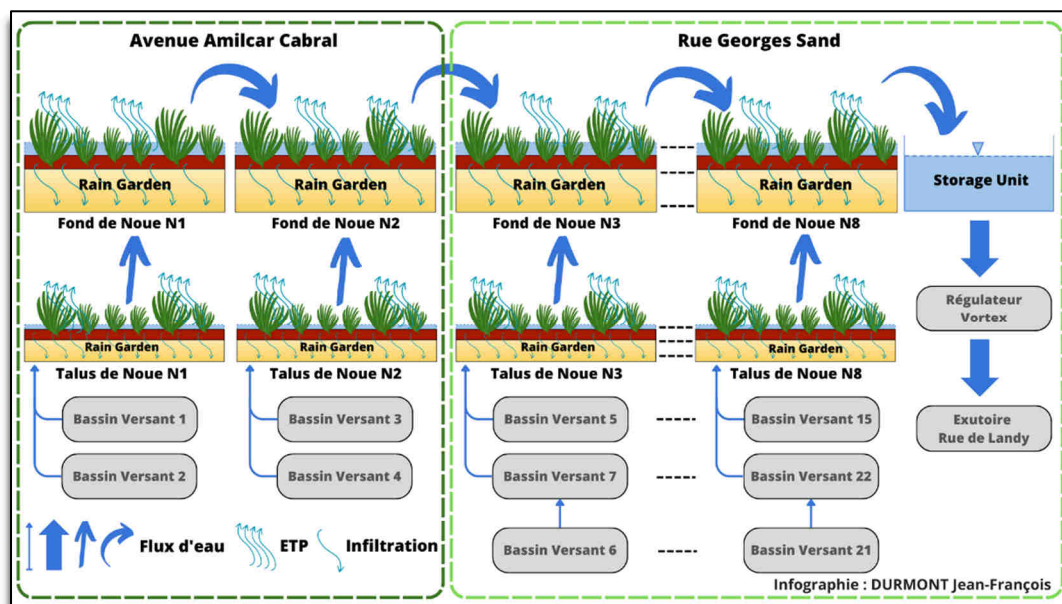


Figure 6 – Modélisation du dispositif de gestion des eaux pluviales étudié de la ZAC sous SWMM

4) Pré-traitement, mise en forme et visualisation des données

Une partie de mon travail a consisté à travailler sur les données brutes du suivi in situ afin de les adapter pour une utilisation lors de la modélisation en ce qui concerne les données d'entrée, les convertir en une grandeur exploitable, les visualiser et ainsi pouvoir confronter les données issues du modèle vis-à-vis de données réelles afin de le valider. Cela a essentiellement consisté à :

- Écrire des scripts en Python de datavisualisation, de pré-traitement des données et/ou de mise en forme. Par exemple pour afficher des graphs, convertir les données issues des pluviomètres (bascullements horodatés d'augets) en chronique d'intensité pluviométrique en mm/h à pas de temps régulier. Ou pour adapter leur format à un format compatible avec SWMM (format des dates i.e. format américain versus le format européen, unités... etc.) ou encore changer leur pas de temps (passage d'une chronique horaire à une chronique journalière par exemple).
- Visualiser et valider des données de chronique temporelle de hauteur d'eau, i.e. identifier des périodes où les données ne sont pas valides, appliquer des corrections sur la mesure (hauteur morte, dérive du capteur, bruit), et régénérer une chronique qui tienne compte de ces corrections afin de pouvoir les convertir en débit. Ceci, afin d'analyser la réponse pluie-débit du système, sa dynamique et calculer des volumes cumulés (pluie et débit). J'ai également confronté les données observées aux données simulées.

Toutefois, ce travail a rencontré ses limites et n'a pas pu permis de valider le modèle même s'il a permis d'en tirer certaines observations. C'est pourquoi, une analyse de sensibilité du modèle a été menée.

5) Analyse de la sensibilité du modèle

a) Définition

L'analyse de la sensibilité consiste en l'étude de l'importance relative des paramètres d'entrée d'un modèle sur une variable d'intérêt en sortie de celui-ci. Elle permet de déterminer le poids de certains paramètres sur la modélisation et d'évaluer la robustesse d'un modèle, i.e. déterminer quelle part

d'incertitude d'une variable d'intérêt en sortie peut être attribuée à un paramètre en entrée (Saltelli et al., 2019).

Cela consiste en la variation d'un ou plusieurs paramètres d'entrée sur un intervalle qui représente en général l'incertitude de ces derniers et de regarder la valeur de sortie d'une variable d'intérêt pour chacune des variations sur cet intervalle. Puis d'en déduire la sensibilité de la variable d'intérêt en sortie par rapport à chacun de ces paramètres.

Il existe deux approches en ce qui concerne l'analyse de sensibilité :

- Une approche **locale** : cela consiste à faire varier les paramètres un par un, « one at a time », sur le domaine défini à partir d'une paramétrisation (ou modèle) de référence. Les paramètres sont considérés comme indépendants les uns des autres, i.e. non corrélés entre eux.
- Une approche **globale** : cela consiste à faire varier plusieurs paramètres à la fois sur des domaines définis. Ces paramètres ainsi que leurs variations peuvent être choisies aléatoirement. Cela permet d'apprécier si des paramètres sont corrélés entre eux et notamment si des effets de compensation sur la variable d'intérêt en sortie peuvent être observés.

La principale limite à une analyse de sensibilité est le temps de calcul. En effet, cela revient à faire tourner un modèle et simuler son évolution un grand nombre de fois (une simulation pour chaque variation unitaire ou globale du ou des paramètres testés) et chaque simulation peut déjà prendre un certain temps. En outre, dans le cas d'une approche globale, le nombre de simulation est généralement plus grand car cela nécessite de regarder l'influence de plusieurs paramètres à la fois avec les différentes combinaisons possibles.

Une analyse de sensibilité nécessite d'identifier les variables d'intérêts en sortie, les paramètres d'entrée susceptibles d'exercer une influence sur celles-ci ainsi que leurs domaines de variation (ou d'incertitude).

Dans le présent cas d'étude, j'ai réalisé une analyse locale de sensibilité et cherché à évaluer la variation d'une variable d'intérêt en sortie X_s par rapport la valeur moyenne de celle-ci pour chaque variation d'un paramètre d'entrée X_e (Dassibat, 2022). Autrement dit :

$$S(X_e/X_s) = \frac{\sigma(X_s)}{\overline{X_s}}$$

Où :

$S(X_e/X_s)$: sensibilité du paramètre d'entrée X_e vis-à-vis de la variable d'intérêt en sortie X_s .

$\sigma(X_s)$: écart-type de la série des valeurs obtenues pour la variable d'intérêt en sortie X_s pour chaque variation du paramètre d'entrée X_e .

$\overline{X_s}$: moyenne de la série des valeurs obtenues pour la variable d'intérêt en sortie X_s pour chaque variation du paramètre d'entrée X_e .

Les valeurs de sensibilité sont généralement exprimées en %.

b) Principe de l'algorithme utilisé, modèle de référence, et variables d'intérêt en sortie évaluées

Le principe de l'algorithme utilisé est relativement simple. Pour ce faire, j'ai utilisé l'API SWMM²¹ codé en Python (Pichler, 2023) qui permet essentiellement de lire les fichiers de paramétrage lié à un modèle SWMM (input), y apporter des modifications, de lancer une simulation avec le modèle et de lire les fichiers de résultats (output). Le logigramme de l'algorithme que j'ai développé se trouve en Annexe 4 page 32.

Une analyse de sensibilité suppose un modèle (ou paramétrisation) de référence qui nous permet de pouvoir réinitialiser le modèle à chaque itération de l'algorithme. Celui-ci est associé à des chroniques de données entre le 1er janvier 2022 00h00 UTC et le 31 mai 2023 23h55 UTC ainsi qu'à des paramètres d'entrée de référence comme les caractéristiques des sous BV, les chroniques d'ETP et de pluies, ainsi que les caractéristiques hydrodynamiques des LID (cf. partie III.3) pour plus de détails).

Les variables d'intérêt en sortie que j'ai évaluées à travers cette analyse sont :

- Le volume cumulé en sortie du modèle V_s entre le 1^{er} mars 2022 00h00 et le 31 mai 2023 23h55 obtenu en intégrant la chronique de débit sur cette même période (méthode des trapèzes). L'intérêt étant de pouvoir évaluer l'efficacité ainsi que les abattements du dispositif de gestion des eaux pluviales.
- Les valeurs minimales, médianes et moyennes de la teneur en eau ainsi que du vide disponible dans le sol (calculées à chaque pas de temps au cours d'une simulation) pour les biefs en amont et en aval du dispositif correspondant dans la réalité aux noues NAC1 & NGS6 (cf. Figure 1 page 8) ou les noues N1 et N8 du modèle (cf. Figure 6 page 14). L'intérêt étant de pouvoir évaluer le rôle du stockage des noues et comprendre dans quelle mesure la modélisation simplifiée de l'évapotranspiration sous SWMM permet de rendre compte des processus physiques mis en jeu.

c) Paramètres d'entrée et domaine de variation

Les domaines de variation des paramètres testés ont été déterminés à partir de valeurs expérimentales in situ, d'abaques ou d'une incertitude estimée.

Le tableau page suivante récapitule les paramètres testés, leur valeur de référence et leur domaine de variation.

Les teneurs en eau à la WP et à la FC ont été obtenus à partir de l'équation de Van Genuchten (1980) et du potentiel hydrique dans ces deux configurations, respectivement 4 et 2,5 (cf. Annexe 1 page 29).

Il est intéressant de remarquer que nous n'avons pas choisi de faire varier la pente des bassins versants, ni le coefficient de Manning de ces derniers. En effet, ces paramètres vont jouer sur la dynamique de la chronique du débit simulé et non sur le volume en sortie du dispositif. Néanmoins, il aurait été possible de les inclure pour s'en convaincre.

Le pas de variation de chacun de ces paramètres a été de 2%. 0% correspondant au début de l'intervalle et 100% à la fin. Ce qui donne 51 variations possibles par paramètres. Soit 561 variations possibles et autant de simulations sous SWMM.

²¹ Une API pour « application programming interface » est une interface logicielle qui permet de « connecter » un logiciel ou un service à un autre logiciel ou service afin d'échanger des données et des fonctionnalités. En l'occurrence l'API SWMM permet de faire communiquer un environnement Python avec SWMM.

Paramètre	Valeur de référence	Domaine de variation ou d'incertitude
Chronique ETP	Chronique mixte construite à partir des données du SIRTA et du projet Sense-City (référence k=1).	Variation de la chronique entre 0,5 et 3 fois sa valeur. (Variation de l'ET réelle estimée à partir de l'ETP)
Aire des BV Imperméables	Valeurs de références déterminées par SIG sur les orthophotos IGN (référence k=1)	Variation des aires de $\pm 20\%$ (Incertitude estimée)
Pourcentage de saturation initiale en eau des sols des noues	32,6% Teneur en eau à la Field Capacity ramenée sur l'échelle WP - Porosité	Variation de la saturation initiale entre 0 et 100% (Domaine de variation entre la teneur en eau au WP et à saturation)
Conductivité Hydraulique du sol des noues	23,19 mm/h Moyenne géométrique des essais BEST in situ	Variation entre 10^{-6} et $3 \cdot 10^{-5}$ m/s (Domaine obtenu à partir des essais BEST in situ)
osité du sol des Noues	0,4848 m ³ /m ³ Moyenne de la teneur en eau du sol à saturation des essais BEST in situ	Variation entre 30 et 60% (Abaque)
Teneur en eau au point de flétrissement (WP - Wilting Point)	0,1145 m ³ /m ³ Moyenne de la teneur en eau du sol au WP des essais BEST in situ avec un potentiel hydrique fixé à 4	Variation entre 8 et 15% (Domaine obtenu à partir des essais BEST in situ et d'un potentiel hydrique fixé à 4)
Teneur en eau à la capacité au champ (FC - Field Capacity)	0,2350 m ³ /m ³ Moyenne de la teneur en eau du sol à la FC des essais BEST in situ avec un potentiel hydrique fixé à 2,5	Variation entre 19 et 26% (Domaine obtenu à partir des essais BEST in situ et d'un potentiel hydrique fixé à 2,5)
Hauteur de stockage en eau en surface du fonds des noues	10 mm	Variation de 5 à 30 mm (Domaine de variation estimé)
Hauteur de stockage en eau en surface des talus des noues	2,5 mm	Variation de 1 à 10 mm (Domaine de variation estimé)
Epaisseur de la couche de sol des noues	1500 mm Hauteur tirée du plan de récolement du profil en long des noues du site d'étude	Variation de la hauteur de récolement de ± 20 cm soit entre 1300 et 1700 mm (Incertitude estimée)
Proportion Aire BV Talus - Fonds des noues	Fonds de Noues = 68% Aire Totale Valeurs de références déterminées par SIG sur les orthophotos IGN pour l'aire totale. Proportions initiales définies à partir du plan de récolement du profil en travers des noues du site d'étude	Variation de la surface du fond de noues de 60 à 70% de l'aire totale maintenue constante (Incertitude estimée)

Tableau 1 – Paramètres d'entrée testés, valeurs de références et domaines de variation

6) Performance hydrologique du dispositif étudié dans le modèle

À la suite de l'analyse de sensibilité, un bilan hydrologique du modèle a pu être réalisé. Celui-ci a consisté en une évaluation de l'efficacité simulé du modèle en fonction des différents paramètres d'entrée testés, ainsi que de l'abattement mensuel et par événements pluvieux. Pour ce faire, un algorithme développé en Python et permettant de déterminer les dates de départ et de fin d'un événement pluvieux en fonction de certains critères, et développé par le CEREMA, a été utilisé. L'analyse statistique a été réalisée également au moyen de Python par mes soins.

Dans le cas présent, l'efficacité du modèle e , sur une période donnée, correspond au volume d'eau qui a été retenu par le dispositif par rapport au volume d'entrée. Autrement dit :

$$e = \frac{V_e - V_s}{V_e}$$

Où :

V_e : volume cumulé, sur une période donnée, en entrée du modèle. Celui-ci provient du ruissellement sur la chaussée et de la pluie directe sur les Noues.

V_s : volume cumulé, sur une période donnée, en sortie du modèle.

L'abattement fait référence à la même grandeur. Toutefois, l'abattement en hydrologie urbaine fait directement référence à l'abattement en volume, là où l'efficacité peut être calculée différemment et se rapporter à une autre grandeur selon le domaine étudié.

7) Confrontation aux observations

À partir de l'analyse de sensibilité, il a été possible de confronter le débit simulé au débit réel mesuré à l'exutoire du dispositif sur la ZAC sur la période commune des données (16 juin 2022 au 24 avril 2023). Toutefois, comme déjà évoqué dans le paragraphe III. 4), ce travail a rencontré ses limites.

IV. Résultats

1) Pré-traitement, mise en forme et visualisation des données

Après avoir récupéré les données de pluviométrie et celles du piézomètre installé à l'aval du site, et les avoir prétraitées, j'ai pu faire de la visualisation de celles-ci dont un aperçu est disponible en Annexe 5 page 33.

Même si les données pluviométriques (hyétoigramme) sont issues d'un pluviomètre relativement éloigné du site d'étude (5 km), on peut remarquer qu'il y a une certaine corrélation entre celles-ci et la mesure de hauteur d'eau dans le regard, i.e. une hauteur d'eau qui évolue en fonction des apports issues de la pluie et du ruissellement sur la chaussée, même si certaines réponses ne sont pas associées à une pluie ou inversement certaines pluies non associées à une réponse du système.

Au moyen de la relation univoque hauteur débit qui rend compte du fonctionnement du dispositif vortex installé dans le regard, et communiquée par la société St Dizier Environnement, j'ai pu convertir cette chronique de hauteur d'eau en hydrogramme. Néanmoins, et on le remarque déjà sur le graphique ci-dessus, la hauteur (et par conséquent le débit) ne décroît pas rapidement après avoir atteint une valeur de pointe et qu'il y a des périodes de « plateaux » à hauteur (ou débit) quasi constante sur plusieurs jours. Après investigation et bilan volumétrique, il s'est avéré que ces phases de hauteur constante ne rendaient pas compte d'un écoulement à débit constant (mais bien une charge constante sans écoulement). Ces dernières sont probablement causées par un clapet anti-retour en aval du dispositif de régulation qui empêche celui-ci de fonctionner correctement. Cela

remettant en cause non seulement la relation hauteur – débit qui n’est probablement plus valable dans ce mode de fonctionnement dégradé mais également une validation du modèle par une comparaison débit simulé – débit réel en sortie du dispositif.

C’est pourquoi je me suis concentré sur la sensibilité et performance du modèle à la suite de ces observations. Néanmoins, il a été possible de faire une première comparaison entre hydrogramme réel et simulé.

2) Analyse de la sensibilité du modèle

a) Volume d’eau cumulé en sortie

Les résultats obtenus sont les suivants :

Paramètre	Sensibilité Volume en Sortie V_e (%)
Chronique ETP	44,69
Aire des BV Imperméables	14,83
Pourcentage de saturation initiale en eau des sols des noues	0,98
Conductivité Hydraulique du sol des noues	0,45
Porosité du sol des Noues	0,67
Teneur en eau au point de flétrissement (WP - Wilting Point)	0,18
Teneur en eau à la capacité au champ (FC - Field Capacity)	0,00
Hauteur de stockage en eau en surface du fonds des noues	0,28
Hauteur de stockage en eau en surface des talus des noues	0,31
Epaisseur de la couche de sol des noues	0,18
Proportion Aire BV Talus - Fonds des noues	0,08

Tableau 2 – Sensibilités obtenues pour le volume d’eau cumulé en sortie pour chacun des paramètres testés

On remarque que les paramètres qui caractérisent le sol n’exercent aucune influence sur le cumul d’eau en sortie du modèle. L’aire des bassins versants imperméables ont une influence, avec une sensibilité de 14,8%, dans le sens où l’apport en eau des noues proviennent du ruissellement de ces derniers ainsi que de l’apport direct par la pluie sur celles-ci. Il est donc logique de penser que si l’aire des bassins versants d’apport varie, alors le cumul en sortie également.

L’évapotranspiration potentielle est le paramètre qui a le plus de poids sur le cumul en eau, avec une sensibilité de 44,7%. Cela est cohérent avec le fait qu’il n’y aucune exfiltration de modélisé conformément à ce qui a été réalisé sur l’ouvrage réel et que l’évapotranspiration est le seul facteur d’abattement du ruissellement par le dispositif. C’est pourquoi, nous nous attarderons principalement sur ce paramètre pour évaluer la performance du modèle (bilans hydrologiques).

b) Teneur en eau & vide disponible dans les biefs en amont et en aval du modèle

Les résultats obtenus sont les suivants :

Paramètre	Sensibilité Minimum Teneur en Eau (%)	Sensibilité Médiane Teneur en Eau (%)	Sensibilité Moyenne Teneur en Eau (%)	Sensibilité Minimum Vide Disponible (%)	Sensibilité Médiane Vide Disponible (%)	Sensibilité Moyenne Vide Disponible (%)
Chronique ETP	45,14	8,18	10,07	0,00	66,67	48,07
Aire des BV Imperméables	2,48	0,27	0,97	0,00	6,88	9,74
Pourcentage de saturation initiale en eau des sols des noues	3,43	0,04	0,65	0,00	1,01	6,11
Conductivité Hydraulique du sol des noues	3,13	0,61	1,36	0,00	17,38	15,08
Porosité du sol des Noues	29,21	20,27	20,91	0,00	10,28	10,47
Teneur en eau au point de flétrissement (WP - wilting point)	0,00	0,04	0,04	0,00	1,09	0,33
Teneur en eau à la capacité au champ (FC - field capacity)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hauteur de stockage en eau en surface du fonds des noues	0,93	0,29	0,42	0,00	8,07	4,45
Hauteur de stockage en eau en surface des talus des noues	1,69	1,09	0,87	0,00	41,83	10,01
Epaisseur de la couche de sol des noues	1,97	0,04	0,16	0,00	1,07	1,60
Proportion Aire BV Talus - Fonds des noues	2,38	0,04	0,50	0,00	1,01	4,64

Tableau 3 – Sensibilités obtenues pour la teneur en eau et la proportion de vide disponible pour chacun des paramètres testés

La première chose que nous pouvons remarquer sur ces résultats, c'est la sensibilité sur le minimum de la « teneur en vide disponible », autrement dit le complémentaire de la teneur en eau par rapport à la saturation ou porosité. Cela peut s'expliquer par le fait que les noues sont saturées à un moment donné dans le modèle.

L'ETP reste un paramètre déterminant quant à la capacité de stockage des noues. Cela est assez logique car au plus l'évapotranspiration est importante, au plus les noues peuvent sécher et récupérer une capacité de stockage en eau. Cela corrobore le rôle clé de l'ET dans la gestion des eaux pluviales en absence d'exfiltration dans le dispositif étudié.

En faisant varier la porosité du sol, l'espace disponible pour stocker l'eau évolue, ce qui explique la sensibilité apparente de la teneur en eau vis-à-vis de ce paramètre. Néanmoins, c'est moins le cas pour le vide disponible. Autrement dit, la teneur en eau évolue sensiblement avec la variation de la porosité mais l'espace disponible pour stocker l'eau varie peu ce qui confirme l'idée que les noues sont saturées à un moment donné dans le modèle et sèchent peu. Vu que l'analyse de sensibilité est locale, l'ETP correspondante lorsque nous faisons varier la porosité reste celle de référence ($k=1$).

Il est à noter que les valeurs obtenues de sensibilité pour la teneur en eau et le vide disponible ne peuvent pas être comparées directement entre elles car la moyenne des séries de valeurs de chaque variable d'intérêt n'est pas la même, même si ces grandeurs restent corrélées entre-elles et c'est pourquoi il n'y a aucun lien direct entre elles.

3) Performances du modèle

1) Analyse générale

Nous nous attarderons essentiellement sur les paramètres d'entrée pour lesquelles les variables d'intérêt de sortie sont sensibles.

Le graphique de l'Annexe 6 page 34 représente l'évolution de l'efficacité du modèle en fonction du coefficient multiplicatif appliqué à l'ETP.

L'efficacité du modèle augmente avec l'évapotranspiration, ce qui est assez logique avec le fait que l'évapotranspiration est le seul moyen pour abattre le ruissellement en absence d'exfiltration. Pour rappel, l'ETP provient d'autres sites d'études mais donne néanmoins une bonne idée de ce qui pourrait être observée sur le site. Ce graphique confirme qu'une bonne estimation de l'ETP in situ est nécessaire pour déterminer l'efficacité du système de gestion des eaux pluviales sur la ZAC.

Dans le scénario de référence ($k=1$), l'abattement sur la période d'intérêt est de 23%.

En ce qui concerne l'aire des bassins versants imperméables (cf. Annexe 7 page 35), l'efficacité du modèle diminue avec l'aire qui augmente, autrement dit le volume en sortie du modèle augmente avec l'aire des bassins versants. Cela est cohérent avec l'idée que le dimensionnement du dispositif est directement corrélé avec la surface des bassins versants d'apport et que dans une certaine mesure, l'incertitude sur l'aire des bassins versants d'apports est à prendre en compte pour dimensionner au mieux le dispositif de gestion des eaux pluviales.

2) Bilan mensuel

À partir de l'analyse de sensibilité, j'ai pu réaliser un calcul d'abattement mensuel pour évaluer l'efficacité du modèle sous différents scénarios d'évapotranspiration (facteur k égal à 0.5, 1 et 1.5). Une version pleine page du diagramme en bâtons est disponible sur l'Annexe 8 page 36.

Un abattement mensuel de 100% signifie que l'ensemble du volume d'entrée, pendant le mois considéré, a été géré par le système modélisé.

Les résultats sont résumés ci-après :

Scénarios	Moyenne	Médiane
Chronique ETP ($k = 0,5$)	36,0%	22,4%
Chronique ETP ($k = 1$)	51,5%	39,3%
Chronique ETP ($k = 1,5$)	62,8%	54,1%

Tableau 4 – Abattements mensuels : valeurs remarquables (moyenne & médiane des abattements mensuels) sur la période d'intérêt (1er mars 2022 – 31 mai 2023)

Ce graphique et ces valeurs confirment également que la performance du système modélisé est très dépendante d'une bonne estimation de l'évapotranspiration.

3) Bilan par événements pluvieux

J'ai utilisé deux approches différentes pour la caractérisation des événements pluvieux :

- Des événements pluvieux caractérisés de manière « classique » où le début de l'évènement correspond au début de la pluie (intensité > valeur seuil) et où la fin correspond à un débit de sortie en dessous d'une valeur seuil, pendant une certaine durée, sous condition d'une pluie nulle (ou en dessous d'un certain seuil), également pendant une certaine durée.
- Des événements pluvieux caractérisés par rapport au dispositif où le début correspond à un début de ruissellement dans le système (en l'occurrence le talus de la première noue), au-dessus d'une valeur seuil, avec le même critère de fin que précédemment.

À partir de là, j'ai pu, de la même manière que pour le bilan mensuel, procéder à un calcul d'abattement. Et à partir de là tracer les boîtes à moustache des abattements pour chaque scénario d'évapotranspiration.

Les graphiques pour chaque scénario d'ETP et chaque approche sont disponibles en Annexe 9 et Annexe 10 (respectivement en pages 37 et 38). Ils sont résumés ci-après dans le tableau suivant :

Approche	1ère approche			2ème approche		
Scénarios / Valeurs remarquables - Distribution	1er quartile	Médiane	3ème quartile	1er quartile	Médiane	3ème quartile
Chronique ETP (k = 0,5)	2,45%	11,17%	20,29%	17,69%	31,34%	100,00%
Chronique ETP (k = 1)	9,31%	17,99%	74,92%	81,06%	29,73%	100,00%
Chronique ETP (k = 1,5)	13,62%	32,86%	100,00%	49,32%	100,00%	100,00%

Tableau 5 – Abattements par événements pluvieux : valeurs remarquables sur la période d'intérêt (1er mars 2022 – 31 mai 2023)

Les valeurs négatives d'abattements obtenues dans le cadre de la seconde approche signifient que les volumes de sortie sont plus importants que les volumes d'entrée. Cela peut s'expliquer par :

- Une non prise en compte de la pluie qui tombe sur les BV d'apports durant le temps de concentration pour arriver jusqu'aux talus du dispositif modélisé.
- Que l'abattement se fait en partie à travers les pertes initiales sur les BV d'apports. Dans la réalité, cela peut également se traduire par le fait qu'une partie de l'eau en entrée est détournée du dispositif (et s'écoule ailleurs).

J'ai pu également représenter les abattements pluvieux en fonction de la lame d'eau (volume en entrée du modèle rapportée à la surface totale du dispositif i.e. les noues plus les BV d'apports) dans le cadre de la première approche (pour le scénario de référence ETP k =1, graphique représenté en Annexe 11 page 39).

On remarque que les abattements élevés ont lieu pour les faibles lames d'eau en entrée (moins de 2cm). Pour aller plus loin, il pourrait être intéressant de quantifier quels types de pluies sont concernées par ces abattements, et notamment leurs périodes de retour. Au plus l'évapotranspiration augmente, au plus des volumes élevés en entrée peuvent être gérés par le dispositif.

4) Confrontation aux observations :

Puisque l'ETP a été détecté comme étant le paramètre déterminant, j'ai pu tracer les débits simulés dans 3 scénarios d'évapotranspiration (facteur k égal à 0.5, 1 et 1.5), le hyétogramme associé ainsi que le débit réel à l'exutoire sur la période commune (16 juin 2022 au 24 avril 2023) et ainsi pu faire une première comparaison (cf. Annexe 12 page 40). En raison des problèmes de mesure de débit à l'exutoire du dispositif, et abordés dans la partie IV. 1), ce travail a été partiel et réalisé

manuellement. Cette confrontation a consisté à regarder si le modèle et le dispositif in situ « répondaient » simultanément ou non. Aucun bilan en volume n'a été fait en raison de la non-fiabilité de la mesure du débit à l'exutoire du dispositif. La difficulté résidant sur le fait de détecter des « réponses » (i.e. des variations au-delà d'un certain seuil de hauteur ou de débit dans le regard à l'aval des noues) du système étudié avec une mesure dégradée du débit.

Sur la période commune des mesures et des simulations (16 juin 2022 – 23 avril 2023), 38 évènements pluvieux ont été détectés. 25 génèrent une réponse claire du modèle mais sur ceux-ci seuls 18 sont associés à une réponse réelle du dispositif. Il n'est pas illogique que chaque évènement simulé n'ait pas de « correspondance » réelle notamment en raison de l'incertitude sur le débit en sortie ou en absence de pluie réelle sur le site d'étude (pluie localisée uniquement au niveau du pluviomètre ayant servi à la modélisation).

Sur les 13 évènements restants, 10 semblent être des faibles évènements (intensité maximale inférieure à 2 mm/h) et il est cohérent que ni le modèle, ni le dispositif réel ne génèrent de réponse dans ces cas.

4 réponses supplémentaires du dispositif réel ont été détectées sur la période (i.e. sans réponse du modèle à priori) et peuvent rendre compte d'un décalage temporel, principalement en raison du fait que le pluviomètre à l'origine du hyétogramme utilisé dans la simulation n'est pas à proximité directe du site d'étude géographiquement parlant (et dans ce cas, il n'est pas aisé de savoir si elles peuvent être rattachées ou non à des évènements existants), ou à l'inverse en raison d'une pluie non mesurée sur le site du pluviomètre mais bien présente sur le site d'étude.

En outre, on observe une différence significative d'ordre de grandeur entre les débits simulés de pointe et les débits réels qui semblent correspondre également à des débits de pointe (2 à 2.5 fois plus élevé). Cela dit, on ne peut pas conclure sur cet aspect car il est probable que le clapet anti-retour perturbe non seulement l'écoulement en aval du dispositif vortex mais rend également caduque la relation univoque hauteur – débit que j'ai utilisé (cf. Annexe 2 page 30).

V. Discussions et perspectives

1) Discussions

Les séries de données utilisées dans le cadre de la modélisation constituent un biais car elles ne rendent pas tout à fait compte du dispositif étudié. Que ce soient les données pluviométriques utilisées qui proviennent d'un pluviomètre situé à 2,9 km de la ZAC qui peuvent en outre présenter des manques (pour raison de maintenance ou de dysfonctionnement) ou celles d'ETP qui ne proviennent également pas du site d'étude. Sans compter que les données d'ETP proviennent de deux sources différentes bien que ne présentant pas de différences majeures (cf. Annexe 13 page 41).

L'étude de l'efficacité du modèle a montré qu'une bonne évaluation de l'ETP est déterminante dans l'évaluation de la performance du dispositif, d'autant plus là où l'exfiltration est impossible. Cependant, celle-ci dépend de plusieurs facteurs que sont notamment l'existence d'une couche de stockage, la teneur en eau du sol, les conditions atmosphériques, le type de végétation ainsi que son entretien, ou encore l'environnement urbain avec l'ombre portée (Ouédraogo et al., 2022).

La confrontation entre modélisation et réalité montre ses limites en raison de la difficulté à avoir un hydrogramme fiable de la sortie du dispositif de gestion des eaux pluviales étudié. Il paraît donc difficile de se baser là-dessus pour valider le modèle et déterminer si celui-ci rend réellement compte de la spécificité du dispositif de gestion des eaux pluviales de la ZAC de Montjoie. L'alternative sur ce point étant d'enlever le clapet anti-retour en aval du régulateur vortex mais la présence de celui-ci

indique que vraisemblablement l'eau du réseau unitaire peut refluer vers le système des eaux pluviales.

En ce qui concerne l'approche locale du calcul de sensibilité, et notamment le fait d'utiliser la moyenne de la série des valeurs obtenues pour la variable d'intérêt en sortie, j'ai utilisé comme référence un cours enseigné à l'ENPTE (Dassibat, 2022). Or d'autres sources indiquent que le calcul de l'écart-type doit se ramener à la valeur de référence de la variable d'intérêt (Saltelli, 2015) car la sensibilité représente la variation par rapport à la référence lorsqu'on fait varier un paramètre d'entrée. De plus, J'ai choisi dans mon approche locale de faire varier indépendamment les domaines de variation de chacun des paramètres testés avec un même pas de variation de 2%. Il aurait été possible de choisir des pas de variations différents mais cela peut impliquer un temps de calcul plus élevé.

Il aurait été également possible de recourir à une autre méthode de cheminement dans l'espace des paramètres, notamment au moyen de la méthode de Morris (Morris, 1991). Comme la méthode que j'ai employée, il s'agit d'une méthode locale. Elle consiste également à discrétiser un domaine de variation de plusieurs paramètres (k paramètres) avec p niveaux, i.e. le nombre de valeurs possibles du domaine de chacun des paramètres. La principale différence consiste à définir n uplets aléatoires des k paramètres d'entrées et de faire varier un paramètre à la fois pour chacun de ces uplets d'un certain pas de variation Δ qui dépend de p et en choisissant aléatoirement l'ordre des paramètres que l'on modifie. Morris recommande un nombre pair de niveaux et que le pas de variation soit égal à $\Delta = p/(2(p - 1))$ ²².

Pour un uplet donné de valeurs des k paramètres $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k)$, la variation élémentaire d'une variable d'intérêt en sortie y lors de la variation d'un paramètre en entrée i (de valeur x_i) est définie par : $d_i(X) = \frac{y(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta, \dots, x_k) - y(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_k)}{\Delta}$

La sensibilité de la variable d'intérêt en sortie y est définie par Morris comme étant l'écart-type de ces variations élémentaires rapporté à la moyenne de celles-ci. En ce qui concerne le temps de calcul, cette méthode nécessite a priori moins d'itérations puisque le nombre de simulations pour un paramètre donné ne dépend plus de la subdivision des paramètres comme dans la méthodologie que j'ai employée. Toutefois, cette méthode ne permet pas de détecter des effets non linéaires ou d'indépendances entre les paramètres d'entrée (Pophillat, 2022). Pour cela, il aurait fallu mener une approche globale.

Une autre source d'incertitude concerne le choix de la méthode de modélisation en elle-même. En effet, SWMM utilise certaines approximations. En premier lieu, l'évapotranspiration des surfaces végétalisées et l'évaporation des surfaces imperméabilisées sont modélisées à partir d'une même chronique d'évapotranspiration potentielle. En second lieu, l'évapotranspiration dépend de plusieurs paramètres évoqués plus haut et qui ne sont par conséquent pas pris en compte par SWMM, comme l'assimilation de l'eau par les plantes et qui dépend directement du type de végétaux et de la rétention du sol, ce que permet d'autres logiciels comme HYDRUS (Lisenbee et al., 2021). Qui plus est, d'autres processus, comme la régulation du ruissèlement à la surface des LID, c'est-à-dire les dispositifs d'ajutage entre les noues dans notre cas d'étude, ne sont pas pris en compte dans SWMM (Tunqui Neira et al., 2023). Ou d'autres sont simplifiés, comme l'infiltration dans un sol avec une perméabilité à saturation considérée comme isotrope.

²² Pour faire le parallèle avec mon approche, la paramétrisation de référence que j'ai prise aurait pu constituer un de ces uplets (à l'exception notable qu'il a été choisi au lieu d'être aléatoire) et le nombre de niveaux p de mon approche est 51 (pas de variation de 2% de 0 à 100% du domaine de variation, soit 51 valeurs possibles).

2) Perspectives

Puisque la confrontation entre la réponse du modèle et le débit en sortie pose des difficultés et que la solution de facilité, à savoir enlever le clapet anti-retour à l'aval du dispositif vortex, n'est probablement pas envisageable, la solution pour valider le modèle serait de trouver un autre moyen de confrontation. En particulier, avec la mesure de la teneur en eau dans le sol au cours du temps qui pourrait être réalisée sur le dispositif étudié avec la mise en place de lysimètres. Cela permettrait en outre de pouvoir mesurer l'ETP au plus proche du site d'étude.

La mesure au plus proche de la pluviométrie constituerait un autre point d'amélioration facilement accessible car elle constitue une donnée d'entrée majeure du modèle. Bien qu'une fois le modèle validé, il est possible de le soumettre à d'autres conditions météorologiques, pour par exemple évaluer la résilience de ce dispositif de gestion des eaux pluviales au changement climatique.

Dans un second temps, on pourrait valider l'hypothèse que les dispositifs de gestion des eaux pluviales présents sur les parcelles privées sont indépendants du système étudié pour les pluies fréquentes (période de retour inférieure à 10 ans) en implémentant les parcelles privées dans le modèle. Mais cela n'aurait de sens qu'une fois que le modèle de la partie publique soit validé.

Enfin, une comparaison avec d'autres logiciels serait également une piste à envisager, chose qui était initialement envisagé pour mon stage, comme GIFMod²³ ou HYDRUS²⁴.

Conclusion ?

²³ (*Green Infrastructure Flexible Model | A Versatile Flexible Platform to Model Water Quality Management Systems*, 2016)

²⁴ (*PC-PROGRESS - HYDRUS*, s. d.)

Bibliographie

- Bechmann, G. (1888). *Salubrité urbaine : Distribution d'eau, assainissement* (2ème édition). Baudry & Cie, Libraires éditeurs. <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k91017s/f1.item>
- Dassibat, Q. (2022). *Cours Bilan Carbone et ACV. École Nationale des Travaux Publics de l'État. Green Infrastructure Flexible Model | A versatile flexible platform to model water quality management systems*. (2016, juin 7). <https://gifmod.com/>
- Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains (Leesu). (s. d.). <https://www.leesu.fr/>
- Langlamet, A., Saulais, M., & Kerloc'H, B. (2020). *Guide du zonage pluvial – De son élaboration à sa mise en oeuvre*. CEREMA. <http://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/zonage-pluvial>
- Lisenbee, W. A., Hathaway, J. M., Burns, M. J., & Fletcher, T. D. (2021). Modeling bioretention stormwater systems : Current models and future research needs. *Environmental Modelling & Software*, 144, 105146. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105146>
- Loi du 10 juillet 1894 relative à l'assainissement de Paris et de la Seine—Légifrance. (s. d.). Consulté 1 août 2023, à l'adresse <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000000314616>
- Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau—Légifrance. (s. d.). Consulté 1 août 2023, à l'adresse <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000173995#:~:text=L'eau%20fait%20partie%20du,que%20des%20droits%20ant%C3%A9rieurement%20%C3%A9tablis.>
- Morris, M. D. (1991). Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. *Technometrics*, 33(2), 161-174. <https://doi.org/10.1080/00401706.1991.10484804>
- OPUR 5 : 2019-2023—OPUR, un observatoire d'hydrologie urbaine en Île-de-France. (s. d.). Consulté 1 août 2023, à l'adresse <https://www.leesu.fr/opur/opur-5-2019-2023>
- PC-PROGRESS - HYDRUS. (s. d.). Consulté 10 août 2023, à l'adresse <https://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus>
- Pichler, M. (2023). *SWMM_API: API for reading, manipulating and running SWMM-Projects with python (0.3)* (0.4.22) [Python]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7054804>
- Pophillat, W. (2022). *Conséquences d'une systématisation des pratiques d'infiltration à la parcelle des pluies courantes à l'échelle de petits bassins versants urbains et péri-urbains – Apports de la modélisation intégrée* [Grenoble Alpes]. <https://theses.hal.science/tel-03770218>
- Rossman, L., & Huber, W. (2016a). *Storm Water Management Model—Reference Manual—Volume I – Hydrology (Revised)*. Office of Research and Development - US Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>
- Rossman, L., & Huber, W. (2016b). *Storm Water Management Model—Reference Manual—Volume III – Water Quality*. Office of Research and Development - US Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

Saint Dizier Environnement. (s. d.). *Limiteur de débit—PVX* -. Saint Dizier environnement. Consulté 2 août 2023, à l'adresse <https://www.saintdizierenvironnement.eu/produit/314/limiteur-de-debit-limiteur-de-debit-pvx>

Saltelli, A. (2015). *Sensitivity analysis : An introduction* [PPT].

seinesaintdenis.fr. (2023, août 2). *Le service public départemental d'assainissement*.
seinesaintdenis.fr. <https://seinesaintdenis.fr/Le-service-public-departemental-d-assainissement>

Sense-City – Présentation du projet. (s. d.). Consulté 9 août 2023, à l'adresse <https://sense-city.ifsttar.fr/presentation>

SIRTA – Atmospheric Observatory Research. (s. d.). Consulté 2 août 2023, à l'adresse <https://sirta.ipsl.fr/fr/home-fr-2/>

Thebault, E., Sage, J., Ferrier, V., Kerloc'H, B., Saulais, M., & Berthier, E. (2020). *La gestion patrimoniale des ouvrages et aménagements dédiés à la gestion des eaux pluviales urbaines*. CEREMA. https://www.cerema.fr/system/files/documents/2020/11/2009_giemu-cerema-rapport-axea_gestion-patrimoniale_vf.pdf

Tryby, M. (2023). *SWMM - Storm Water Management Model* (5.2.3) [C]. US Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>

Tunqui Neira, J. M., Gromaire, M.-C., Chancibault, K., & Chebbo, G. (2023). Toward a comprehensive functional typology of stormwater control measures for hydrological and water quality modeling purposes. *Blue-Green Systems*, 5(1), 41-56. <https://doi.org/10.2166/bgs.2023.026>

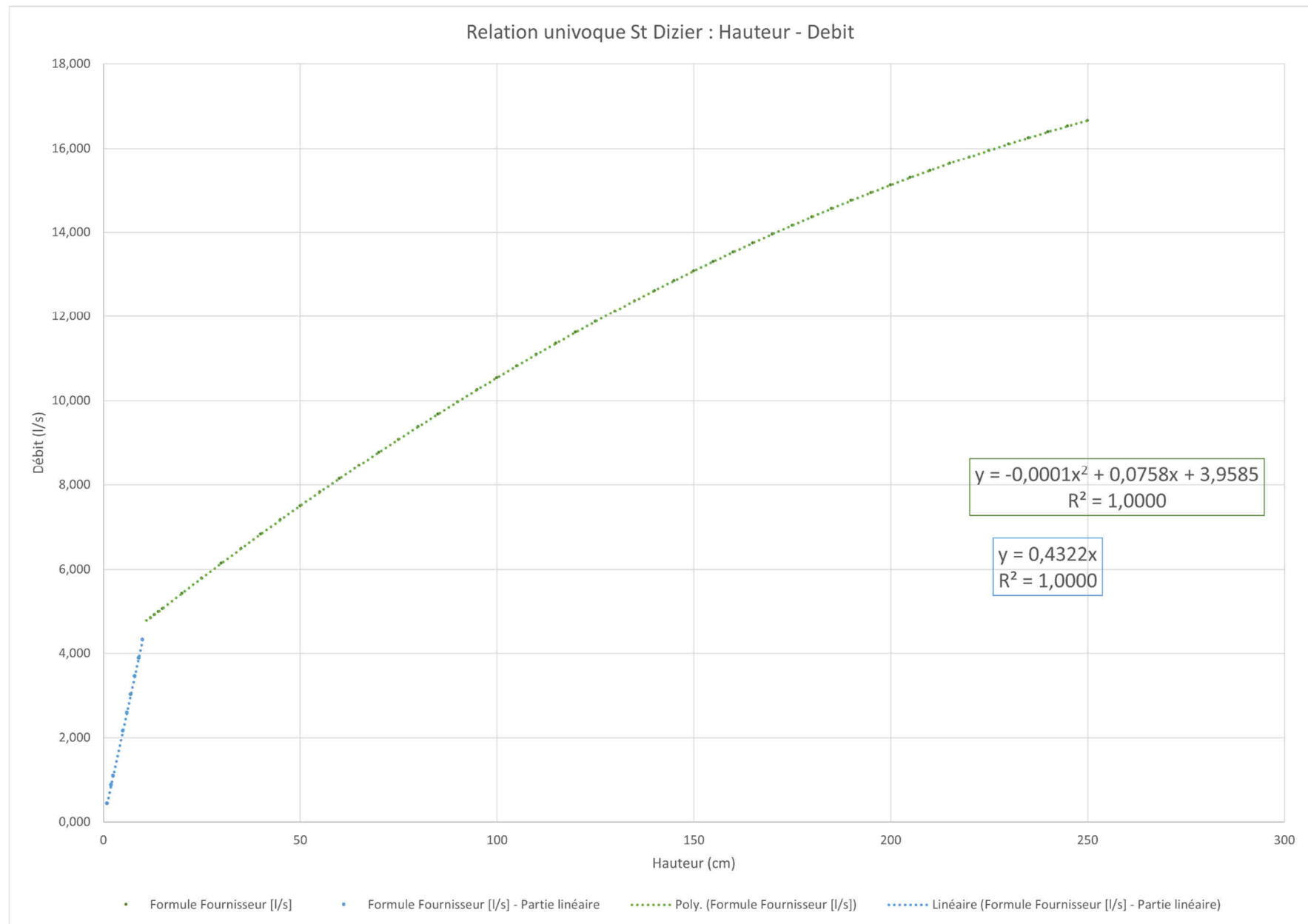
ZAC Extension Montjoie – Dossier de déclaration au titre de la loi sur l'eau. (2013). SEQUANO Aménagement.

Annexes :

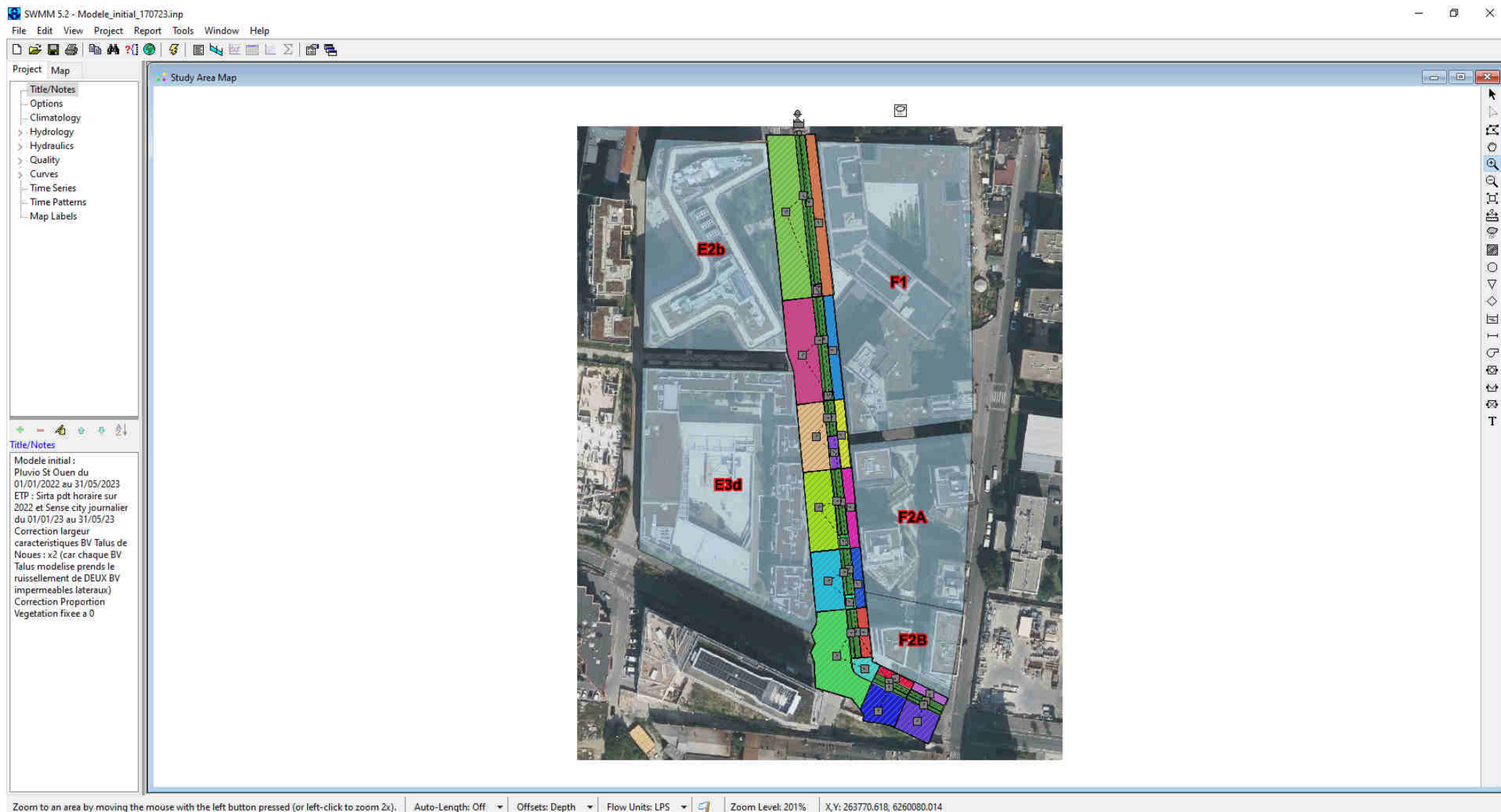
Annexe 1 – Essais BEST réalisés au cours du stage de Walid Sefri en 2021 amendés des valeurs de teneur en eau au point de flétrissement et à la capacité au champ au moyen de l'équation de Van Genuchten (1980) qui représente la succion en fonction de la teneur en eau (courbe de rétention). Le potentiel hydrique est le logarithme décimal de la succion.....	29
Annexe 2 – Relation univoque Hauteur – Débit du dispositif Vortex PX120 en aval du dispositif de gestion des eaux pluviales avant le réseau unitaire. Relation communiquée par la société St Dizier et reproduite ici à des fins d'illustrations.	30
Annexe 3 – Interface du logiciel SWMM avec un aperçu du modèle développé pour la ZAC de Montjoie.....	31
Annexe 4 – Logigramme de l'algorithme développé pour l'analyse de Sensibilité du modèle développé sous SWMM	32
Annexe 5 - Hydrogramme à la sortie du dispositif et Hyétogramme du pluviomètre de St Ouen du 16 juin 2022 au 23 avril 2023 (date de récupération des données).....	33
Annexe 6 – Efficacité en sortie du modèle selon les différents scénarios d'ETP. Ici, avec k variant de 0.5 à 3 (pas de variation de 2%)	34
Annexe 7 – Efficacité du modèle en fonction du coefficient multiplicatif sur les bassins versants imperméables.....	35
Annexe 8 – Abattements mensuels du modèle en fonction des trois scénarios d'ETP : k = 0.5, k=1 et k = 1.5. k=1 correspond au scénario de référence.	36
Annexe 9 – Abattements du modèle par évènements pluvieux (1 ^{ère} approche) en fonction des trois scénarios d'ETP.....	37
Annexe 10 – Abattements du modèle par évènements pluvieux (2 nd e approche) en fonction des trois scénarios d'ETP.....	38
Annexe 11 – Abattement (%) en fonction de la lame d'eau du système (volume du ruissellement + pluie directe sur les noues, le tout ramené à la surface du site d'étude) – 1 ^{ère} approche de détermination des évènements pluvieux.....	39
Annexe 12 – Confrontation des débits simulés avec le modèle sous les différents scénarios d'ETP, avec le hyétogramme du pluviomètre de St Ouen et l'hydrogramme en sortie du dispositif étudié	40
Annexe 13 – Comparaison des séries de données ETP SIRTa vs Sense-City sur la période 16 juin 2022 – 31 décembre 2022.....	41

ID	m	n	η	Ks (m s-1)	hg (mm)	S (mm s-0.5)	Teneur Eau Sat (m3m-3)
Best1	0,1	2,223	11,959	2,34E-05	-63,4518	1,017	0,487
Best2	0,103	2,23	11,684	2,89E-06	-196,869	0,584	0,445
Best3	0,096	2,213	12,39	5,32E-06	-68,25	0,553	0,547
Best4	0,081	2,177	14,295	4,78E-06	-120,818	0,62	0,46
		Moyenne géométrique Ks		6,44E-06	m/s		
		Soit		23,19	mm/h		
Potentiel hydrique Fletrissement	4	Pression capillaire - potentiel eau (mm)	-100000,00				
ID	m	n	η	hg (mm)	Teneur Eau Sat (m3m-3)	Teneur Eau Fletrissement	
Best1	0,1	2,223	11,959	-63,4518	0,487	0,095	
Best2	0,103	2,23	11,684	-196,869	0,445	0,106	
Best3	0,096	2,213	12,39	-68,25	0,547	0,116	
Best4	0,081	2,177	14,295	-120,818	0,46	0,141	
				Moyenne	0,4848	0,1145	
Potentiel hydrique Capacite au Champ	2,5	Pression capillaire - potentiel eau (mm)	-3162,28				
ID	m	n	η	hg (mm)	Teneur Eau Sat (m3m-3)	Teneur Eau Capacité au Champ	
Best1	0,1	2,223	11,959	-63,4518	0,487	0,204	
Best2	0,103	2,23	11,684	-196,869	0,445	0,235	
Best3	0,096	2,213	12,39	-68,25	0,547	0,242	
Best4	0,081	2,177	14,295	-120,818	0,46	0,259	
				Moyenne	0,4848	0,2350	

Annexe 1 – Essais BEST réalisés au cours du stage de Walid Sefri en 2021 amendés des valeurs de teneur en eau au point de flétrissement et à la capacité au champ au moyen de l'équation de Van Genuchten (1980) qui représente la succion en fonction de la teneur en eau (courbe de rétention). Le potentiel hydrique est le logarithme décimal de la succion.

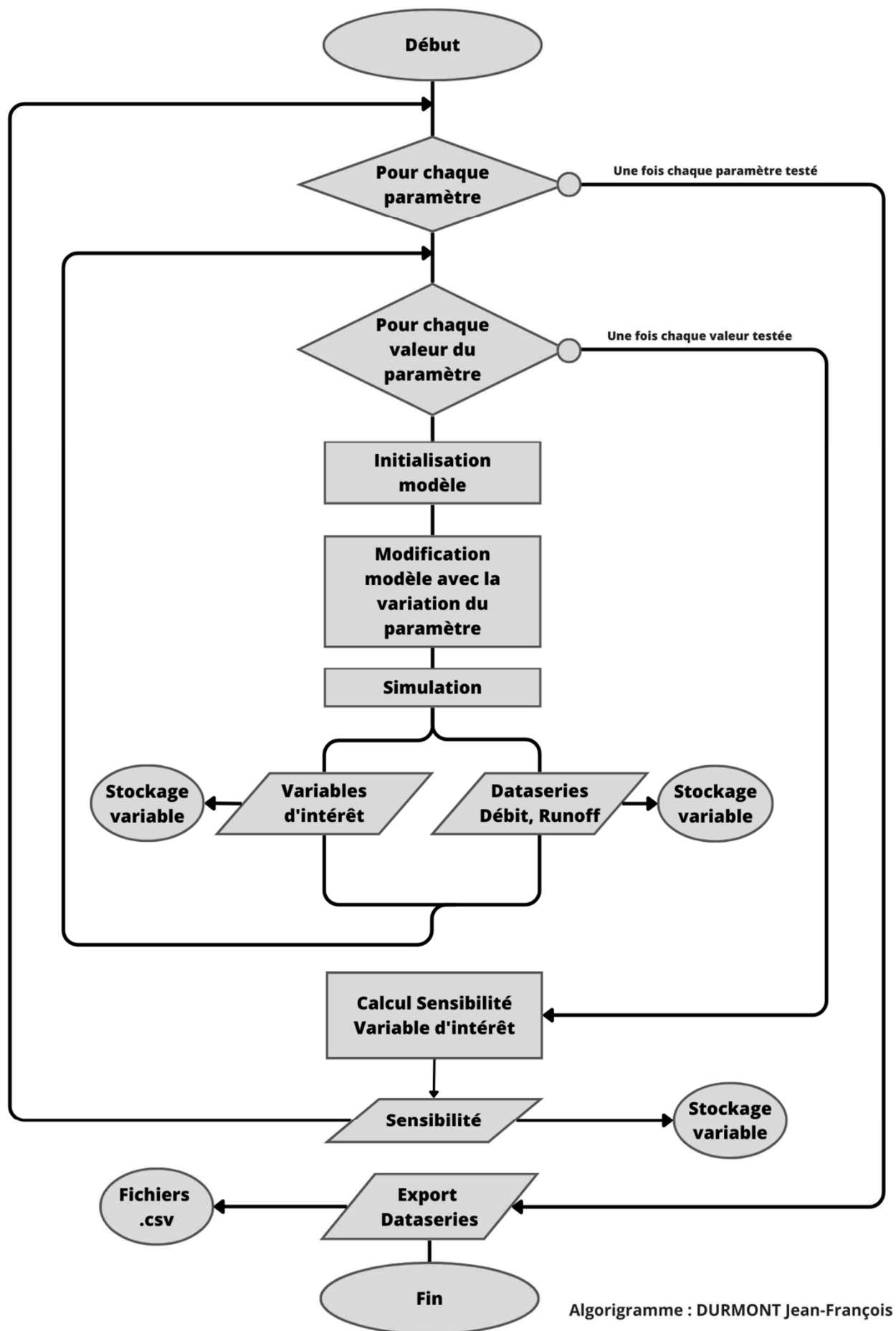


Annexe 2 – Relation univoque Hauteur – Débit du dispositif Vortex PX120 en aval du dispositif de gestion des eaux pluviales avant le réseau unitaire. Relation communiquée par la société St Dizier et reproduite ici à des fins d'illustrations.



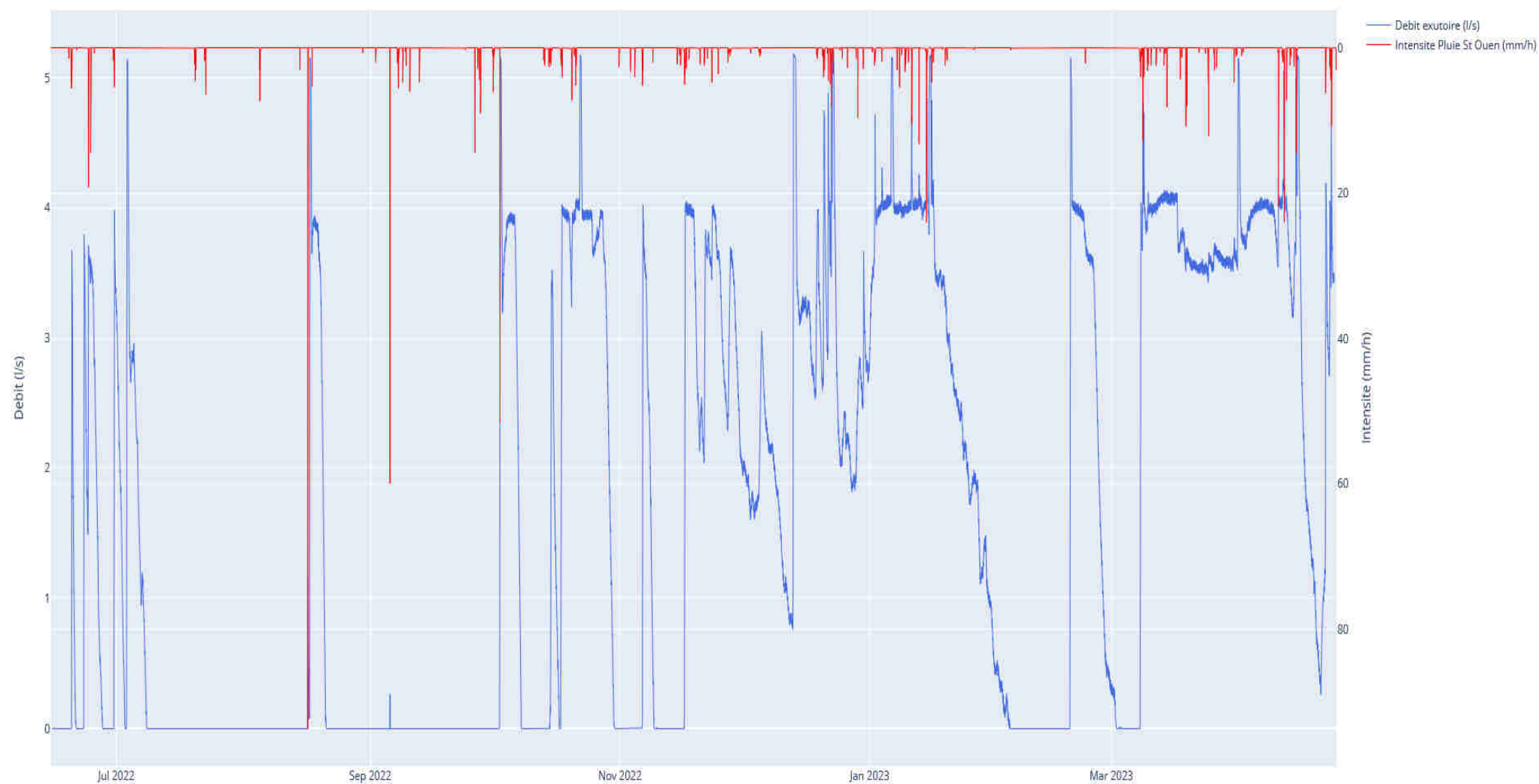
Annexe 3 – Interface du logiciel SWMM avec un aperçu du modèle développé pour la ZAC de Montjoie.

Commentaire : Bien qu'il soit possible d'intégrer un arrière-plan associé à une géolocalisation, il n'existe pas à proprement parler d'interface SIG sous SWMM (Il est tout à fait possible par exemple de modifier l'aire des BV bien que le modèle soit à l'échelle de l'arrière-plan).



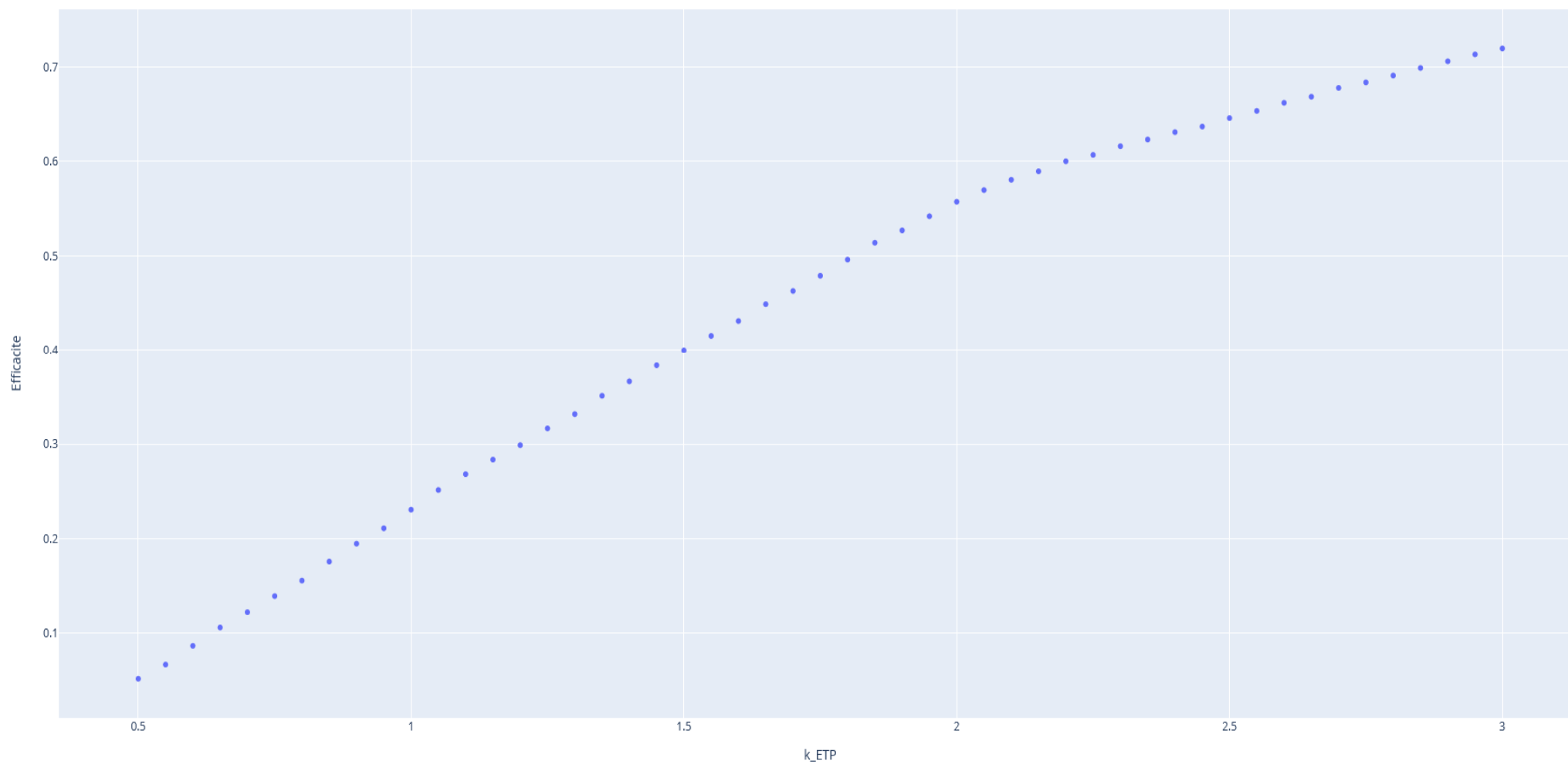
Algorithme : DURMONT Jean-François

Debit Exutoire Zac Montjoie (Formule St Dizier Environnement) et Pluie Pluvio St Ouen



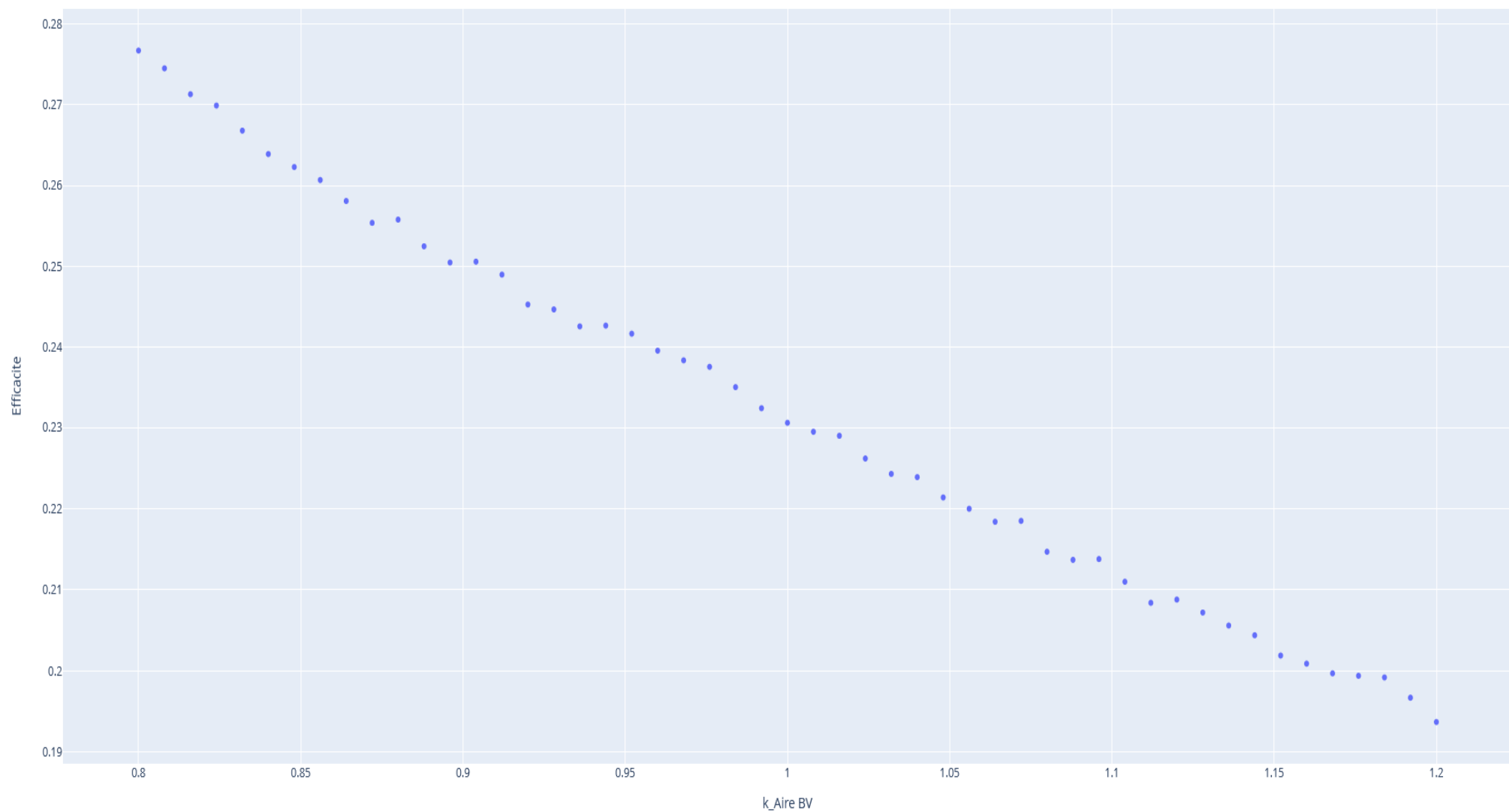
Annexe 5 - Hydrogramme à la sortie du dispositif et Hyétogramme du pluviomètre de St Ouen du 16 juin 2022 au 23 avril 2023 (date de récupération des données).

ETP - Efficacite : $1 - (\text{Cumul_Sortie_litres} / \text{Cumul_Entree_litres})$



Annexe 6 – Efficacité en sortie du modèle selon les différents scénarios d'ETP. Ici, avec k variant de 0.5 à 3 (pas de variation de 2%)

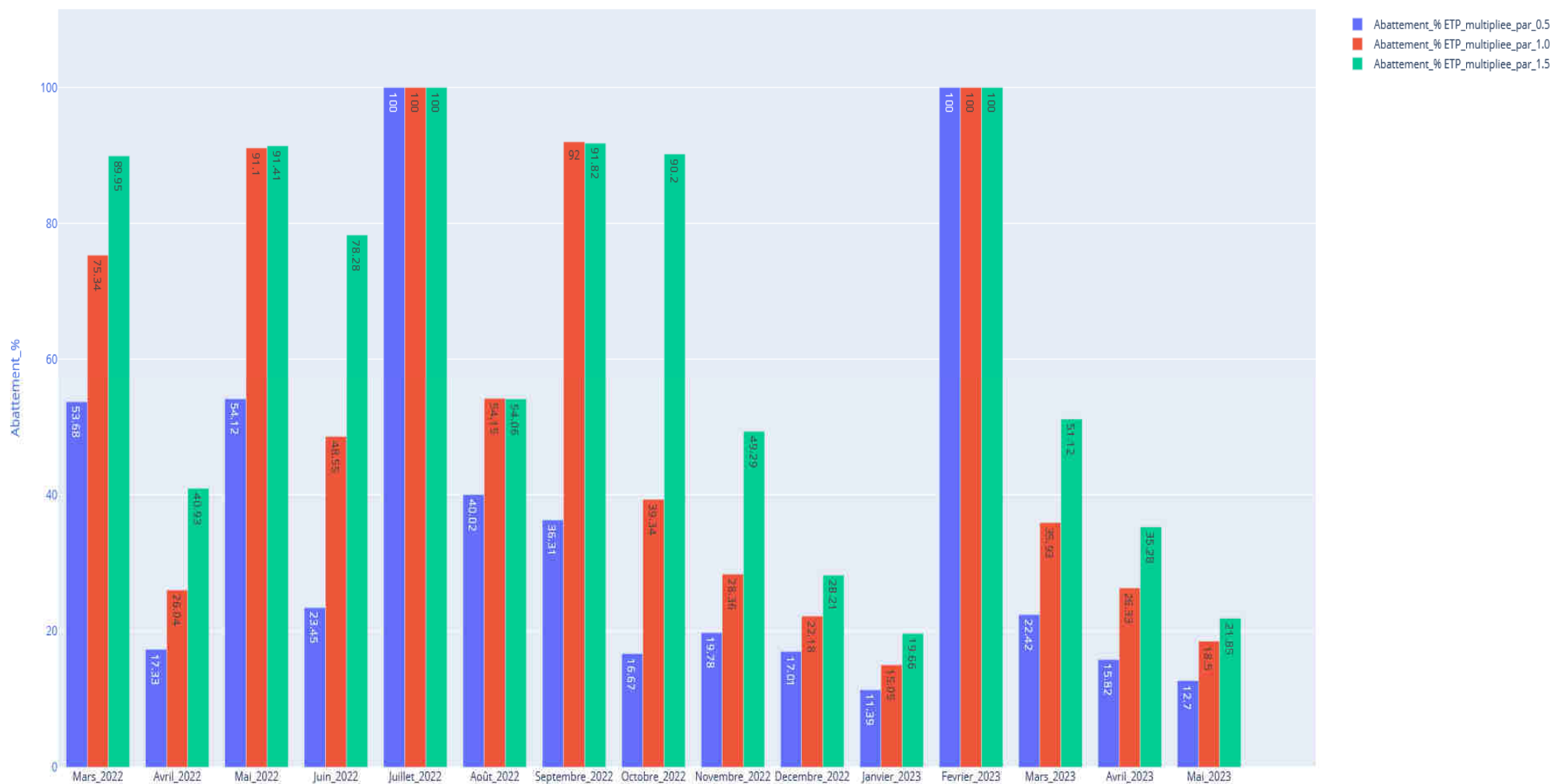
Aire_BV_Impermeables - Efficacite : $1 - (\text{Cumul_Sortie_litres} / \text{Cumul_Entree_litres})$



Annexe 7 – Efficacité du modèle en fonction du coefficient multiplicatif sur les bassins versants imperméables

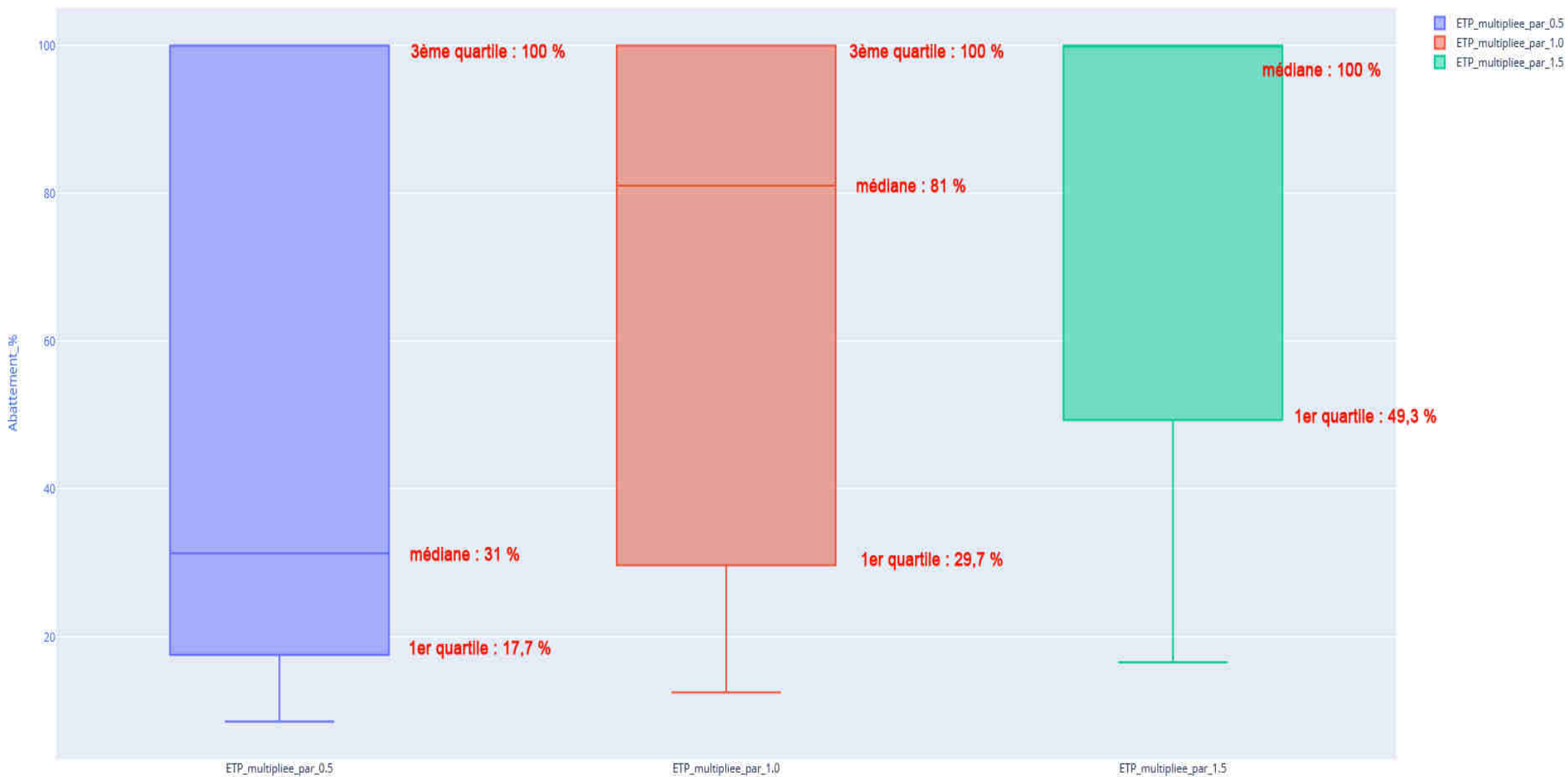


Abatement selon différents scenario d'ETP

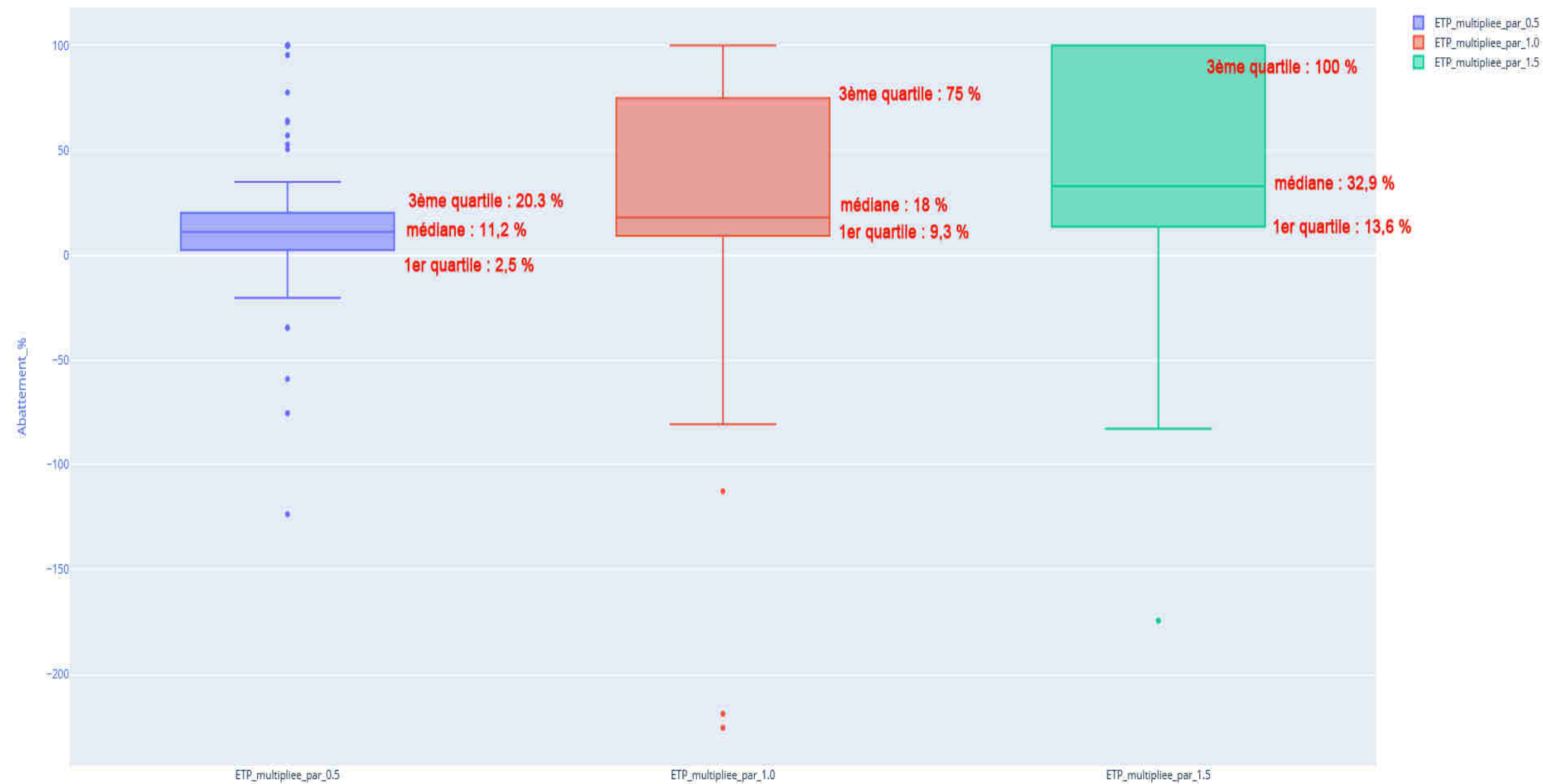


Annexe 8 – Abattements mensuels du modèle en fonction des trois scénarios d'ETP : $k = 0.5$, $k=1$ et $k = 1.5$. $k=1$ correspond au scénario de référence.

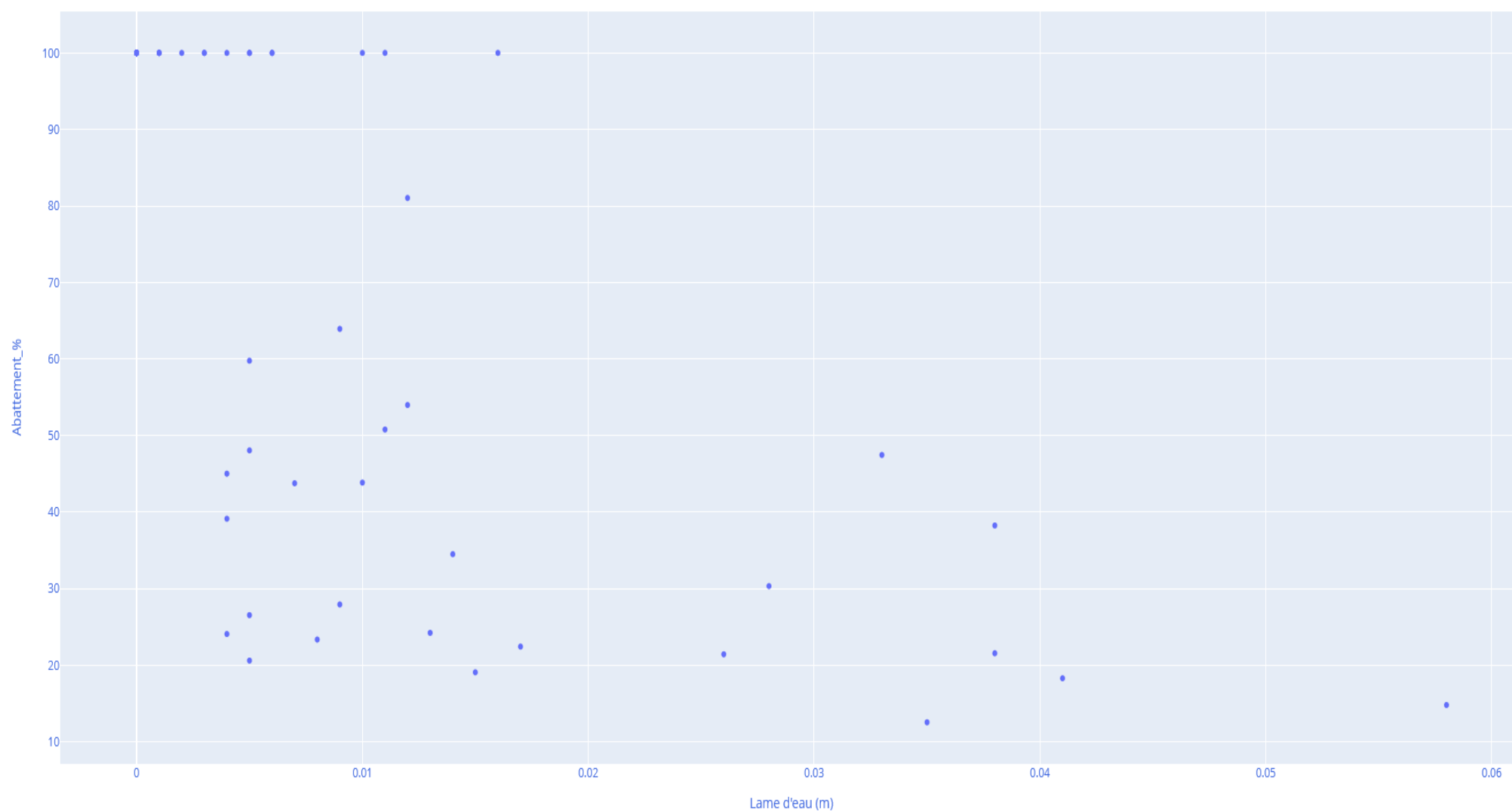
Abattement selon les scenarios ETP : 1ère Approche (Pluie - Debit)



Abattement selon les scenarios ETP : 2nde Approche (Ruissellement T1 - Debit)

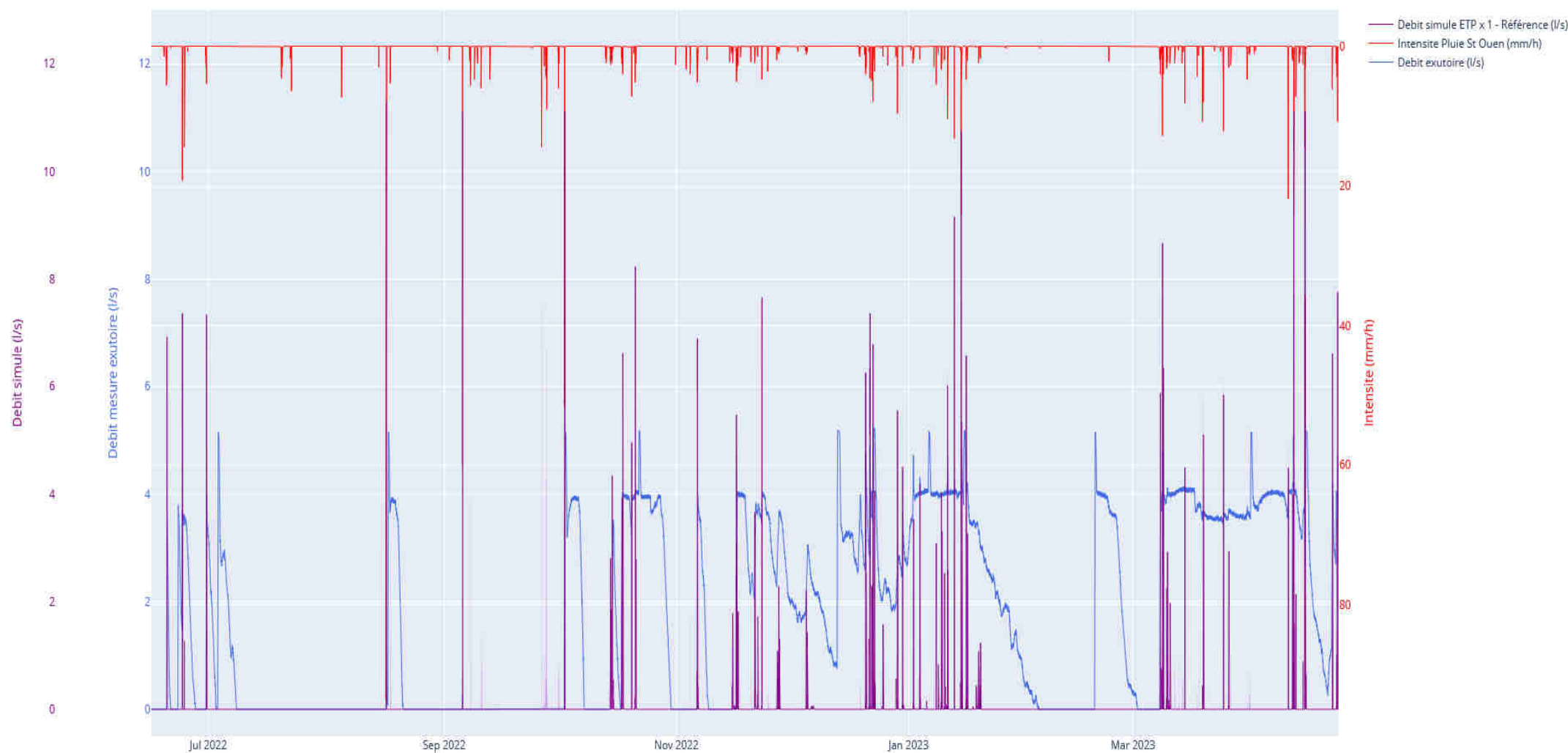


Abattement en fonction de la lame d'eau - Scenario ETP_multipliee_par_1.0



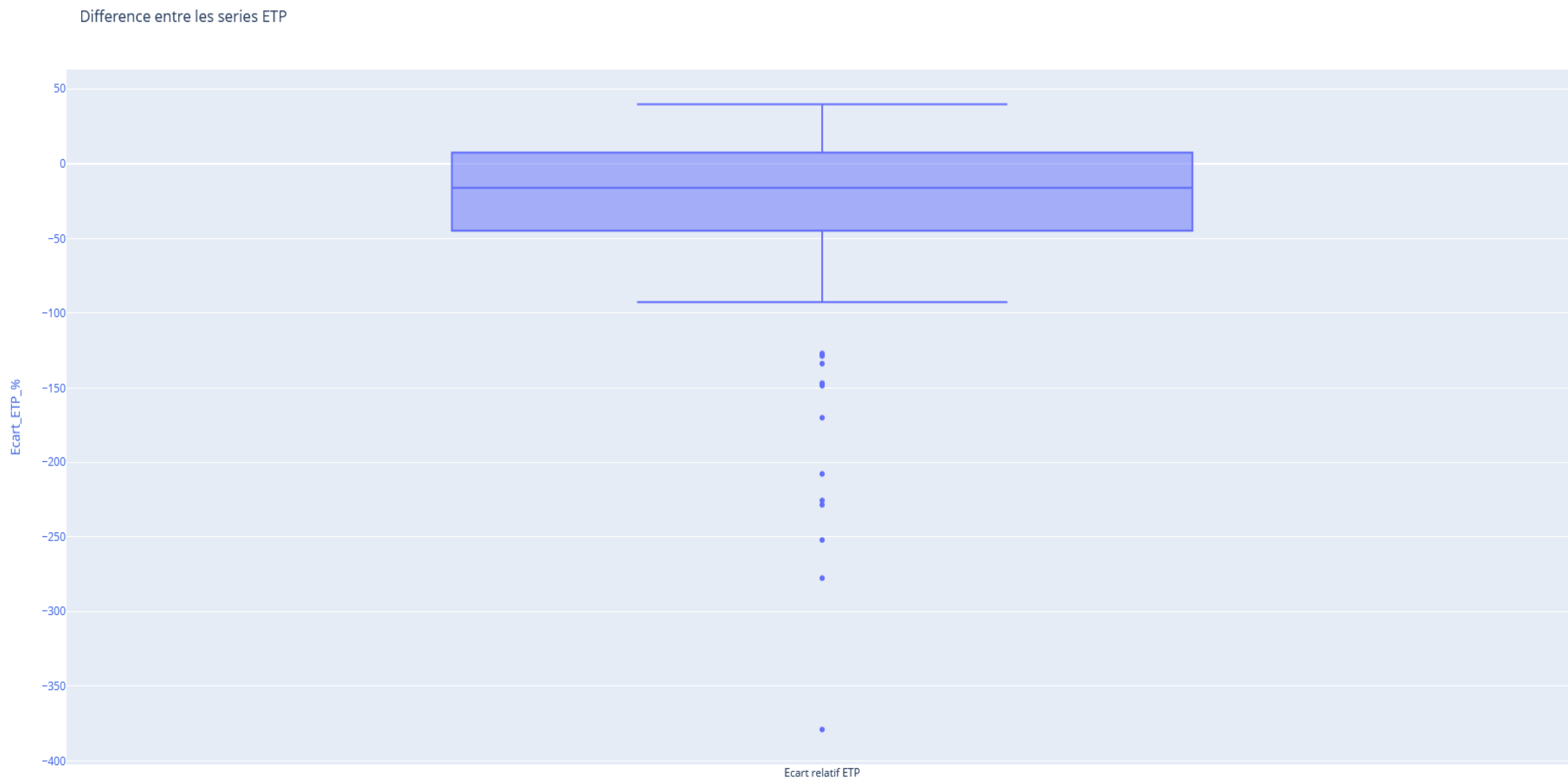
Annexe 11 – Abattement (%) en fonction de la lame d'eau du système (volume du ruissellement + pluie directe sur les noues, le tout ramené à la surface du site d'étude) – 1ère approche de détermination des évènements pluvieux.

Debit Exutoire Zac Montjoie (Formule St Dizier Environnement), Debit simule ETP, Pluie Pluvio St Ouen



Annexe 12 – Confrontation des débits simulés avec le modèle sous les différents scénarios d'ETP, avec le hyétogramme du pluviomètre de St Ouen et l'hydrogramme en sortie du dispositif étudié

Commentaire : On peut remarquer une certaine corrélation. Cependant, on peut observer des réponses réelles sans débit simulé ou des débits simulés en absence de débit réelles.



Annexe 13 – Comparaison des séries de données ETP SIRTA vs Sense-City sur la période 16 juin 2022 – 31 décembre 2022.

Commentaire : La valeur ETP Sense-City a été utilisée comme référence dans le calcul de l'écart relatif. 50% des valeurs ont un écart relatif compris entre -44,8 et 7,4%. Sur 119 jours, les cumuls respectifs sont de 482.25 mm (SIRTA) et 445.7 mm (Sense-City). La série ETP utilisée dans le modèle a été construite à partir des deux séries de données d'où l'intérêt de regarder leur similitude à travers la distribution des écarts relatifs.



École des Ponts ParisTech

2023

Rapport de stage court

WANG Chaopeng

Elève ingénieur, double diplôme

Adoption de solutions innovantes de gestion à la source des eaux pluviales : analyse du cas de la ZAC St Vincent de Paul

Stage réalisé au sein de Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (Leesu)
6-8 av. Blaise Pascal, Cité Descartes, Champs sur Marne, 77 455 Marne-La-Vallée Cedex 2

19 juin – 08 septembre 2023

Maître de stage : Monsieur Bernard de Gouvello, Cerema

Maîtrise de stage : Madame Marie-Christine Gromaire, LEESU

Fiche de synthèse

Dans le cadre de la gestion informatisée du référencement des rapports de stage, nous vous demandons de renseigner impérativement les items suivants ; ce qui facilitera l'intégration des références dans le catalogue de la bibliothèque de l'École des Ponts ParisTech :

- Type de stage : Stage court
- Année : 2023
- Auteur (Nom, prénom) : WANG Chaopeng
- Formation 2^{ème} année (IMI, GI, SEGF, etc.) : VET
- Titre du rapport : Adoption de solutions innovantes de gestion à la source des eaux pluviales : analyse du cas de la ZAC St Vincent de Paul
- Titre en français (pour les titres en langue étrangère) :
- Organisme d'accueil : Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (Leesu)
- Pays d'accueil : France
- Responsable de stage : Bernard de Gouvello, Marie-Christine Gromaire
- Mots-clés caractérisant votre rapport (4 à 5 mots maximum) : ZAC, gestion des eaux pluviales

Résumé

Ce rapport est une synthèse du projet d'étude sur la gestion des eaux pluviales de la ZAC St Vincent de Paul. Il s'inscrit dans le cadre des travaux de recherche du programme OPUR, l'observatoire d'hydrologie urbaine en Île-de-France. La ZAC St Vincent Paul a été créée en 2016, sur ce qui était un centre hospitalier. C'est un projet d'aménagement exemplaire, très regardé et reconnu pour sa prise en compte des enjeux environnementaux. Ce rapport vise à synthétiser des entretiens réalisés avec les acteurs impliqués sur le volet "eaux pluviales" de la ZAC et tous les documents consultés, et à mener une comparaison critique avec d'autres cas similaires, notamment la ZAC de la Montjoie, qui située dans la commune de Saint-Denis, en Seine-Saint-Denis (93).

Mots-clés : ZAC St Vincent de Paul, gestion des eaux pluviales, développement durable

Abstract

This report is a summary of the study project on stormwater management in the St Vincent de Paul ZAC, which is part of the OPUR program, the urban hydrology observatory in Île-de-France. The St Vincent Paul ZAC was created in 2016, on what used to be a hospital district; it is highly regarded and recognized for its exceptional environmental situation. This report aims to summarize all interviews conducted with stakeholders involved in the ZAC and all documents related to the St Vincent de Paul ZAC, followed by a critical comparison with other similar cases, notably the Montjoie ZAC located in the municipality of Saint-Denis, Seine-Saint-Denis (93).

Keywords : ZAC St Vincent de Paul, rain management, sustainable development

Table des matières

Fiche de synthèse	2
Résumé	3
Abstract	4
Table des matières	5
Liste des figures	7
Acronymes	8
Introduction	9
Présentation de l'organisme d'accueil et du maître de stage	11
1 Méthodologie	12
2 Présentation de toute les informations obtenues	14
2.1 La présentation générale de la ZAC	14
2.1.1 L'histoire de la ZAC	14
2.1.2 Les ambitions	16
2.1.3 Les objectifs principaux	16
2.1.4 Le programme	18
2.1.5 Les acteurs impliqués	19
2.1.6 Le phasage.....	21
2.2 La gestion des eaux pluviales.....	22
2.2.1 Ambition et objectifs en matière de gestion des eaux pluviales	22
2.2.2 Le programme de gestion des eaux pluviales.....	24
2.2.3 Plan pluvial final	26
2.2.4 Le phasage de la conception de la gestion des eaux pluviales	28
3 Les péripéties importantes.....	29
3.1 Avant 2017 - Pourquoi fixer l'objectif de 0 rejet ?	29
3.2 Fin 2017 - Pourquoi demander de l'aide des AMO spécifiques ?	30
3.3 Septembre 2019 - Pourquoi le schéma de la gestion des eaux pluviales pour les lots privés est divisé en deux parties : pluie courante et pluie exceptionnelle ?.....	32
3.4 Septembre 2019 - Pourquoi on ne transforme pas toutes les toitures en toitures végétalisées (Figure 14)?.....	33
3.5 Juillet 2020 - Pourquoi on n'infilte pas sur toutes les noues ?.....	34

3.6 Pourquoi personne ne travaille sur la gestion des eaux pluviales chez Artelia ?	35
Conclusion et Bilan personnel.....	36
Bibliographie	38
Rapports imprimés	38
Articles de périodiques électroniques	38
Sites web consultés.....	38

Liste des figures

Figure 1 : Schéma actuel de la ZAC St Vincent de Paul.....	15
Figure 2 : Schéma conceptuel de la ZAC St Vincent de Paul.....	17
Figure 3 : La constitution de superficie.....	18
Figure 4 : MÉTHODE TRANSVERSALE.....	21
Figure 5 : Schéma de phasage	22
Figure 6 : Carte zonage pluvial de Paris	22
Figure 7 : Principe d'infiltration dans une cours anglaise.....	25
Figure 8 : Localisation des ouvrages de gestion de pluies courantes et décennales	26
Figure 9 : Caractéristiques des bassins versants publics, volumes à stocker en fonction des pluies courantes et décennales.....	27
Figure 10 : Caractéristiques des lots privés, volumes à stocker en fonction des pluies courantes et décennales	27
Figure 11 : Phasage de la gestion des eaux pluviales.....	28
Figure 12 : Point clé : la décision d'objectif	29
Figure 13 : L'intervention d'AMO (ATM).....	30
Figure 14 : Le premier SDGEP issu par ATM.....	32
Figure 15 : L'apparition du problème des carrières	34
Figure 16 : La partie d'ingénieur sur la gestion des eaux pluviales chez Artelia	35

Acronymes

ZAC → Zone d'aménagement concerté

P&Ma → Paris & Métropole Aménagement

ATM → Agence Thierry Maytraud

DU → Direction de l'Urbanisme de la Ville de Paris

DVD → Direction de la Voirie et des Déplacements de la Ville de Paris

DPE → Direction de la Propreté et de l'eau de la Ville de Paris

DEVE → Direction des Espaces Verts et de l'Environnement de la Ville de Paris

AMO → Assistances à maîtrise d'ouvrage

MO → Maîtrise d'ouvrage

MOE → Maîtrise d'œuvre

BRS → Bail réel solidaire

CINASPIC → Constructions et Installations Nécessaires Aux Services Publics ou d'Intérêt Collectif

SPL → Société publique locale

SDGEP → Schéma Directeur de Gestion des Eaux Pluviales

Introduction

Cette étude sur la gestion des eaux pluviales de la ZAC St Vincent de Paul est une partie du programme OPUR, l'observatoire d'hydrologie urbaine en Île-de-France. OPUR est un programme de recherche pérenne dans le domaine de l'hydrologie urbaine à l'échelle de l'Île-de-France, visant à améliorer les connaissances sur la production et le transfert des flux d'eau et de contaminants dans les eaux urbaines. Il s'appuie sur un partenariat entre chercheurs et acteurs opérationnels de l'eau et de l'assainissement. Comme un programme pérenne, le programme OPUR est constitué par les membres scientifiques tels que le Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (Leesu) et le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema), et les membres opérationnels tel que l'Agence de l'eau Seine- Normandie. Le programme OPUR a été initié dans les années 90, et en est à sa cinquième phase (2019 - 2023) aujourd'hui. Celle-ci vise 3 objectifs complémentaires : recherche, observation pérenne et diffusion des connaissances.

Ce travail de stage est un sous-projet de l'observation pérenne, visant à la gestion à la source des eaux pluviales. Il s'agissait d'identifier les solutions retenues pour la gestion des sources de ruissellement, la collecte des eaux de pluie, l'intégration et la collaboration entre la conception des installations de gestion des eaux pluviales et d'autres installations, l'échelle des infrastructures de gestion des eaux de pluie, ainsi que les différents rôles du système de gestion des eaux de pluie à chaque étape du processus global de conception. L'objectif final est d'évaluer la pertinence et les limites, tant d'un point de vue technique que d'un point de vue organisationnel, du projet mis en œuvre sur la ZAC Saint-Vincent de Paul.

Ce rapport sera structuré en cinq parties : introduction au projet, présentation de l'organisme d'accueil, présentation de la méthodologie de recherche, synthèse des résultats obtenus, et mise en avant des principaux résultats obtenus, suivis d'une conclusion. Dans la quatrième partie du rapport, qui résume les résultats obtenus, toutes les informations collectées à travers les entretiens et les documents pertinents seront résumées et reformulées. L'objectif est de synchroniser ces informations avec les lecteurs, afin de présenter le projet de manière optimale. Cette section présentera des informations générales sur la ZAC, y compris son histoire, sa géographie et les parties prenantes impliquées. Elle fournira également des détails sur l'ambition de gestion des eaux pluviales de la ZAC, ainsi qu'une présentation des plans de mise en œuvre spécifiques et des points clés associés. La cinquième partie du rapport

répondra aux préoccupations des chercheurs lors de l'étude du projet. Chaque question sera présentée sous forme de section, organisée chronologiquement. Le rapport se termine par un résumé personnel du stagiaire sur l'ensemble du projet de stage et sur le processus de stage.

Présentation de l'organisme d'accueil et du maître de stage

Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains (Leesu) est un laboratoire de recherche français en sciences de l'environnement, spécialisé dans l'étude de l'eau et de sa gestion. Leesu se situe sur l'avenue Blaise Pascal, Champs sur Marne, à l'école Ecole nationale des ponts et chaussées. Leesu propose des stages divers, tels que l'étude du risque (éco)toxicologique d'un polluant pharmaceutique, l'hydrodynamique et contamination microbiologique d'un bief de la Marne, la séparation à la source des urines et matières fécales : Des filières opérationnelles à la notion de dispositif de démonstration. La majorité de stages sont sur l'étude de l'eau, aussi pour mon stage. Le contexte du stage est que mettre en place une étude sur la gestion à la source des eaux pluviales de la ZAC St Vincent de Paul, en utilisant des méthodes d'entretien et de lecture.

En tant que laboratoire, l'organisation du Leesu est caractérisée par une structure horizontale. L'unité de base du laboratoire est le chercheur et son sujet de recherche. Chaque chercheur possède son propre projet de recherche et utilise judicieusement les ressources du laboratoire pour mener ses travaux de recherche.

Mes maîtres de stage, Bernard de Gouvello et Marie-Christine Gromaire, ils sont croisés sur l'étude d'hydrologie urbaine de la ZAC Saint-Vincent de Paul. Marie-Christine Gromaire est une chercheuse sur les études des eaux pluviales, des matériaux, du micropolluant et du la technique alternative. Bernard de Gouvello travaille sur la gestion durable de l'eau dans le bâtiment, l'hydrologie urbaine et l'utilisation de l'eau de pluie.

1 Méthodologie

Deux types d'approches ont été utilisées pour comprendre le système de gestion des eaux pluviales de la ZAC St Vincent de Paul, l'histoire de son développement et les acteurs impliqués :

- collecte d'information à partir de la lecture d'un panel de document (ici lister le type de documents que tu as consultés)
- réalisation d'entretiens avec les acteurs majeurs impliqués

La séquence pour procéder aux entretiens est la suivante: tout d'abord, l'on cherche les acteurs concernés sur le site officiel ou par les entretiens qu'on a fait, on envoie un mail d'invitation aux responsables de la gestion des eaux pluviales chez les entreprises, mail dans lequel on fait une courte présentation sur notre étude et notre objectif, on propose aussi des lieux et des créneaux possibles pour l'entretien dans le mail. Bien sûr, l'envoi d'un courrier électronique nécessite préalablement une adresse e-mail correcte. Les coordonnées du responsable sont généralement obtenues par le biais de partages amicaux avec d'autres personnes concernées ou en contactant directement l'adresse e-mail publique de la société ou du département correspondant pour essayer d'établir un contact indirect. Tout au long de ce processus, il est indispensable de respecter les engagements en matière de confidentialité des informations et de faire preuve de respect envers les fournisseurs d'informations.

En fonction de leur genre, on classe les documents en différentes catégories:

- les articles plutôt académiques portant sur les autres exemples similaires; et
- les documents liés à la conception de la ZAC et réalisés par les acteurs concernés pendant la conception. Des documents sont aux types variés, il y a des documents de présentation du projet lors d'expositions, des thèses, des documents obligatoires pour les différentes étapes du projet : par exemple, schéma directeur de gestion des eaux pluviales, AVP, dossier Loi sur l'eau. On ne peut que trouver des documents limités sur la ZAC St Vincent de Paul et sur sa gestion des eaux pluviales sur google. Par conséquent, la source la plus importante pour ce type de documents est notre participant d'entretien. En général, avant l'entretien, nous demandons à nos participants s'ils peuvent fournir des documents pertinents pour une étude préliminaire ou, à la fin de l'entretien, nous demandons parfois s'il est possible de partager certains documents présentés dans l'entretien ou liés à l'entretien afin de combler les lacunes d'information.

En combinant les documents et le contenu des entretiens, nous pouvons parvenir à des conclusions complètes et des perspectives multiples. Parmi les documents relatifs à la conception, il y a une série de documents qui sont spécifiques, c'est les lois et les règles sur l'aménagement de la ZAC et sur la gestion des eaux pluviales, tel que le plan Parispluie (règlement de zonage eaux pluviales de la Ville de Paris), qui est mis en œuvre depuis 2018. En lisant des règles et des lois, on peut mieux comprendre la modification du plan pluvial et de la logique de la conception de la ZAC et son évolution au cours du temps.

Les avantages de la méthodologie sont évidents: en communiquant avec les acteurs pertinents, on peut reconstituer la chronologie dans une certaine mesure. Il est à noter cependant que l'on ne peut jamais reconstituer un panorama, une histoire avec les interactions des acteurs impliqués, sur la seule base des entretiens et de l'étude des documents pertinents. Un point de vue complètement objectif n'est jamais possible. D'une part, on ne peut jamais faire d'entretien avec tous les acteurs. De plus, les réponses des acteurs impliqués ne sont pas totalement objectives, il nous faut analyser leurs réponses en les confrontant avec celles des autres personnes interrogées. Néanmoins, ces réponses subjectives permettent de tracer leurs motivations et leurs décisions. Heureusement les entretiens ne sont pas notre seule méthodologie sur cette étude, les documents réalisés par les acteurs sont normalement plus objectifs que leurs auteurs.

D'ailleurs, on a aussi rencontré des problèmes qu'on n'avait pas imaginés au début. Par exemple, certains acteurs concertés n'ont jamais répondu à nos mails même si nous les avons renvoyés plusieurs fois pendant un mois. Lorsque nous avons essayé de contacter le responsable de la gestion des eaux pluviales de la ZAC St Vincent de Paul chez Artelia, nous avons appris avec surprise que plus personne ne travaille sur la gestion des eaux pluviales du projet St Vincent de Paul chez Artelia actuellement.

2 Présentation de toute les informations obtenues

Cette partie va synthétiser et reformuler toutes les informations collectées par les entretiens réalisés et les documents pertinents, visant à synchroniser les connaissances avec des lecteurs. Afin de mieux présenter les informations, on présente les détails en différentes parties, principalement la présentation de la ZAC et la présentation de la gestion des eaux pluviales :

- La présentation générale de la ZAC
- La gestion des eaux pluviales

2.1 La présentation générale de la ZAC

La présentation générale est constituée par 6 différentes parties suivantes :

- L'histoire de la ZAC
- L'ambition
- Les objectifs principaux
- Le programme
- Les acteurs impliqués et l'organisme
- Les phasages

Cette structure nous aide à tracer toute la ZAC de son histoire à sa construction en cours

2.1.1 L'histoire de la ZAC

La ZAC Saint-Vincent de Paul se situe dans le 14ème arrondissement de Paris, aux numéros 7482, avenue Denfert Rochereau, et 51-53 rue Boissonnade, et s'étend sur environ 3,4 hectares (Figure 1). Ce quartier, qui abritait l'ancien hôpital Saint-Vincent-de-Paul, possède une longue histoire et des bâtiments anciens, ainsi qu'un grand nombre d'infrastructures médicales au sous-sol. Avant de devenir un hôpital classique, il a été un hôpital pour bébés et un orphelinat. Depuis 2012, l'ancien hôpital a suspendu ses activités pour commencer à planifier le réaménagement de cette zone. Sa situation au centre de Paris lui confère un avantage unique en termes de culture, de vie et d'activités commerciales.



Figure 1 : Schéma actuel de la ZAC St Vincent de Paul

Les activités de la ZAC ont débuté en 2018 avec le début de la phase de préfiguration du projet de ZAC, qui durera jusqu'en 2020, en 2016 la Ville de Paris a commencé à confier officiellement à Paris & Métropole Aménagement (P&MA) la tâche d'être l'aménageur du projet de ZAC et à le nommer pour prendre le contrôle global de l'ensemble du projet.

Bien que l'ancien hôpital n'ait cessé son activité qu'en 2012, l'étude de faisabilité du projet de réaménagement de la ZAC St Vincent de Paul a débuté dès septembre 2010, avec l'Atelier Xavier Lauzeral à la tête de sa mise en œuvre. Leurs résultats de recherche ont fourni des données et des arguments essentiels pour les décisions ultérieures de la municipalité. L'année-clé pour la ZAC est 2016, au cours de laquelle la mairie de Paris a approuvé en l'espace d'un an la proposition du Plan Local d'Urbanisme (PLU), autorisant ainsi la transformation de la zone médicale en un quartier multifonctionnel et la création du projet ZAC. À la fin de 2016, la municipalité de Paris a officiellement désigné Paris Batignolles Aménagement en tant qu'aménageur. Celui-ci a ensuite changé de nom pour devenir Paris & Métropole Aménagement (P&MA) en septembre 2018.

2.1.2 Les ambitions

Pour répondre aux besoins des habitants et des citoyens, la ZAC St Vincent de Paul a fixé des ambitions en matière d'environnement, de culture et d'architecture.

En particulier l'ambition environnementale est très regardée non seulement par la Ville de Paris, mais aussi par tous les habitants en raison du changement climatique et des événements météorologiques extrêmes associés, tels que la chaleur anormale au cours de l'été 2022. L'ambition environnementale de la ZAC St Vincent de Paul se manifeste par la création d'un aménagement à empreinte carbone quasi nulle. Cette ambition se reflète dès la phase de construction, en utilisant autant que possible des matériaux écologiques pour réduire les émissions de carbone pendant le processus de construction. Le système de chauffage exploite pleinement la chaleur résiduelle du réseau d'eaux usées urbaines. Un système interne de collecte et recyclage des urines est mis en place, ainsi que la promotion des installations durables et le partage des équipements. La gestion des eaux pluviales est également un élément-clé de cette ambition environnementale : l'aménagement vise à concevoir cette zone comme une zone sans rejet d'eau pluviale, tout en renforçant la biodiversité locale.

En matière d'architecture, l'aménagement souhaite préserver autant que possible les anciens bâtiments historiques de la ZAC St Vincent de Paul, en leur donnant une fonctionnalité plus riche tout en préservant leur caractère artistique et historique, et en les intégrant mieux à l'environnement.

Finalement, en tenant compte des avantages environnementaux de la ZAC, de son histoire architecturale et de sa position géographique privilégiée, les concepteurs souhaitent faire de la ZAC St Vincent de Paul le centre culturel de la zone urbaine environnante, un lieu privilégié pour les résidents pour se reposer, se divertir et échanger sur le plan culturel.

2.1.3 Les objectifs principaux

L'ambition principale de la Ville de Paris, maître d'ouvrage, était de faire de la ZAC St Vincent de Paul un projet de démonstration, pour explorer la possibilité d'aménager la future ville et les mesures résilientes en répondant au changement climatique et aux événements météorologiques extrêmes. Cette volonté conduit à conserver dans la mesure du possible les anciens bâtiments, à construire un quartier assez ouvert, ludique, commercial, environnemental et durable. Les ambitions précédentes se traduisent en trois objectifs principaux.

En matière d'ambition environnementale, la ZAC St Vincent de Paul fixe un objectif de zéro rejet sur la gestion des eaux pluviales, un objectif de zéro carbone sur la construction des espaces publics et des bâtiments et sur l'utilisation d'énergies renouvelables ainsi que la

maîtrise des consommations énergétiques, un objectif de zéro déchet se traduit par un réemploi des matériaux et sur la refertilisation des sols.

(source : [site officiel P&MA](#))

En matière d'ambition architecturale, et en particulier pour la conservation des anciens bâtiments, l'aménageur de la ZAC fixe un objectif de 60% de rénovation du bâtiment : les bâtiments LeLong, Pinard, Maison des Médecins, Lingerie, Oratoire et Robin seront conservés (figure 2).

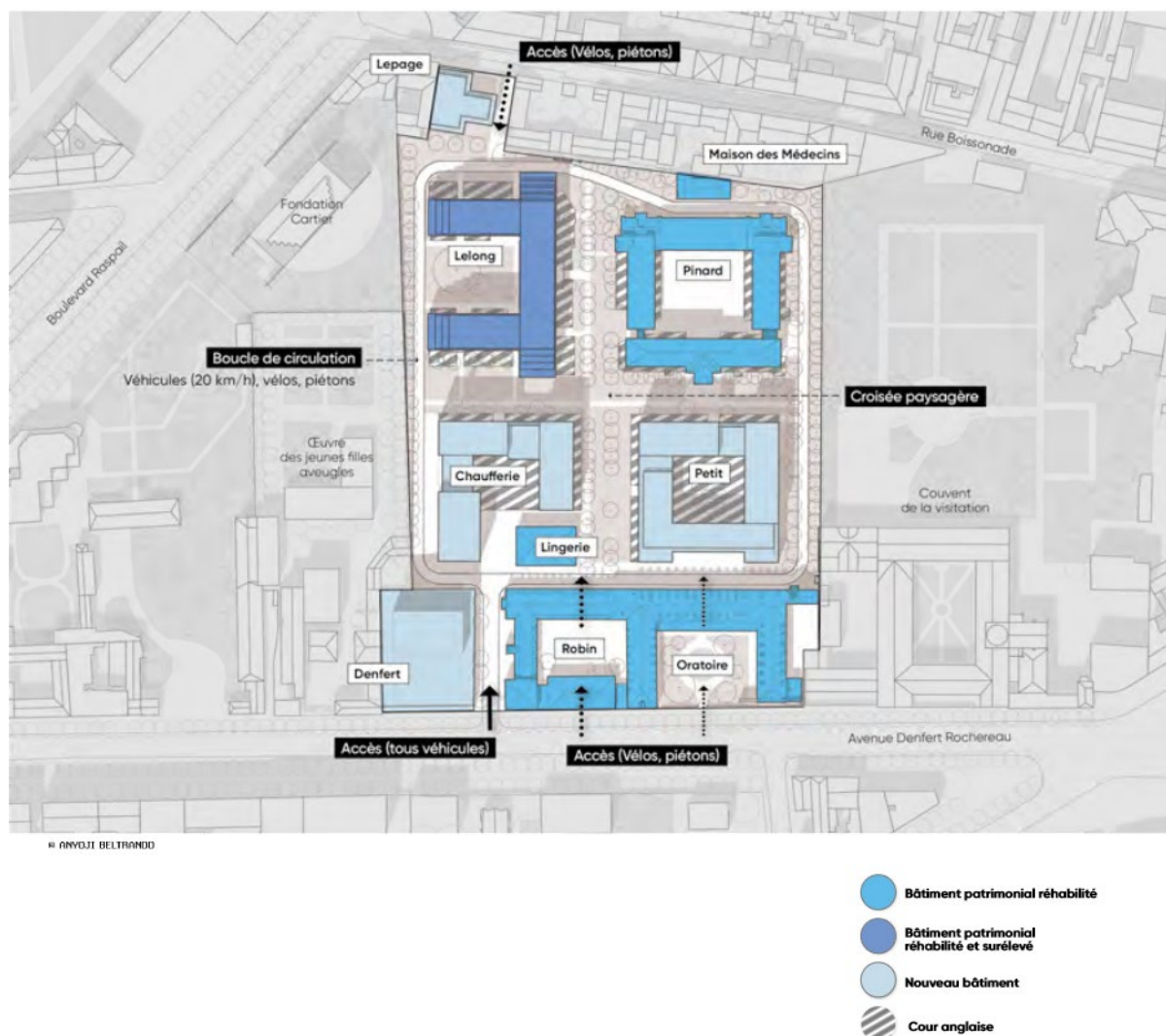


Figure 2 : Schéma conceptuel de la ZAC St Vincent de Paul

(source : [P&MA Dossier de presse](#))

source originale : ANYOJI BELTRANDO)

Pour devenir un centre culturel, les concepteurs prévoient de commencer par développer la circulation douce à l'intérieur du quartier. L'un des objectifs est de faire de la ZAC une zone d'intersection des routes environnantes afin d'améliorer la commodité des déplacements.

Ensuite, les concepteurs prévoient d'utiliser les eaux pluviales sans émission pour créer un espace vert urbain dynamique qui insuffle de la vitalité au quartier. Enfin, ils renforceront la ventilation des anciennes installations et mettront en place davantage d'équipements partagés, y compris un centre commercial et culturel, afin de fournir une infrastructure pour la vie culturelle du quartier.

2.1.4 Le programme

La ZAC est composée de quatre parties différentes: Équipement culturel, Service public, Activité commerce et Logement. La plus grande surface est occupée par des terrains résidentiels, totalisant 40 200 m² de surface de plancher, dont la moitié est utilisée pour les logements sociaux, 20 % étant destinés aux logements intermédiaires, 22 % à l'accession libre et les 8 % derniers à l'accession sociale (BRS). Les services publics sont principalement des équipements publics, tels que la crèche, l'école primaire, le gymnase, les locaux techniques, leurs superficies sont en total 5 400 m². Les activités commerciales occupent 8 500m² pour construire CINASPIC, y compris les cours anglaises au rez-de-chaussée. Finalement, il reste 4 100m², dont 3 000m² des activités commerciales mentionnées au-dessus, pour construire le CINASPIC, qui est un équipement privé à vocation culturelle et créative(Figure 3).

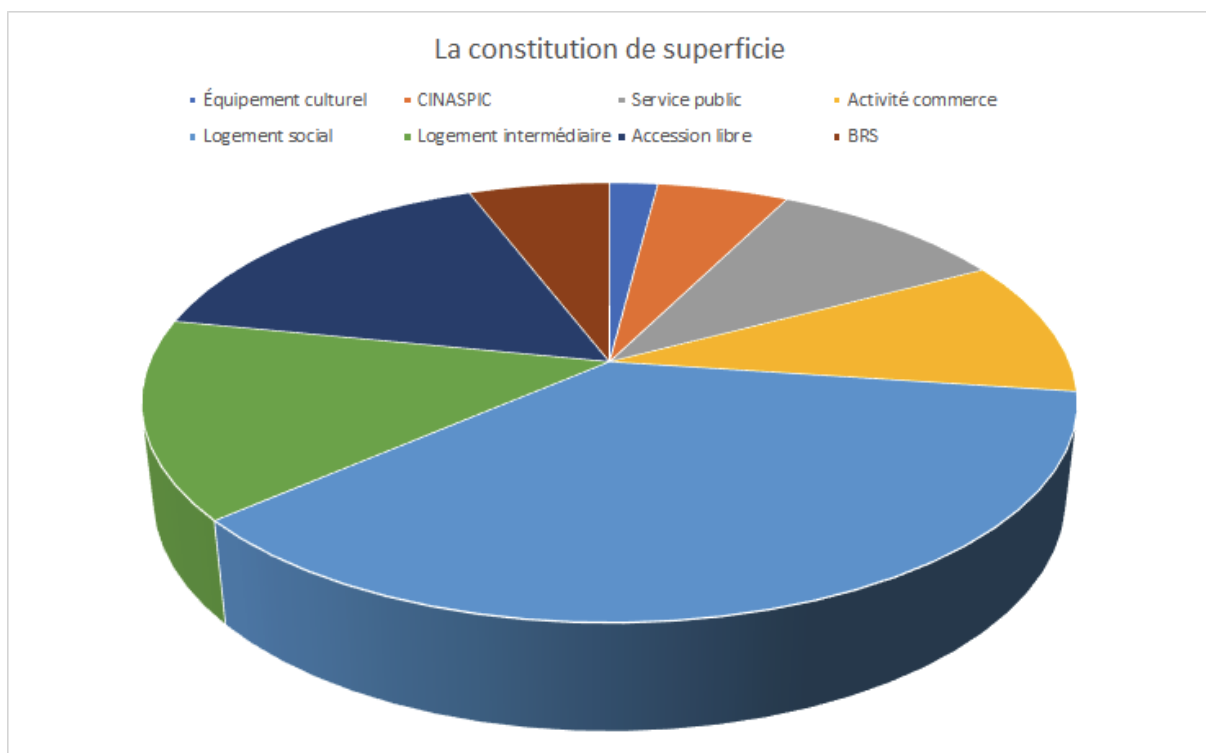


Figure 3 : La constitution de superficie

(source : [site officiel P&MA](#))

Voici le programme de la construction de la ZAC St Vincent de Paul :

- la conservation à l'identique et la réhabilitation des bâtiments existants : Maison des Médecins, Oratoire, Robin
- La conservation et l'extension des bâtiments : Lelong (surélévation de 3 à 4 niveaux supplémentaires), Pinard (intégration d'un équipement sportif, approfondissement de 4 m au niveau du parking souterrain existant), Lingerie (sera rénoverée et mise à disposition du futur gestionnaire de quartier pour y développer des services sociaux tels que café, restaurant, activités culturelles)
- La démolition des bâtiments Jalaguier, Rapine, Pasteur, Colombani, Chaufferie, Petit, CED et Lepage
- La création des nouveaux bâtiments, Lot Denfert (R+5 en RDC ou sur niveau de sous-sol) Lot Petit (R+9 sur un niveau de sous-sol) Lot Chaufferie (R+9, sur un à trois niveaux de sous-sols) Lot Lepage (R+6 en RDC ou sur un niveau de sous-sol).

(source : [Note technique – Gestion EP SEMOFI](#))

Les cours anglaises caractéristiques de l'architecture hospitalière accueilleront les commerces et locaux d'activités. 4 nouveaux bâtiments seront créés là où les anciennes installations n'ont pas pu être préservées. L'ensemble s'articule autour d'une croisée paysagère centrale, espace public piéton et accessible à tous reprenant les allées orthogonales qui structurent l'hôpital. Arboré, il offre aux résidents et aux visiteurs un espace de promenade et de rassemblement. Une voie circulaire autour du quartier permet la desserte par voiture et camion du quartier depuis l'avenue Denfert Rochereau.

(source : [site officiel Paris 14ème arrondissement](#))

2.1.5 Les acteurs impliqués

La liste des acteurs est ci-dessous:

Maîtrise d'ouvrage (MO): Ville de Paris

- la maîtrise d'ouvrage qui a créé la ZAC et a fixé les ambitions principales. Dans la majorité des cas, ce sont les ambitions qui décident des objectifs.

Aménagement : Paris & Métropole Aménagement

- L'aménageur désigné de la ZAC, une agence SPL de la Ville de Paris. Chez P&Ma, il y a deux directions principales sur la ZAC St Vincent de Paul : la direction d'ingénierie qui va construire l'espace public et suivre les travaux, la direction de l'aménagement qui va plus être liée à l'aspect logement, construction des bâtiments et le lien avec les promoteurs. De plus, il y a encore la direction de communication

qui s'occupe des communications entre les autres acteurs impliqués tels que la MO et l'AMO.

Maîtrise d'œuvre urbaine : agence Anyoji Beltrando (architectes urbanistes, mandataire), Alphaville (programmiste), EVP (BET structure)

Maîtrise d'œuvre espaces publics (MOE) : Empreinte (paysagiste, mandataire), Artelia (BET VRD), 8'18'' (concepteur lumière)

- Parmi les MOE, Empreinte et Artelia s'occupent de la mise en œuvre des infrastructures de gestion des eaux pluviales. Empreinte, est notamment responsable de construire les noues, qui sont les ouvrages les plus importants afin de mettre en œuvre le plan pluvial.

Assistances à maîtrise d'ouvrage (AMO) :

- Projet urbain collaboratif et maîtrise d'usage : Le Sens de la Ville
- Environnement : Alto Step (mandataire), ATM, Climat Mundi, Medieco
 - En tant qu'AMO responsables de la conception de la gestion des eaux pluviales, ils ont participé au concours et remporté ce projet ensemble. Alto Step, en tant que mandataire, est principalement responsable de la communication du projet ainsi que de la conception environnementale générale. Par contre, ATM est principalement responsable de la conception de la gestion des eaux pluviales et était l'une des principales forces motrices du programme de gestion des eaux pluviales.
- Mobilités : Codra, Chronos
- Réemploi : Mobius (mandataire), Lab Ingénierie, Neo Eco, BTP Consultant, Atelier Na
- Commerces : Bérénice
- Communication : À vrai dire la ville
- Ateliers participatifs : Palabréo

(source : [site officiel Paris 14e arrondissement](#))



Figure 4 : MÉTHODE TRANSVERSALE

(source : ATM)

2.1.6 Le phasage

En regardant le schéma de phasage de P&MA ci-dessous, on peut voir que la préfiguration et les travaux ont officiellement commencé en 2018. Tout le projet est composé par plusieurs parties, la préfiguration, les travaux, les consultations techniques, etc. Toutes les parts avancent parallèlement afin d'améliorer l'efficacité (Figure 5).

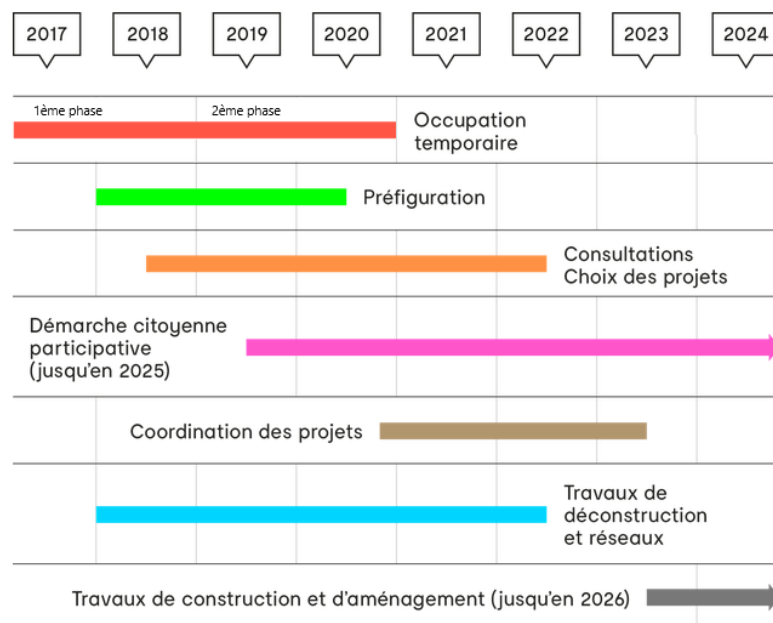


Figure 5 : Schéma de phasage

(source : P&Ma)

2.2 La gestion des eaux pluviales

2.2.1 Ambition et objectifs en matière de gestion des eaux pluviales

La gestion des eaux pluviales fait incontestablement partie des ambitions environnementales de la ZAC St Vincent de Paul, et les attentes des aménageurs en matière de gestion des eaux pluviales sont, comme indiqué précédemment, zéro rejet. Ce concept va au-delà des exigences du plan Parispluie, qui est en vigueur depuis 2018, dans la zone du projet, demande déjà l'abattement de 100% des pluies de moins de 12 mm et 80% des pluies de moins de 16 mm. Il est à noter que l'ambition de zéro rejet jusqu'à décennal a été proposée par l'ATM, l'AMO qui travaille sur le schéma directeur de gestion des eaux pluviales. Dans la conception, la pluie courante dimensionnante choisie pour cette opération est une pluie de 12 millimètres. Et la pluie décennale dimensionnante est une pluie de 48 millimètres sur une durée de 4 heures.

De ce fait, quand l'ambition de zéro rejet se traduit en objectifs concrets, l'exigence du zéro rejet du plan Parispluie est requise juste sur les pluies courantes, cependant les aménageurs de la ZAC et la Ville de Paris sont plus ambitieux, ils ont fixé un objectif plus grand, de construire un système de la gestion des eaux pluviales de zéro rejet jusqu'à la pluie décennale (Figure 6).

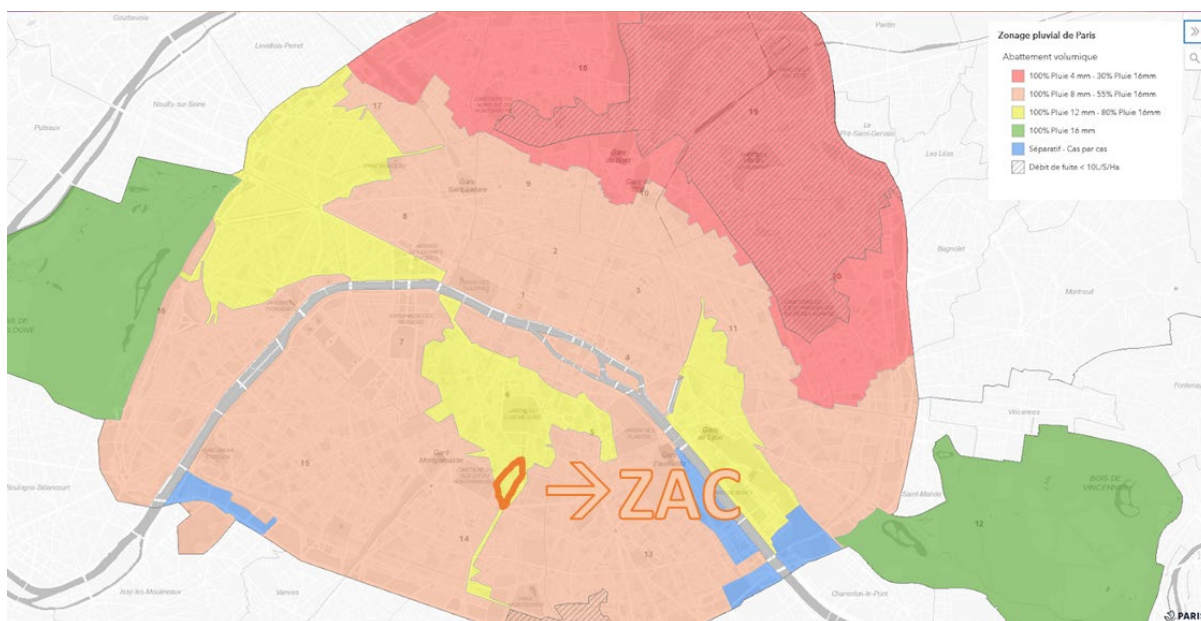


Figure 6 : Carte zonage pluvial de Paris

(Site : capgeo.maps.arcgis.com)

Le concept de gestion alternative des eaux pluviales n'est plus une idée très innovante, les aménageurs français attachent de l'importance à la gestion et au traitement des eaux pluviales in situ depuis des années.

Par exemple, sur des sujets pilotés par le département de Seine-Saint-Denis, il y avait des expérimentations sur des gestions alternatives des eaux pluviales (source : Gestion des Eaux pluviales dans la ZAC de la Montjoie, Saint-Denis (93)). Dans la situation actuelle d'accélération du phénomène de réchauffement climatique à l'échelle mondiale, cette méthode de gestion et traitement, qui permet de soulager la charge sur les infrastructures tout en recyclant efficacement les ressources en eau pluviale, devient de plus en plus attrayante.

Les gestions alternatives reposent principalement sur la récupération, la réutilisation, l'évaporation et l'infiltration des eaux pluviales afin de réduire à la source le rejet potentiel de ces eaux dans le réseau de drainage. Ces méthodes comprennent :

- Éviter le ruissellement grâce à des sols perméables
- Réduire les rejets d'eaux pluviales vers les réseaux d'assainissement (zéro pour les pluies courantes)
- Compenser, par exemple par une régulation du débit de fuite à 10 L/s/ha
- Faciliter l'entretien et le suivi des dispositifs, grâce notamment à une gestion à ciel ouvert des pluies courantes
- Réutiliser des eaux de pluie là où elles tombent
- Mettre en place d'espaces multifonctionnels intégrant plusieurs des principes cités précédemment

(source : Plan ParisPluie)

Il est bien connu que Paris, en tant que ville densément peuplée et construite, souffre fortement de l'effet d'îlot de chaleur urbain. Cette approche efficace pour utiliser de l'eau pluviale permet non seulement la création de davantage d'espaces verts, mais aussi une régulation des températures grâce à l'évaporation des eaux pluviales, contribuant ainsi à atténuer cet effet néfaste.

De plus, lors d'intenses averses, les systèmes d'égouts parisiens peuvent atteindre leur capacité maximale et entraîner un déversement direct des eaux polluées dans la Seine ou autres cours d'eau naturels, ce qui conduit à une pollution environnementale. Le fait de renforcer la capacité de traitement des eaux pluviales in situ aide donc à accroître la résilience face aux changements climatiques et renforce également la capacité globale de Paris à gérer ses précipitations abondantes.

Enfin, cette conception visant le recyclage efficace des ressources hydriques bénéficie également au développement des espaces verts urbains qui favorise la biodiversité dans toute la région Île-de-France.

(source : ZAC Saint Vincent de Paul - DOSSIER DE DÉCLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU, ATM)

2.2.2 Le programme de gestion des eaux pluviales

Comme indiqué, l'ambition et l'objectif était d'atteindre le zéro rejet jusqu'à la décennale introduite par l'ATM. Cependant, cette ambition a été arrêtée par la découverte des anciennes carrières dessous la ZAC St Vincent de Paul. Celles-ci ont été découvertes par hasard, pendant la démarche de la cartographie géographique en avril 2018, qui est une démarche obligatoire afin de solliciter le permis d'aménager pour passer en étape permis de construire. L'existence des carrières empêche l'infiltration des eaux pluviales vers le sous-sol, ce qui a remis en cause le plan pluvial original et l'ambition de tout zéro rejet jusqu'à la décennale. Avant la découverte des carrières, toutes les noues étaient planifiées pour évacuer les eaux pluviales principalement par l'infiltration et l'évaporation. Afin d'assurer la sécurité et d'éviter des effondrements du sol, toutes les noues dessus les carrières, y compris les noues dans une distance tolérée de 5 m, étaient transformées en noues étanches. Cela demande une autre façon de traiter les eaux pluviales, qui conduisait au compromis suivant: une majorité des noues peuvent atteindre l'objectif de zéro rejet jusqu'à la pluie décennale, mais les autres (dans la zone des carrières) ne peuvent gérer sans rejet au réseau que les pluies de moins de 12 mm et déversent les eaux pluviales supérieures à 12 mm aux réseaux publics situés sur l'avenue Denfert et la rue Boissonade, il est à noter que les noues étanches seront fortement végétalisées afin d'évacuer les pluies courantes par l'évaporation.

Au centre de la ZAC, il y a une croisée conçue afin d'offrir des espaces publics ludiques aux habitants et aux visiteurs du quartier. De ce fait, la majorité des noues sont situées naturellement au long des deux allées centrales perpendiculaires de l'ancien hôpital, permettant ainsi de récupérer tant les eaux pluviales de la voirie que les eaux pluviales évacuées des bâtiments. La coordination de la gestion des eaux pluviales des lots privés et des lots publics était initialement un problème qui empêchait la conception du plan pluvial. Aujourd'hui ce problème a été résolu par le déversement, au delà des 12 premiers mm, des eaux pluviales des lots privés dans les noues publiques à cause de leurs faibles capacités sur la gestion des eaux pluviales, les données détaillées sont ci-dessous.

Une caractéristique de la ZAC St Vincent de Paul sont ses cours anglaises, qui ne sont pas courantes en France. Les cours anglaises, cependant, constituent des difficultés à traiter pendant le temps pluvial, car elles sont plus basses que le niveau du terrain naturel. La solution pour répondre au problème est de réduire le plus possible l'entrée des eaux pluviales, tel que construire la pente d'entrée en escalier (Figure 7). Pendant la période de la pluie courante, les cours anglaises évacuent des eaux pluviales par l'infiltration et l'évaporation. Pour les cours anglaises au-dessus des carrières, cela sera plus lent car on n'évacue que par l'évaporation. Pendant la période de la pluie décennale, on utilise des pompes pour soutirer l'eau et la déverser dans le réseau public.

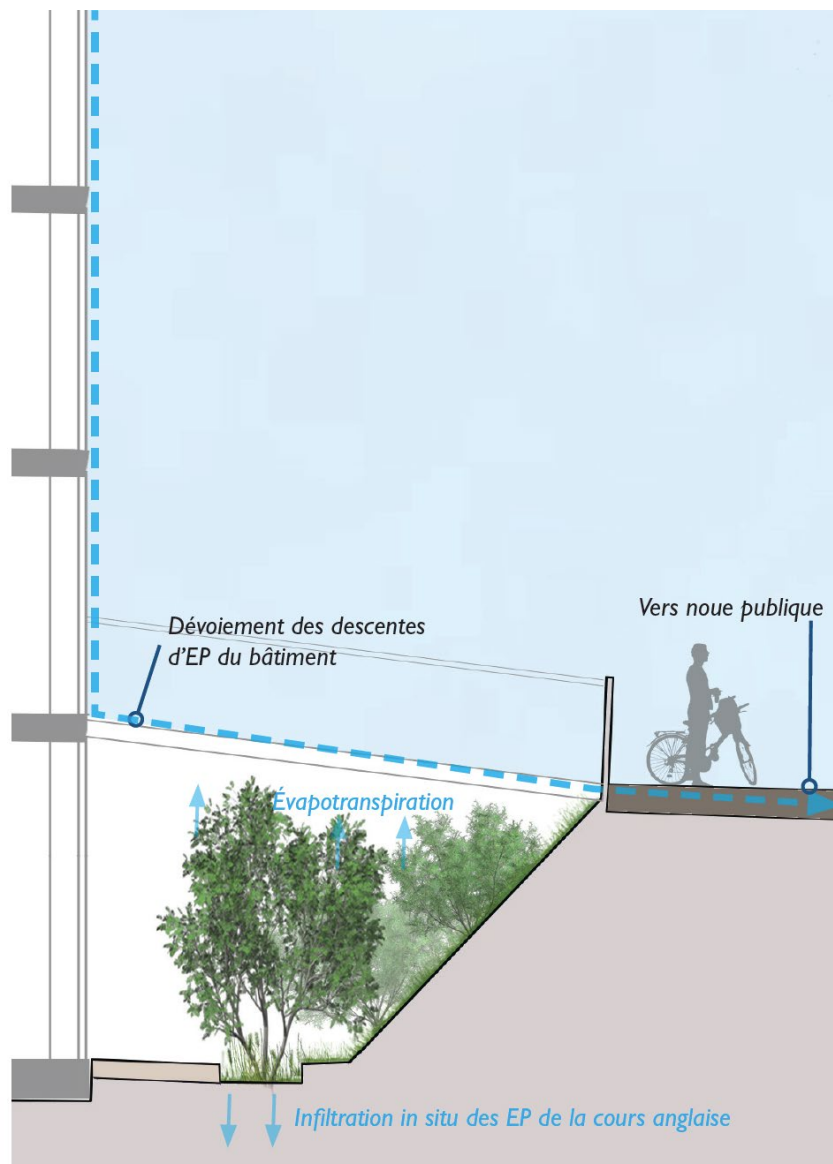


Figure 7 : Principe d'infiltration dans une cours anglaise

(source : Schéma Directeur de Gestion des Eaux Pluviales - ZAC SAINT VINCENT DE PAUL, ATM)

2.2.3 Plan pluvial final

Actuellement, le plan pluvial final a été élaboré avec un niveau du chiffre, incluant des détails tels que des débits et des pentes. L'ensemble de la ZAC a été divisé en 29 bassins versants, parmi lesquels 19 sont des bassins versants publics et les 10 autres sont les lots privés qui sont considérés comme des bassins versants. Les emplacements précis des 29 bassins versants ainsi que les détails spécifiques de chaque bassin versant sont indiqués dans le schéma ci-dessous (Figure 8, 9, 10).

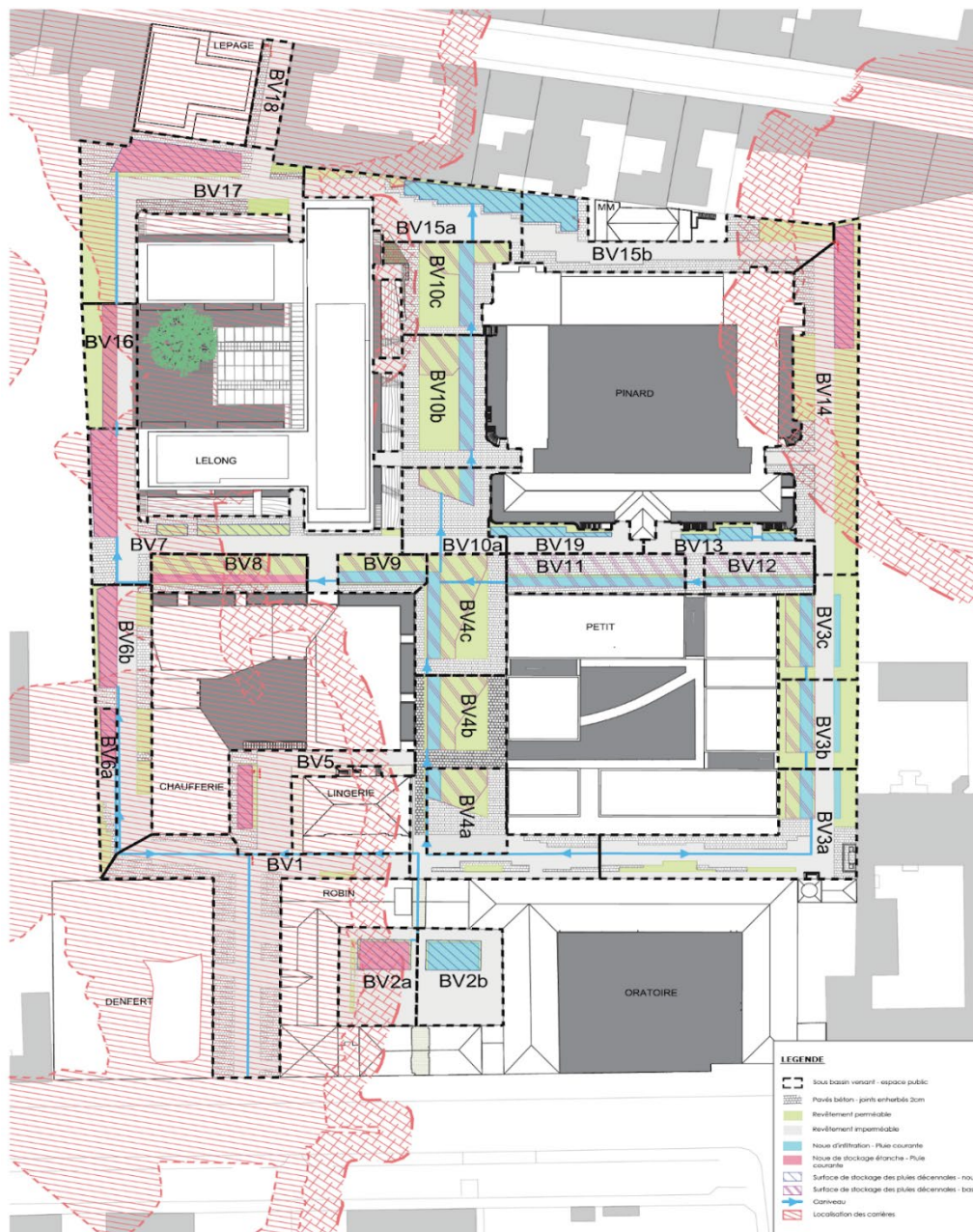


Figure 8 : Localisation des ouvrages de gestion de pluies courantes et décennales

(source : ZAC Saint Vincent de Paul - DOSSIER DE DÉCLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU, ATM)

Bassin versant public	Surface (m²)	Coefficient de ruissellement pluie courante	Surface active pluie courante (m²)	Orgine de surplus de volume pluies courantes privé et BV publics	Volume pluies courantes avec surplus/déficit privé et public (m³)	Surface de stockage pluie courante (m²)	Temps de vidange moyen pluie courante (h)	Coefficient de ruissellement pluie décennale	Surface active pluie décennale (m²)	Orgine de surplus de volume décennale du privé	Volume pluie décennale avec surplus privé (m³)
BV 1	1105	0,8	847	-	10	-	-	0,8	895	-	40
BV 2a	374	0,7	258	-	3	46	34	0,9	328	-	15
BV 2b	403	0,7	290	-	3	46	8	0,9	360	-	15
BV 3a	798	0,6	484	-	6	27	24	0,7	578	Petit	40
BV 3b	342	0,3	114	-	1	41	4	0,5	159	Petit	20
BV3c	369	0,2	88	-	1	46	3	0,5	193	Petit	20
BV 4a	332	0,4	148	-	2	7	29	0,6	202	Petit	15
BV 4b	797	0,5	411	-	5	19	29	0,7	528	Petit - Chaufferie	25
BV 4c	520	0,2	124	-	1	23	7	0,5	253	Petit - Chaufferie	20
BV 5	441	0,7	324	Lingerie	9	18	-	0,9	378	Lingerie	30
BV 6a	144	0,3	50	-	1	20	15	0,7	103	Chaufferie	10
BV 6b	581	0,5	314	-	4	46	41	0,8	446	Chaufferie	20
BV 7	880	0,6	550	-	7	83	40	0,8	714	Lelong	50
BV 8	289	0,1	38	-	0	15	15	0,5	135	Chaufferie	15
BV 9	164	0,1	20	-	0	15	2	0,5	86	Chaufferie	15
BV 10a	390	0,6	218	-	3	9	31	0,7	275	Lelong	20
BV 10b	622	0,3	200	Pinard	9	36	27	0,6	354	Pinard - Lelong	45
BV 10c	462	0,3	125	-	2	26	7	0,5	244	Lelong	15
BV 11	348	0,4	148	-	2	22	9	0,7	257	Petit	25
BV 12	218	0,4	94	-	1	12	10	0,7	161	-	10
BV 13	195	0,6	112	Pinard	5	44	12	0,8	161	Pinard	20
BV 14	1012	0,4	414	-	5	67	37	0,6	622	-	15
BV 15a	525	0,6	323	-	4	12	35	0,8	438	-	20
BV 15b	682	0,6	411	MdM	7	36	21	0,8	524	Pinard - MdM	55
BV 16	308	0,4	113	-	1	39	17	0,7	218	Lelong	20
BV 17	1012	0,5	468	-	6	113	25	0,7	702	Lelong	45
BV 18	158	0,8	128	-	2	0	0	0,8	133	Lepage	20
BV 19	243	0,6	149	Pinard	5	45	13	0,8	201	Pinard	20

Figure 9 : Caractéristiques des bassins versants publics, volumes à stocker en fonction des pluies courantes et décennales

(source : ZAC Saint Vincent de Paul - DOSSIER DE DÉCLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU, ATM)

Bassin versant	Surface totale (m²)	Coefficient de ruissellement	Surface active (m²)	Volume pluies courantes (m³)	volume surversé pluie courante (m³)	Volume pluie décennale	Volume surversé pluie décennale (m³)	Surverse vers l'espace public ou réseau
Oratoire	3320	0,6	2152	28	-	111	0	-
Robin	1215	0,9	1094	13	13	53	52	Réseau
Denfert	1590	0,97	1542	19	-	74	55	Réseau
Petit	3180	1	3180	38	-	101	60,2	BV3 BV4 BV11
Chaufferie	2321	1	2321	28	-	78	47	BV4 BV6 BV8 BV9
Lingerie	511	0,8	431	5	5	21	21	BV 5
Lelong	3985	0,7	2848	37	-	147	75	BV7 BV 10 BV16 BV17
Pinard	3875	0,9	3570	43	20	143	120,86	BV 15 BV10 BV13 BV 19 Réseau
MM	220	0,8	181	2	2	9	9	BV15
Lepage	595	0,9	536	7	-	26	14,7	BV18

Figure 10 : Caractéristiques des lots privés, volumes à stocker en fonction des pluies courantes et décennales

(source : ZAC Saint Vincent de Paul - DOSSIER DE DÉCLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU, ATM)

Les étapes de conception, notamment la conception de la gestion des eaux pluviales sont suivantes : l' esquisse → avant-projet 1 → permis de construire → avant-projet 2 (pour un degré de validation) → projet → dossier de consultation des entreprises (faire un appel d'offre aux entreprises) = la construction des espaces publics = l'avancé du bâtiment. Les carrières ont été trouvées pendant l'étape permis de construire, de ce fait on a rédigé à nouveau un plan pluvial avant passer à avp2.

2.2.4 Le phasage de la conception de la gestion des eaux pluviales

Selon les documents et les contenus des entretiens, nous avons élaboré un schéma relationnel intégrant les participants clés : P&MA, ATM et SEMOFI. P&MA, en tant qu'aménageur en chef de la ZAC St Vincent de Paul, a non seulement dirigé l'élaboration du plan pluvial, mais également supervisé son intégration dans le schéma. À travers cette représentation graphique, il est possible de constater que P&MA a confié à ATM, en 2018, la conception du schéma directeur de gestion des eaux pluviales. L'implication d'ATM a apporté une ambition plus grande, allant mettre en place le « zéro rejet » jusqu'à décennal. Cependant, cette ambition a été limitée en 2020 par les contraintes dans le rapport concernant des carrières, écrit par SEMOFI, impliquant des ajustements partiels au schéma directeur.

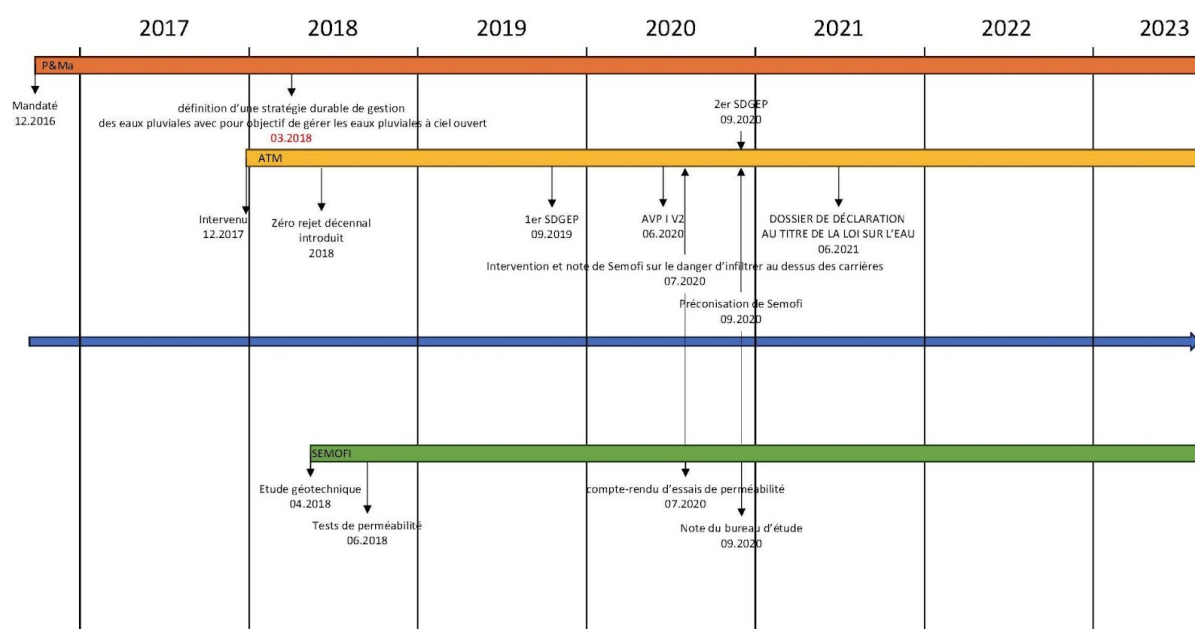


Figure 11 : Phasage de la gestion des eaux pluviales

3 Les péripéties importantes

3.1 Avant 2017 - Pourquoi fixer l'objectif de 0 rejet ?

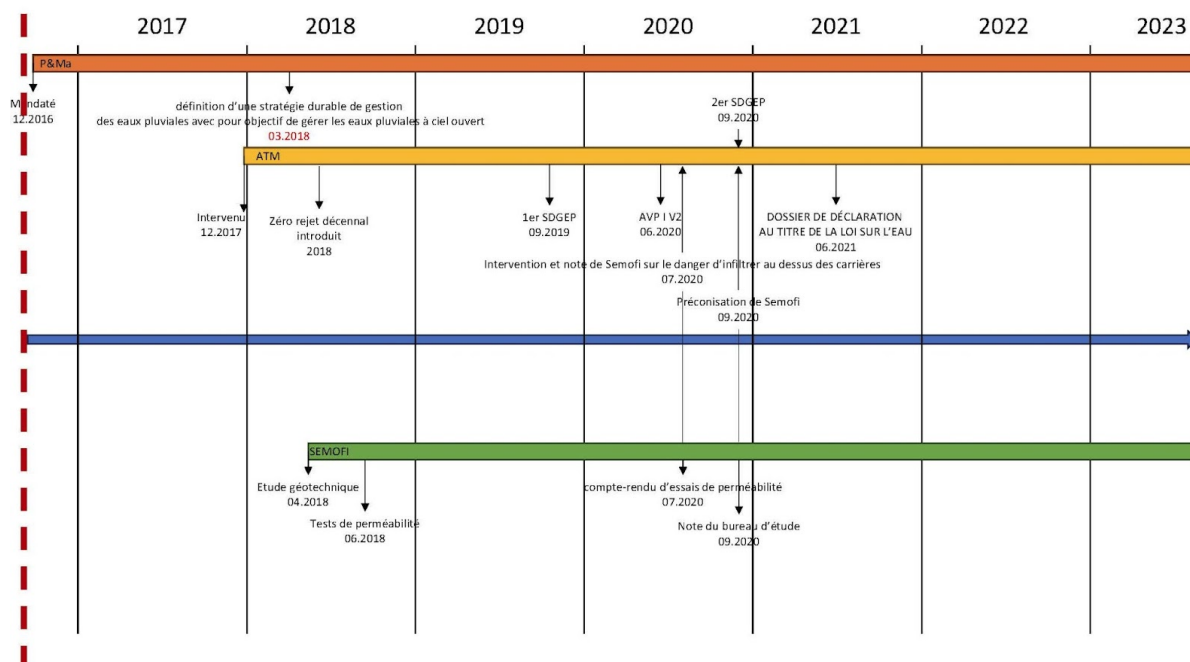


Figure 12 : Point clé : la décision d'objectif

En gros, c'est la tendance de la gestion des eaux pluviales en France depuis 2000, comme une stratégie du futur et une manière résiliente afin de répondre au changement climatique et à la météo extrême.

Grâce à sa situation géographique unique, la ZAC St Vincent de Paul, est très regardée par tout le monde, donc la Ville de Paris y attache vraiment de l'importance.

Dans le plan Parispluie, l'exigence pour les eaux pluviales n'est que zéro rejet dans le cas des pluies courantes, donc on ne peut pas dire que cette exigence de zéro rejet a été établie par la Ville de Paris. Cependant, les concepteurs de la ZAC St Vincent de Paul, ATM en particulier, veulent aller plus loin, c'est pourquoi ils ont fixé des objectifs de zéro émission non seulement pour les eaux pluviales conventionnelles du plan Parispluie, mais aussi pour celles ayant une période de retour de dix ans. Les concepteurs et la Ville de Paris souhaitent faire de ce projet très regardé un exemple à suivre.

3.2 Fin 2017 - Pourquoi demander de l'aide des AMO spécifiques ?

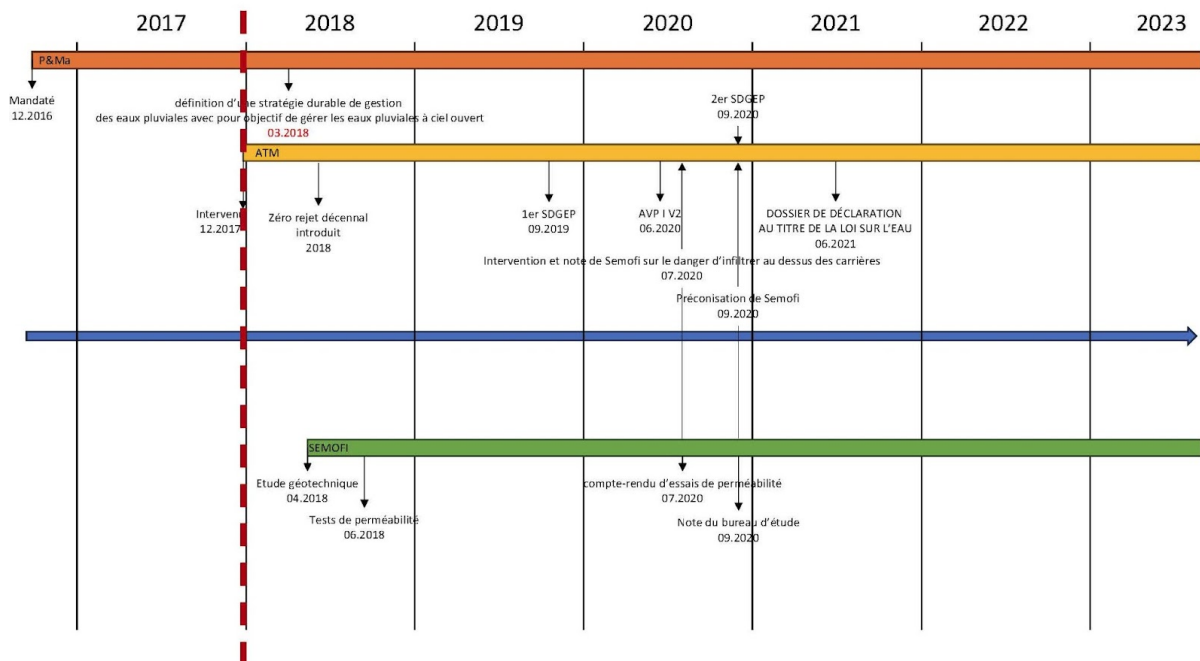


Figure 13 : L'intervention d'AMO (ATM)

Cela est déterminé par la structure hiérarchique du projet ZAC St Vincent de Paul. Le sommet de cette structure est composé de la Ville de Paris et de P&Ma qu'elle a mandatée, respectivement la maîtrise d'ouvrage et l'aménageur. Ensuite viennent les maîtres d'œuvre engagés pour superviser la construction du projet, comprenant notamment la rénovation des bâtiments, la construction des infrastructures et la construction des espaces publics. En tant que maîtrise d'ouvrage et aménageur, leur compréhension dans certains domaines techniques n'est pas toujours suffisante, c'est pourquoi ils ont besoin d'une société spécialisée dans ces domaines pour les assister, c'est là que l'AMO intervient. Selon les missions qui lui sont confiées, l'Amo peut être responsable de la conception du projet, de la communication technique, etc. Par exemple, ATM se concentre principalement sur la gestion des eaux pluviales. Dans de nombreux cas, P&Ma assure également la communication et coordination entre toutes les parties prenantes impliquées et en cas de conflit entre celles-ci il prend généralement une décision finale.

Quant à la présence de quatre AMO liées à l'environnement, cela s'explique par le constat d'Alto Step, l'organisateur, lors de sa tentative de participer à l'appel d'offres du projet.

Ils ont pris conscience que les exigences professionnelles de P&MA en matière de gestion des eaux pluviales requéraient l'expertise d'une entreprise plus spécialisée. Compte tenu de l'impossibilité pour Alto Step de se démarquer seul dans cette compétition, une équipe composée de quatre sociétés a été formée après une évaluation complète de la situation (Alto Step (mandataire), ATM, Climat Mundi, Medieco).

(source : [site officiel Paris 14e arrondissement](#))

Il convient de mentionner que différents départements au sein de la Ville de Paris sont responsables de domaines spécifiques. Cela peut générer des points de friction liés à la conception de la ZAC. Par exemple, DVD et DEVE ont eu un désaccord sur la possibilité d'évacuer les eaux pluviales de la voirie dans les espaces verts. Lorsque ces conflits deviennent irréconciliables, ils doivent être résolus par les mécanismes internes de la Ville de Paris. Heureusement, étant donné le faible volume de circulation près de la ZAC St Vincent de Paul, les deux parties ont finalement accepté d'évacuer ces eaux dans l'espace vert.

En tant que SPL, P&Ma n'a pas été soumis à une mise en concurrence lors de sa nomination par la municipalité de Paris, mais au contraire, ils ont procédé à une sélection compétitive pour choisir le maître d'œuvre et l'AMO.

3.3 Septembre 2019 - Pourquoi le schéma de la gestion des eaux pluviales pour les lots privés est divisé en deux parties : pluie courante et pluie exceptionnelle ?

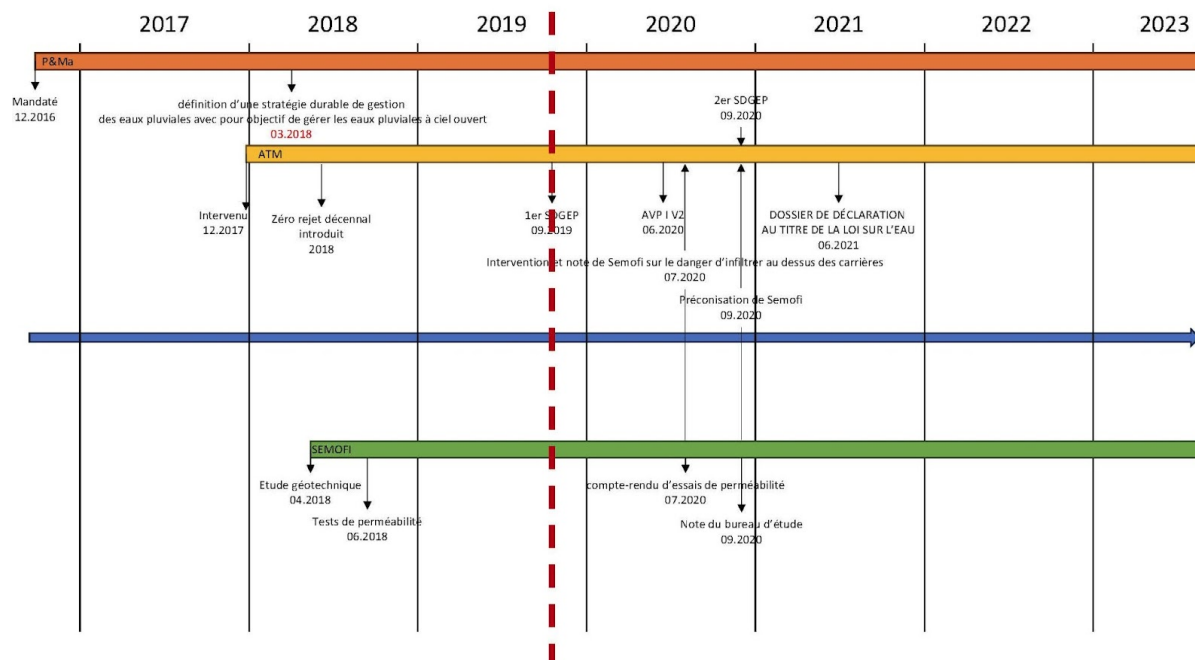


Figure 14 : Le premier SDGEP issu par ATM

Dans le SDGEP, il est observé que les lots publics sont divisés en deux étapes principales, la pluie courante et la pluie exceptionnelle. Cette division s'explique d'une part par la nécessité de les aligner sur la conception des lots privés, afin d'assurer une cohérence opérationnelle optimale. D'autre part, cette division reflète la philosophie globale du concept de conception. D'après les entretiens, il est révélé qu'ATM avait initialement tenté de concevoir de manière générale, mais a finalement opté pour une approche à deux étapes en raison de la complexité croissante de la situation. Ainsi, le traitement des eaux pluviales a été segmenté en deux étapes distinctes : une étape pour les eaux pluviales courantes et une autre pour les eaux pluviales exceptionnelles. Cette philosophie se reflète dans l'intégralité du schéma directeur de gestion des eaux pluviales.

La ZAC St Vincent de Paul est composée de 10 lots privés, chacun ayant ses propres bâtiments associés. Les contraintes relatives au traitement des eaux pluviales dans ces lots privés sont souvent liées aux contraintes architecturales. Par conséquent, deux méthodes

principales sont employées pour la gestion des eaux pluviales dans les lots privés. La première consiste à utiliser des toitures végétalisées pour abattre complètement les pluies courantes dans les 24 heures, tout en permettant une réduction partielle lors de pluies décennales (coefficient de ruissellement de 0,6, conforme au *dossier de la loi sur l'eau*). Cette méthode de traitement des eaux pluviales nécessite un substrat d'au moins 20 centimètres d'épaisseur. La deuxième méthode consiste à utiliser des eaux pluviales comme eaux de recyclage, notamment dans les toilettes des résidences. Cette méthode complète la première et augmente l'efficacité de l'abattement, bien qu'elle soit moins stable, dépendant du taux d'occupation des bâtiments et des habitudes de consommation d'eau des résidents.

Pour les pluies décennales, bien que les lots privés puissent effectuer un abattement partiel, par exemple avec un coefficient de ruissellement de 0,6 pour les toitures végétalisées, le traitement global des eaux pluviales repose toujours en grande partie sur les lots publics. Certains lots privés sont limités par leurs propres caractéristiques et ne peuvent même pas traiter complètement les pluies courantes, tels que Pinard et Robin, nécessitant donc un transfert vers les lots publics environnants. Par contre il y a quelques lots privés qui peuvent traiter une grande partie des pluies exceptionnelles, par exemple le lot privé Oratoire est capable de traiter toutes les eaux pluviales décennales tout seul grâce à son espace extérieur généreux.

3.4 Septembre 2019 - Pourquoi on ne transforme pas toutes les toitures en toitures végétalisées (Figure 14)?

Dans le processus de construction, les contradictions sont inévitables et la réponse à ce problème réside également dans ces contradictions. Plus précisément, cette contradiction se manifeste dans l'utilisation de l'espace du toit. En tant que maître d'œuvre, l'agence Anyoji Beltrando propose d'installer des panneaux solaires sur le toit pour économiser de l'énergie et atteindre autant que possible l'objectif environnemental de zéro carbone. Cependant, en tant que responsable du Plan pluvial, ATM insiste fortement pour concevoir une toiture végétalisée afin d'accroître la verdure tout en renforçant la capacité de traitement des eaux pluviales et en construisant une ville résiliente répondant à l'objectif environnemental de zéro rejet. Finalement, la proposition d'ATM a prévalu sans raison spécifique donnée lors de notre entretien.

De plus, on ne peut pas ignorer la différence entre les toitures inclinées et les toitures terrasses, les dernières étant théoriquement plus propices à stocker de l'eau. De ce fait, il y avait une autre volonté qui empêchait le fait de mettre toutes les toitures végétalisées, c'est le souhait patrimonial de conserver des bâtiments anciens qui ont des couvertures inclinées. Dans le

processus de construction de la ZAC, la prise de décisions clés s'accompagne souvent de l'apparition et de la résolution de frictions, et ceci en est un bon exemple.

3.5 Juillet 2020 - Pourquoi on n'infiltré pas sur toutes les noues ?

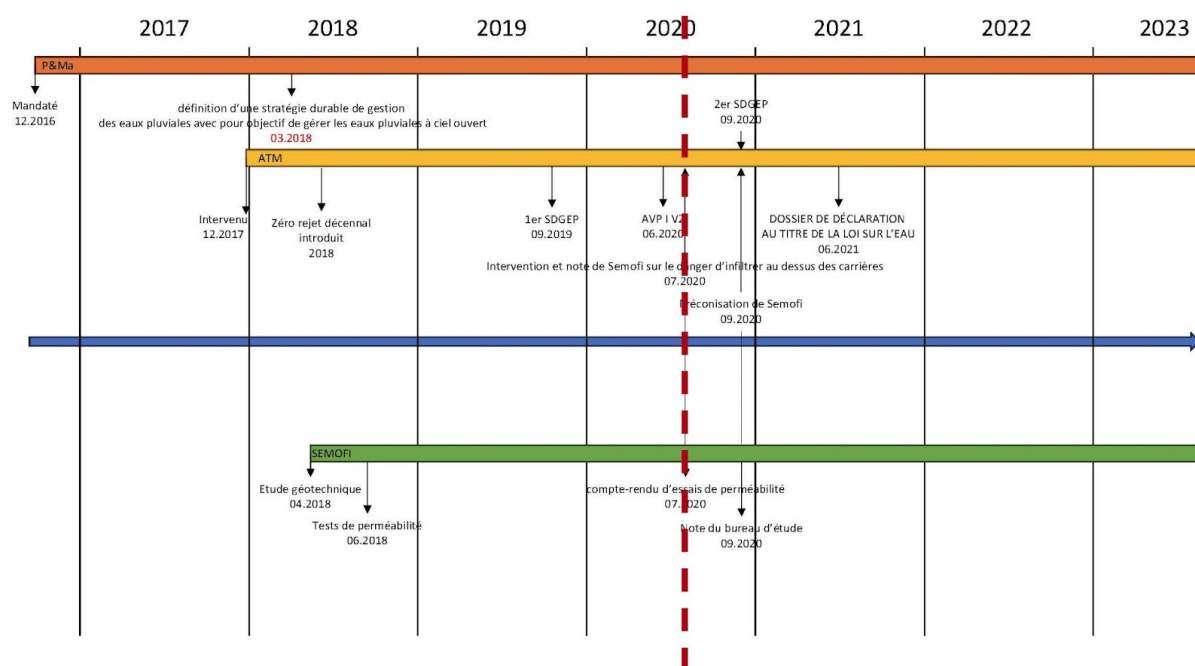


Figure 15 : L'apparition du problème des carrières

Bien que les raisons soient multiples, la réponse peut être résumée simplement : tous les sols n'ont pas la capacité nécessaire pour traiter l'infiltration des eaux de pluie. En d'autres termes, les structures en béton imperméables héritées de l'histoire et les anciennes carrières empêchent l'infiltration des eaux pluviales.

D'autre part, l'emplacement de toutes les noues est généralement le long des routes, le long des zones nécessitant une collecte d'eau déterminée naturellement, il est donc impossible d'éviter complètement les endroits imperméables. C'est pourquoi la conception du plan pluvial a abandonné l'objectif de parvenir à un rejet nul dans toutes les zones jusqu'à la pluie décennale à partir du milieu.

3.6 Pourquoi personne ne travaille sur la gestion des eaux pluviales chez Artelia ?

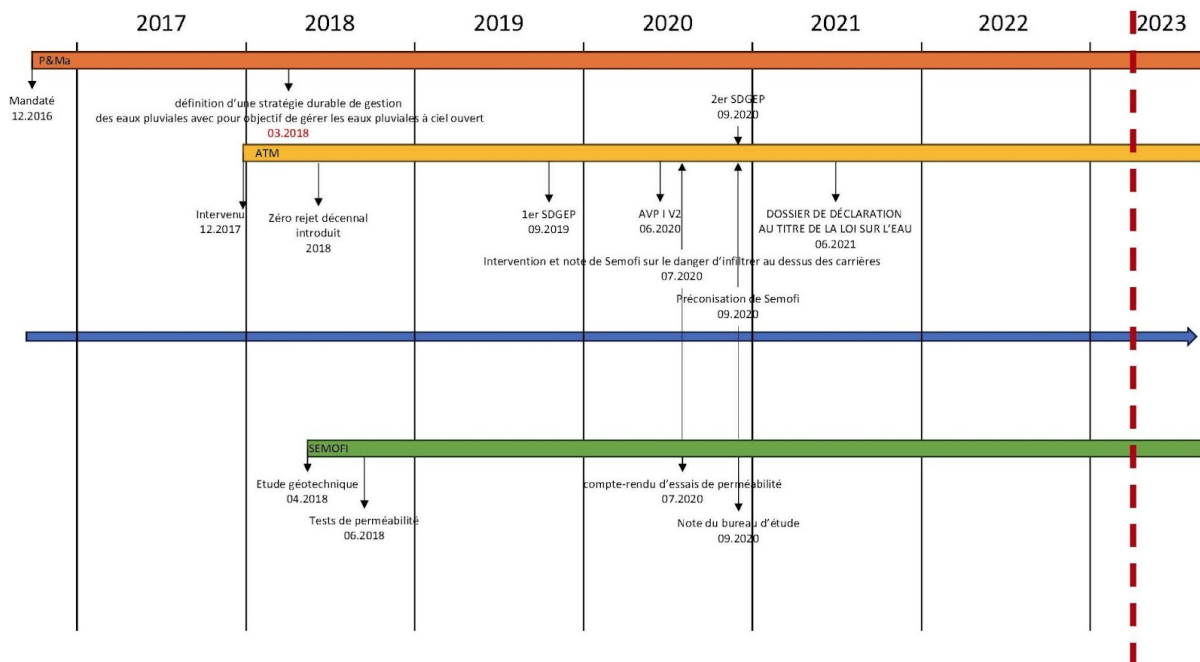


Figure 16 : La partie d'ingénieur sur la gestion des eaux pluviales chez Artelia

Parce qu'il n'y a actuellement plus aucun travail à faire. En ce qui concerne le travail sur la gestion des eaux pluviales, le dossier de la loi sur l'eau est déjà terminé et la phase de conception est passée à l'étape du projet. À l'heure actuelle, il existe un plan pluvial suffisamment détaillé pour guider les travaux de construction.

Nous pouvons constater que l'étape de gestion des eaux pluviales est en avance par rapport à la construction du bâtiment, car dans le cadre de la ZAC, l'impact environnemental joue un rôle important, ce qui conduit à accorder la priorité à la gestion des eaux pluviales. Afin d'assurer que le plan pluvial et l'ambition sont réalisables, les concepteurs ont soigneusement conçu le plan pluvial.

Conclusion et Bilan personnel

En tant que non-francophone, je considère que ce stage m'a apporté de nombreux bénéfices, à la fois sur le plan personnel et professionnel.

Au niveau personnel, ce stage m'a confronté à diverses exigences liées à la langue française, notamment une lecture intensive de documents en français, la rédaction de rapports en français et la correspondance par e-mail en français. De plus, j'ai été amené à effectuer des entretiens individuels en français. Toutes ces tâches étaient en relation avec la langue française et ont indéniablement renforcé mes compétences dans cette langue. En ce qui concerne la lecture de documents en français, j'ai examiné plusieurs dizaines de documents de diverses longueurs, y compris des documents d'ingénierie, des rapports, et d'autres fichiers. En ce qui concerne la rédaction de rapports en français, chaque entretien nécessitait au moins deux sessions d'écriture de documents, comprenant la préparation préalable des questions d'entretien (grille d'entretien) ainsi que la rédaction du rapport de synthèse après l'entretien. En ce qui concerne les entretiens individuels, j'ai mené au moins trois entretiens de manière indépendante, dont deux étaient des entretiens en ligne et un était un entretien en personne. Sur le plan personnel, je considère avoir progressé et acquis un certain niveau de compétence en français grâce à cette expérience.

Sur le plan professionnel, j'ai été amené à répondre à plusieurs exigences spécifiques. Tout d'abord, il m'a été demandé de rédiger des invitations par e-mail et de gérer la correspondance avec les personnes interviewées. De plus, j'ai dû organiser et analyser les entretiens, extraire et analyser les informations obtenues, et concevoir la structure de grille d'entretien. Ces demandes ont mis en avant mes compétences professionnelles de manière globale.

En ce qui concerne les invitations par e-mail et la communication, j'ai élaboré un modèle de base pour les invitations en étudiant les e-mails professionnels. Ce modèle a ensuite été adapté en fonction des caractéristiques spécifiques des personnes invitées, garantissant ainsi une communication efficace et opportune avec les personnes interviewées.

Pour l'analyse et l'organisation des entretiens, j'ai créé un cadre d'analyse en se basant sur l'enregistrement des entretiens. Ce cadre a été complété en fonction du contenu de chaque entretien, améliorant ainsi l'efficacité et la lisibilité du processus.

Concernant la conception de la grille d'entretien, j'ai examiné les informations préalablement collectées pour identifier les lacunes d'informations. Ces éléments manquants ont servi de base pour structurer la grille d'entretien, assurant ainsi une collecte d'informations complètes et approfondies lors des entretiens.

En outre, la nécessité d'analyser des informations pour améliorer ma compréhension professionnelle de l'hydrologie urbaine et de la gestion des eaux pluviales, d'acquérir une compréhension de la manière dont l'industrie de pointe est gérée, et de comprendre les motivations de leur comportement par le biais d'entretiens, m'a été d'une grande aide dans mon domaine de carrière de l'hydrologie urbaine.

Bibliographie

Rapports imprimés

ATM. *ZAC Saint Vincent de Paul - DOSSIER DE DÉCLARATION AU TITRE DE LA LOI SUR L'EAU*. ATM, Juin 2021

ATM. *Schéma Directeur de Gestion des Eaux Pluviales - ZAC SAINT VINCENT DE PAUL*. ATM, Septembre 2019

ATM. *NOTE TECHNIQUE DE GESTION DES EAUX PLUVIALES - ZAC Saint Vincent de Paul (75014)*. ATM, Mars 2021

ARTELIA VILLES & TERRITOIRES. *PRE-AVP2 : RAPPORT HYDRAULIQUE POUR LA GESTION DES EAUX PLUVIALES DE LA ZAC ST VINCENT DE PAUL*. ARTELIA Villes & Territoires, Novembre 2022

P&MA. *PRE-AVP2 : SAINT-VINCENT DE PAUL Faire Paris autrement*. P&MA, Novembre 2022

Articles de périodiques électroniques

C. BOUDET, L. LAPORTE, M. WALCKENAER, M. LINGLART, C. PORTENEUVE, ET AL.. Gestion des Eaux pluviales dans la ZAC de la Montjoie, Saint-Denis (93). *HAL science ouverte*, [en ligne], 18-08-2021, [référence du 10 aout 2023]. <https://hal.science/hal-03322038>

THIERRY MAYTRAUD, CYNDIE MIRALLES, ANNE CARNAC, BRIGITTE DURAND, MARIE-PIERRE PADOVANI, ET AL.. L'opération Saint-Vincent-de-Paul : une gestion des eaux pluviales en « zéro tuyau » en plein Paris pour une ville bioclimatique !. *HAL science ouverte*, [en ligne], 04-07-2023, [référence du 10 aout 2023]. <https://hal.science/hal-04151107>

Sites web consultés

Saint-Vincent-de-Paul (Paris 14e) | P&MA. [référence du 20 juillet 2023], <https://www.paris-metropole-amenagement.fr/fr/saint-vincent-de-paul-paris-14e>

Faire Paris autrement : le projet Saint-Vincent-de-Paul – Mairie du 14^e. [référence du 20 juillet 2023], <https://mairie14.paris.fr/pages/le-projet-saint-vincent-de-paul-11216>

Zonage pluvial (arcgis.com) . [référence du 20 juillet 2023], <https://capgeo.maps.arcgis.com/apps/Media/index.html?appid=fc5c34dcaccb4e1983d1367f12da0e4c>