



CONTRIBUTION À L'ÉLABORATION D'UN OUTIL D'ESTIMATION DES COÛTS D'EXPLOITATION DES SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE POUR LA GESTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES EN FRANCE

**MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEURE 2iE AVEC GRADE DE
MASTER**

**SPÉCIALITÉ GÉNIE DE L'EAU, DE L'ASSAINISSEMENT, ET DES AMÉNAGEMENTS
HYDRO-AGRICOLES (GEAAH)**

Présenté et soutenu publiquement 19/07/2024 par

Rikyelle MOMO NGUEMATIO (20190081)

Directeur de mémoire : Dr. Harinaivo Anderson ANDRIANISA, Maître de Conférences (CAMES), Enseignant-Chercheur, Institut 2iE

Encadrant 2iE : Dr. FOWE TAZEN, Maître-Assistant (CAMES), Enseignant-Chercheur Institut 2iE

Maître de stage : M. Christophe WITTNER, Ingénieur Divisionnaire de l'Agriculture et de l'Environnement, INRAE UMR SAGE

Structure d'accueil du stage : INRAE/ENGEES UMR SAGE, Strasbourg, France

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr. Harouna KARAMBIRI

Membres et correcteurs : Dr. Djim Doumbe DAMBA

Dr. Axel BELEMTOUGRI

Promotion [2023/2024]

DÉDICACE

À ma famille et mes ami(e)s, je suis parce que vous êtes.

À ma défunte grand-mère, MOMO Hélène, ton héritage perdure à travers ton nom qui est le mien.

CITATION

**Le travail de la pensée ressemble au forage d'un puits ;
l'eau est trouble d'abord, puis elle se clarifie.**

— Proverbe chinois

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le fruit d'un travail long de cinq ans qui n'aurait pas pu être abouti sans les personnes suivantes à qui j'adresse mes sincères remerciements.

- ❖ Prof. El Hadji Bamba DIAW, Directeur Général de l'institut 2iE
- ❖ Prof. Mahamadou KOITA, Directeur des Enseignements et des Affaires Académiques
- ❖ L'ensemble du corps professoral dont j'ai eu l'honneur de recevoir les enseignements précieux ces cinq dernières années, en particulier mon directeur de mémoire, Prof. Harinaivo Anderson ANDRIANISA.
- ❖ Dr. FOWE TAZEN, pour sa disponibilité continue et ses remarques pertinentes qui ont guidés l'avancement de ce mémoire.
- ❖ L'ensemble de l'équipe UMR SAGE, pour leur accueil chaleureux, les bons moments partagés avec les autres stagiaires et le cadre de travail agréable.
- ❖ M. Christophe WITTNER, pour son encadrement, son implication et ses conseils judicieux tout au long de mon stage.
- ❖ Mes parents Adeline et Thomas NGUEMATIO, et ma fratrie, Algore, Clara et Thomson, pour tout leur amour, leur soutien, et leurs sacrifices.
- ❖ Mes amis de 2iE, de l'ENGEES, et ceux qui étaient là bien avant et qui continuent d'être là. Je suis profondément reconnaissante pour votre soutien et vos contributions multiformes.

Enfin, j'aimerais remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce mémoire.

RÉSUMÉ

La redéfinition du rôle des eaux pluviales en ville a donné naissance à une compétence spécifique pour la gestion des eaux pluviales urbaines en France. Cette compétence s'appuie sur une politique de gestion des eaux pluviales qui vise à réintégrer les eaux pluviales dans les stratégies d'aménagement urbain en favorisant des solutions multifonctionnelles qui reproduisent le cycle naturel de l'eau en ville, notamment les solutions fondées sur la nature. L'exercice de cette compétence se heurte cependant à de nombreux enjeux dont la difficulté d'évaluation des coûts de ces solutions dus à leur exploitation partagée entre plusieurs acteurs. La présente étude vise à contribuer à une proposition d'un outil permettant d'estimer les coûts d'exploitation de ces solutions multifonctionnelles.

Pour ce faire, une revue bibliographique a d'abord permis d'identifier les différentes solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux pluviales urbaines et de proposer une typologie pour les classer ; les opérations d'entretien nécessaire à leur exploitation ont également été recensées. Ensuite, un prototype permettant d'estimer les coûts d'exploitation d'une noue a été élaboré en utilisant la méthode des coûts complets en sections homogènes. Ce prototype s'est basé sur les coûts d'exploitation de la noue Sainte-Anne à Strasbourg (superficie 3000m²) et a ensuite été appliqué à la noue de l'Ain (superficie 2160 m²) afin de proposer des améliorations en vue d'élaborer un outil plus générique pour l'ensemble des solutions identifiées.

Les coûts d'exploitation annuel de la noue de l'Ain obtenu par le prototype étaient de **11 718 €** contre **9 335 €** estimé par le projet d'aménagement de la noue en 2018. Il ressort de cette étude que l'élaboration d'un outil générique requiert une collaboration avec divers gestionnaires de services suivant une trame commune pour harmoniser les opérations d'entretiens et établir un cadre normatif pour l'évaluation des coûts d'exploitation des solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux pluviales.

Mots Clés :

- 1. Coûts d'exploitation**
- 2. France**
- 3. Gestion des eaux pluviales urbaines**
- 4. Gestion Patrimoniale**
- 5. Solutions fondées sur la nature**

ABSTRACT

The redefinition of the role of stormwater in cities has led to a specific public service for urban stormwater management in France. This service is based on policies which aim to reintegrate stormwater into urban development strategies by employing multifunctional solutions that mimic the water cycle in cities, such as nature-based solutions. However, this service faces several challenges for its application including the difficulty of assessing the costs of these solutions due to their shared operation among several stakeholders. This study therefore aims to propose a costing tool for multifunctional stormwater management solutions.

To achieve this, a literature review was first used to identify different nature-based solutions for stormwater management and propose a typology for their classification; the maintenance tasks required for their operation were also identified. A prototype of the costing tool was afterwards designed for a swale using the full costing method. This prototype was based on the operating costs of the Sainte-Anne swale in Strasbourg (surface area 3,000 m²) and was then applied to the Ain swale (surface area 2,160 m²) which lay the foundation for improvements and eventually the design of a full-fledged tool for all the solutions identified.

The prototype's annual operating costs for the Ain swale were €11,718, compared with €9,335 estimated by the 2018 swale construction project. The study also concludes that the development of a generic costing tool will require collaboration with the various stakeholders involved in servicing these solutions to harmonize maintenance operations and establish a framework for costing service costs of nature-based solutions for stormwater management.

Key words:

- 1. Asset management**
- 2. France**
- 3. Nature-based solutions**
- 4. Service costs**
- 5. Urban stormwater management**

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ABC: Activity Based Costing

CA : Communauté d'agglomération

CEREMA : Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement

CGCT : Code Général des Collectivités Territoriales

EMS : Eurométropole de Strasbourg

ENGEES : École Nationale du Génie de L'Eau et de L'environnement de Strasbourg

EPA : Environmental Protection Agency (United States)

EPCI : Etablissements Publics de Coopération Intercommunale à fiscalité propre

GDIEP : Gestion Durable et Intégrée des Eaux Pluviales

GEPU : Gestion des Eaux Pluviales Urbaines

GestPatPluvO : Gestion Patrimoniale Durable et Multi-échelles des Solutions Fondées sur la Nature Dédiée aux Eaux Pluviales Urbaines

INRAE : Institut National de Recherche en Eau et Environnement

PRISMA: Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses

SAGE : Société, Acteurs et Gouvernements d'Europe

SfN : Solutions fondées sur la Nature

SfN-GEP : Solutions fondées sur la Nature pour la Gestion des Eaux Pluviales

SPA : Service Public Administratif

SPIC : Services Publics Industriels et Commerciaux

TA : Techniques Alternatives

TSM : Techniques Sciences et Méthodes

UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature

UMR : Unité Mixte de Recherche

ZA : Zone Artisanale

ZHA : Zone Humide Artificielle

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	10
I CONTEXTE ET JUSTIFICATION DE L'ÉTUDE	12
I.1 GESTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES : DEFINITION.....	12
I.2 L'ORGANISATION TERRITORIALE DE LA GESTION DES EAUX PLUVIALES ET SES ENJEUX	12
I.3 LE CHANGEMENT DE PARADIGME DANS LA GESTION DES EAUX PLUVIALES : DU TOUT-TUYAU A LA GESTION DURABLE ET INTEGREE	14
I.4 LES SOLUTIONS INTEGREEES ET DURABLES DE GESTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES ET LES ENJEUX DE LEUR MISE EN ŒUVRE	15
I.5 L'INTERET DE LA CONNAISSANCE DES COUTS DU SERVICE DE GESTION DES EAUX PLUVIALES	17
I.6 OBJECTIFS DE L'ETUDE	18
II METHODOLOGIE	19
II.1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	19
II.2 ÉLABORATION D'UNE TYPOLOGIE DE CLASSIFICATION DES SFN.....	21
II.3 APPROCHE D'ESTIMATION DES COUTS D'EXPLOITATION DES SFN.....	22
II.4 DEMARCHE DE PROPOSITION D'UN PROTOTYPE D'ESTIMATION DE COUTS.....	26
III RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	29
III.1 IDENTIFICATION DES SFN POUR LA GESTION DES EAUX PLUVIALES	29
III.2 CLASSIFICATION DES SFN SELON LA TYPOLOGIE ET RECENSEMENT DES OPERATIONS D'ENTRETIEN	34
III.3 PRESENTATION DU PROTOTYPE ET APPLICATION.....	36
III.4 LIMITES DE L'ETUDE ET RECOMMANDATIONS	41
CONCLUSION	43
IV ANNEXES	49

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Critères de classification des SfN.....	21
Tableau 2 : Typologie de classification des SfN	22
Tableau 3 : Les différentes charges incorporable à un coût	23
Tableau 4 : Liste des SfN identifiées dans la revue bibliographique.....	29
Tableau 5 : Classification des SfN suivant la typologie	34
Tableau 6 : Recensement des opérations d'entretien des SfN.....	35
Tableau 7 : Calcul du coût d'exploitation de la noue Sainte-Anne	36
Tableau 8 : Volume horaire d'interventions sur la noue Sainte-Anne	37
Tableau 9 : Calcul des ratios de coûts de la noue Sainte-Anne	38
Tableau 10 : Application du prototype à la noue de l'Ain	39
Tableau 11 : Calcul des ratios de coûts de la noue de l'Ain	40
Tableau 12 : Comparaison des ratios de coûts des deux noues	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Logigramme PRISMA pour une revue systématique.....	20
Figure 2 : Logigramme de la méthode des coûts complets par section homogènes	24
Figure 3 : Logigramme de la reconstitution du coût d'exploitation d'une SfN.....	25
Figure 4 : Schéma descriptif d'une noue	31
Figure 5 : Schéma descriptif d'un jardin de pluie	31
Figure 6 : Schéma descriptif d'une ZHA.....	31
Figure 7: Schéma descriptif d'un bassin sec	32
Figure 8 : Schéma descriptif d'un bassin en eau	32
Figure 9 : Schéma descriptif d'un arbre de pluie.....	33
Figure 10 : schéma descriptif d'un bassin d'infiltration	33
Figure 11 : Photo d'un parc inondable	33

INTRODUCTION

Les eaux pluviales sont à la croisée de multiples enjeux contemporains et futurs, et la gestion actuelle de cette ressource façonne la société de demain. Une gestion efficace des eaux pluviales permet de répondre à plusieurs défis, notamment de lutter contre les inondations et les îlots de chaleurs urbains. De plus, elle contribue à la préservation de la ressource en eau et à la protection des milieux aquatiques en réduisant les flux de pollution (Chocat et al. 2008 ; Chouli 2006). L'intégration des préoccupations environnementales dans les stratégies de gestion des eaux pluviales favorise également la préservation de la biodiversité et des services écosystémiques associés (Werey, Afrit, et Barjot 2023).

Cependant, jusqu'au début du 21^e siècle, le modèle dominant en matière de gestion des eaux pluviales en France consistait à les évacuer le plus loin possible des villes via des réseaux d'assainissement. Cette approche, centralisée et exclusivement hydraulique, a contribué à accentuer les risques d'inondations liés à l'imperméabilisation des sols. (Chocat et al. 2008). L'évacuation de ces eaux chargées de polluants était également une cause importante de la dégradation des milieux aquatiques et de la perte de biodiversité. En somme, la stratégie antérieure de gestion des eaux pluviales a contribué à de nombreux problèmes sociaux actuels auxquels il faut faire face en adoptant de nouvelles stratégies.

De nouvelles stratégies de gestion des eaux pluviales doivent alors être mises en place pour intégrer efficacement les aspects hydrauliques, environnementaux, et socioéconomiques. L'approche privilégiée est la gestion intégrée et durable des eaux pluviales, qui vise à restaurer le cycle naturel de l'eau et à réintégrer les eaux pluviales dans l'aménagement urbain. Cette approche s'appuie fortement sur les techniques alternatives pour favoriser l'infiltration des eaux pluviales et ralentir et limiter le ruissellement de l'eau de pluie, tout en limitant les flux de polluants déversés dans les cours d'eau (Carron et Guénégo 2013; Chocat et al. 2022). De plus, cette approche repose en partie sur des solutions fondées sur la nature, qui recréent ou exploitent des écosystèmes naturels pour gérer efficacement l'eau de pluie tout en assurant des bienfaits pour les humains et les écosystèmes (IUCN 2020).

La caractéristique principale de ces solutions fondées sur la nature (SfN) est leur multifonctionnalité puisqu'elles répondent simultanément à de multiples enjeux au-delà de la simple gestion des eaux pluviales (IUCN 2020). Cette multifonctionnalité qui fait leur force est paradoxalement la source majeure des difficultés rencontrées notamment pour leur exploitation. Au regard des nombreux services rendus par un ouvrage de type SfN, il est compliqué d'estimer

avec précision les coûts qu'engendre les services fournies par cette dernière (Yang 2019; 2019; Le Nouveau 2017). De plus, les opérations de suivi et d'entretien sont généralement partagées entre différents services publics, les coûts des solutions étant alors éparpillés entre ceux-ci (Carron et Guénéguou 2013). De fait, aujourd'hui, la connaissance des coûts des solutions de gestion des eaux pluviales de type SfN est partielle voire inexistante.

La connaissance des coûts est pourtant essentielle pour le bon fonctionnement d'un service et donc pour en évaluer les performances. Dans ce cas, comment améliorer la connaissance des coûts des SfN pour la gestion des eaux pluviales ? C'est l'objectif que cette étude s'est proposé d'atteindre en contribuant à la création d'un outil d'estimation des coûts d'exploitation des solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux pluviales. Le présent document est donc structuré en quatre parties. La première partie sert à rappeler le contexte de l'étude, les justifications pour sa réalisation, ainsi que ses objectifs spécifiques. La deuxième partie détaille la méthodologie dont la sélection des SfN retenu pour l'étude et le choix de la méthode d'analyse des coûts. La troisième partie présente les résultats obtenus ainsi que le prototype de l'outil élaboré, tout en faisant une analyse critique de celui-ci. Enfin, une conclusion viendra résumer entièrement l'étude et proposer des axes de réflexion pour approfondir le sujet.

I CONTEXTE ET JUSTIFICATION DE L'ÉTUDE

I.1 Gestion des eaux pluviales urbaines : définition

La gestion des eaux pluviales est un ensemble de pratiques et de stratégies visant à gérer de manière efficace et durable les eaux pluviales sur un territoire donné. Plus précisément, la gestion des eaux pluviales implique la mise en place de solutions pour faciliter une ou plusieurs fonctions d'évacuation, d'infiltration, de traitement, ou de réutilisation de l'eau de pluie. La principale dimension de la gestion des eaux pluviales est alors hydraulique car elle consiste à limiter le ruissellement d'importants débits d'eau de pluie dans toutes les zones où les capacités naturelles d'infiltration des sols ont été modifiées. L'objectif ici étant la prévention des risques d'inondations qui peuvent causer de nombreux dommages matériels et économiques.

La gestion des eaux pluviales est donc un aspect essentiel de l'aménagement du territoire, et elle s'avère aussi cruciale pour la préservation de la ressource en eau et de la biodiversité, et plus globalement pour l'adaptation aux changements climatiques. En effet, les stratégies de gestion des eaux pluviales ont un impact considérable sur la qualité et la quantité des ressources hydriques et des écosystèmes aquatiques selon qu'elles soient plus axées vers l'infiltration ou l'évacuation des eaux pluviales. En résumé, les eaux pluviales sont une ressource dont la gestion présente de nombreux enjeux socioéconomiques et environnementaux interconnectés, ce qui en fait une ressource au croisé de multiples domaines tels que l'aménagement du territoire, l'assainissement, la santé publique, ou encore l'écologie.

Nous détaillerons dans les sections suivantes comment la gestion des eaux pluviales est organisée en France ainsi que les enjeux majeurs qu'elle rencontre. Nous aborderons ensuite quelles stratégies de gestion des eaux pluviales ont été adoptées en France jusqu'aujourd'hui.

I.2 L'organisation territoriale de la gestion des eaux pluviales et ses enjeux

En France, la gestion des eaux pluviales urbaines (GEPU) s'effectue à travers un service public administratif qui correspond « à la collecte, au transport, au stockage et au traitement des eaux pluviales des aires urbaines » (CGCT, 2022). Plusieurs institutions administratives sont impliquées dans la gestion de cette ressource à différents niveaux de gouvernance mais les intercommunalités sont en général responsables pour l'exercice de la compétence GEPU.

I.2.1 L'exercice de la compétence gestion des eaux pluviales urbaines

Les intercommunalités de type syndicale dénommé Etablissements Publics de Coopération Intercommunale à fiscalité propre (EPCI-FP), sont reconnues par le CGCT comme étant les responsables de la compétence GEPU sur leur territoire. La gestion des eaux pluviales urbaines est une compétence obligatoire et distincte pour les communautés d'agglomération, et rattachée au service d'assainissement pour les communautés urbaines et les métropoles. En ce qui concerne les communautés de communes, cette compétence est également rattachée à l'assainissement mais son exercice reste facultatif pour celle-ci ; pour ces territoires, la gestion peut donc encore être exercée à l'échelon communal. De plus, selon certaines dispositions et conformément aux conditions énoncées dans le CGCT, les EPCI-FP peuvent transférer ou déléguer cette compétence à un syndicat. Différentes structures peuvent alors en réalité assurer la gestion des eaux pluviales urbaines sur un territoire selon les cas. L'exercice de la compétence GEPU par les EPCI est confronté à certains enjeux que nous détaillons ci-après.

I.2.2 Les délimitations entre la compétence GEPU et d'autres services publics

Le principal enjeu dans l'exercice de la compétence GEPU est qu'elle est en général partagée entre plusieurs services communaux et intercommunaux tels que l'assainissement, la voirie, les espaces verts (Le Nouveau 2017 ; Thebault et al. 2020). Cela est concevable, dans la mesure où les ouvrages conçus pour la gestion des eaux pluviales sont de diverses natures. On y retrouve les réseaux d'assainissement, les ouvrages de drainage, des espaces verts, de la chaussée, et des ouvrages d'infiltration végétalisés. Le patrimoine du service est donc très hétérogène et la délimitation des responsabilités entre les différents services qui contribuent à son exercice n'est pas toujours évidente. La gestion des eaux pluviales peut également interagir avec une autre compétence obligatoire pour les intercommunalités : la Gestion des Milieux Aquatiques et la Prévention des Inondation (GEMAPI). La ligne qui sépare ces deux compétences est fine car certaines actions menées par le service GEPU permettent de lutter contre les inondations en ville (Banques des Territoires 2021). Un enjeu important dans l'exercice de la compétence est donc l'articulation des frontières avec d'autres compétences, notamment lorsqu'elles sont exercées par des intercommunalités différentes.

I.2.3 Le financement de la compétence gestion des eaux pluviales urbaines

Un autre enjeu majeur de l'exercice de la GEPU est le manque de financement stable et dédié à cette compétence (Yang 2019 ; Carron et Guénéguou 2013). La gestion des eaux pluviales urbaines est un service public administratif (SPA) et est, à ce titre, financé par le contribuable

contrairement à l'eau et l'assainissement qui sont des services publics industriels et commerciaux (SPIC) financés par les usagers au travers du prix de l'eau (Le Nouveau 2017). Le financement de la GEPU dépend alors du budget général des collectivités (constitué d'impôts locaux, de dotation de l'Etat, etc.). Comme évoqué plus haut, l'exercice de la compétence est partagé entre différents services qui appartiennent à différentes collectivités ou établissements. Il en résulte que les dépenses de la GEPU sont partagées entre ces services et la répartition des charges est généralement établie au cas par cas (Le Nouveau 2017; Yang 2019). Plusieurs services contribuent alors en réalité à financer la GEPU, notamment en termes d'entretien et de maintenance des ouvrages.

I.3 Le changement de paradigme dans la gestion des eaux pluviales : du tout-tuyau à la gestion durable et intégrée

L'histoire de la gestion des eaux pluviales en France a été marquée par une évolution des pratiques et politiques, passant d'une approche centrée sur l'évacuation des eaux vers une approche prenant en compte les enjeux de société liés à la gestion de cette ressource. Les eaux pluviales étaient d'abord considérées comme une nuisance qu'il fallait évacuer loin des villes. L'influence du mouvement hygiéniste a ensuite favorisé le développement des réseaux d'assainissement via le système centralisé "tout-à-l'égout" qui consistait à évacuer et traiter le plus loin possible des villes, et généralement dans des cours d'eau avoisinant, les eaux pluviales et eaux usées (Chocat et al. 2008).

Les limites de cette approche se sont fait ressentir plus tard par le débordement des réseaux face à de fortes précipitations liées à la modification du cycle hydrologique et la diminution des volumes d'eau infiltrés dans les sols. Le premier constat était donc l'augmentation des inondations que cette approche visait à réduire. Les coûts d'entretien et de renouvellement des infrastructures, en plus des dommages économiques à supporter lors des surcharges des réseaux, étaient également des facteurs aggravants (Chouli 2006 ; Chocat et al. 2008). Ces problèmes ont conduit à la création des premières techniques alternatives (sous-entendu aux réseaux d'assainissement), notamment des grands bassins de rétention pour gérer les fortes crues, mais aussi traiter une partie de la pollution véhiculée par ces eaux. Les considérations en matière d'eaux pluviales n'étaient alors plus seulement hydrauliques, mais elles commençaient à prendre une dimension environnementale.

En parallèle, une prise de conscience croissante des enjeux environnementaux commence à façonner les réglementations dès les années 1970 au travers du concept de développement

durable. Plusieurs textes de lois mettent alors en place un agenda de préservation, et restauration de la ressource en eau et des milieux aquatiques, considérablement dégradés par l'évacuation des eaux des systèmes d'égouts. D'autre part, les questions de changements climatiques et de raréfaction de la ressource en eau rendent plus cruciale les actions de préservation de la ressource en eau, ressource qui désormais comprend aussi les eaux pluviales (Chocat et al. 2008). Cette prise de conscience environnementale à entamer une transition vers des approches plus durables et intégrée des eaux pluviales. L'objectif étant d'une part de gérer durablement les eaux pluviales en restaurant le plus possible le cycle naturel de l'eau, et d'autre part de réintégrer les eaux pluviales dans les stratégies d'aménagement urbain.

I.4 Les solutions intégrées et durables de gestion des eaux pluviales urbaines et les enjeux de leur mise en œuvre

En 2022, le premier Plan d'Action Nationale pour la Gestion Durable des Eaux Pluviales est lancé en France. Ce plan prévoit notamment une gestion des eaux pluviales qui s'intègre dans les politiques d'aménagement du territoire, réduit les impacts des eaux pluviales sur la qualité de l'eau, et mobilise cette ressource pour adapter les villes aux changements climatiques. L'histoire montre pourtant que la gestion classique dite « tout-tuyau » des eaux pluviales ne répond pas ou plus aux nombreux enjeux auxquels cette ressource est confrontée. L'action publique tend donc à encourager les collectivités responsables de la compétence GEPU vers une Gestion Durable et Intégrée des Eaux Pluviales (GDIEP) qui prend en compte plusieurs aspects au-delà des questions hydrauliques (multifonctionnalité des usages urbains, création/maintien d'écosystèmes) (Chocat et al. 2022). On retrouve dans cette stratégie de nombreux termes tels que la gestion à la source, les solutions fondées sur la nature, ou encore les techniques alternatives.

I.4.1 Les techniques alternatives et solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux pluviales

Les techniques alternatives sont des solutions pensées pour remédier aux nombreux problèmes qui se posaient avec les réseaux d'assainissement notamment les flux importants à gérer en périodes de crues, la pollution des milieux aquatiques, mais aussi les coûts importants des réseaux. Des termes similaires existent également pour désigner les solutions de gestion des eaux pluviales : gestion à la source (ou à la parcelle) ; technique (ou solution) compensatoire ; solutions (ou infrastructure) vertes et solutions hybrides, etc. (Chocat et al. 2022). Chacun des termes met l'accent sur des enjeux spécifiques liés à la gestion des eaux pluviales mais le terme

technique alternative reste le plus utilisé pour désigner l'ensemble des solutions pour une gestion durable et intégrée des eaux pluviales. Quelques exemples de telles solutions que l'on retrouve sont, les bassins de rétention et les puits ou tranchées d'infiltration.

Les solutions fondées sur la nature (SfN) sont définies par l'Union International pour la Conservation de la Nature (UICN) comme « des actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les enjeux de société, de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » (IUCN 2020). Ce sont donc des solutions qui s'appuient sur les écosystèmes pour répondre aux enjeux de sociétés tels que l'approvisionnement en eau et la prévention des risques naturels, tout en préservant leur biodiversité pour continuer d'en tirer des services écosystémiques de façon durable. En comparant les deux, on observe que les techniques alternatives (TA) se concentrent sur les aménagements physiques pour gérer les eaux pluviales tandis que les SfN adoptent une approche plus holistique en s'appuyant sur des processus naturels pour atteindre les objectifs en matière de gestion des eaux pluviales. Plusieurs ouvrages se retrouvent être alors à la fois des TA et des SfN.

I.4.2 Les enjeux de mise en œuvre des solutions de gestion durable et intégrée des eaux pluviales

Nous avons défini les solutions de GDIEP comme des solutions qui répondent simultanément à plusieurs enjeux de la gestion centralisée des eaux pluviales. Ces solutions sont donc par définition multifonctionnelles, notamment les SfN, dont cette caractéristique en fait leur avantage phare. Néanmoins, la multifonctionnalité des SfN est également la cause des multiples difficultés liées à leur mise en œuvre. En effet, ces solutions supposées s'intégrer dans l'aménagement urbain nécessite pour ce faire, une planification concertée entre divers acteurs et parties prenantes au sein même de la collectivité porteuse de la compétence (exemple : service des eaux pluviales et service des espaces verts). La coordination n'est pas toujours évidente puisque l'organisation existante autour de la gestion des eaux pluviales reste encore très centrée sur la gestion des réseaux d'assainissement (Chouli 2006). Les contraintes spatiales sont également un frein à la mise en œuvre des SfN qui nécessitent en général, une emprise au sol importante ce qui en parallèle rend les coûts initiaux d'investissement conséquents. Un autre enjeu sans doute plus vital, c'est la difficulté du suivi et de l'évaluation des performances de ces solutions due à leur exploitation partagée entre plusieurs acteurs. Ces solutions sont relativement nouvelles, et les connaissances autour des meilleures pratiques pour leur entretien

ou leur renouvellement ne sont pas vulgarisées, ce qui rend le suivi à long terme difficile. L'impact direct de ce manque de suivi est la difficulté d'évaluation des performances et des coûts de ces solutions, et donc globalement du service de gestion des eaux pluviales.

I.5 L'intérêt de la connaissance des coûts du service de gestion des eaux pluviales

La gestion patrimoniale d'un service correspond à une volonté d'optimiser ses performances financières et techniques pour maintenir le niveau du service et anticiper son évolution (Thebault et al. 2020). Les principales difficultés dans la gestion patrimoniale du service public GEPU résident dans la connaissance du patrimoine par les gestionnaires, ainsi que la bonne répartition des responsabilités revenant à chaque partie (Le Nouveau 2017 ; Werey, Afrit, et Barjot 2023; Thebault et al. 2020). Comme nous l'avons évoqué plus haut, le suivi des ouvrages du patrimoine GEPU constitué de SfN est difficile à mettre en œuvre dû à la multifonctionnalité de ces ouvrages dont l'exploitation est partagée avec plusieurs services (assainissement, voirie, espaces verts, etc.). En ce qui concerne les coûts d'exploitation du service, ils sont noyés dans la comptabilité de ces services puisqu'il n'existe pas de comptabilité dédiée au service GEPU, ni bien souvent de comptabilité analytique.

Toutes ces difficultés, y compris les difficultés de financement évoquées plus haut, rendent le coût du service GEPU difficile à évaluer. De plus, les économies réalisées par l'adoption d'une stratégie de gestion intégrée restent peu connues des gestionnaires, ce qui n'encourage pas la vulgarisation des solutions multifonctionnelles. En plus de l'évaluation des bénéfices économiques de la GDIEP, la connaissance du coût d'un service, que ce soit celui de la gestion des eaux pluviales ou un autre, est cruciale pour plusieurs raisons dont celles que nous citons ci-dessous :

- La connaissance des coûts facilite l'allocation efficace des ressources disponibles par les décideurs entre les différents services en fonction des priorités établies et permet d'objectiver les décisions.
- Les informations sur les coûts permettent également de planifier les investissements à long terme en fonction de la durabilité des solutions, tout en tenant compte des coûts d'entretien et de renouvellement des ouvrages concernés.
- Enfin, la connaissance des coûts facilite la transparence et la responsabilité des décideurs envers les parties prenantes, en garantissant du bon usage des fonds publics.

I.6 Objectifs de l'étude

Le projet GestPatPluvO¹, dans lequel s'inscrit la présente étude, vise à élaborer une méthode d'aide à la décision permettant de guider l'évaluation des performances des solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux pluviales (Werey et al. 2023).

Ainsi, la présente étude se propose de contribuer à une meilleure connaissance des coûts de la GEPU par les gestionnaires du service au regard de son importance pour le bon fonctionnement du service. Il s'agit plus précisément de contribuer à l'élaboration d'un outil d'estimation des coûts d'exploitation des solutions fondées sur la nature de gestion des eaux pluviales urbaines. L'étude comporte quatre objectifs spécifiques listés ci-dessous.

- Identifier des solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux pluviales et les classer selon une typologie.
- Recenser les activités d'exploitation pour chaque SfN identifiée.
- Proposer un prototype d'estimation des coûts d'exploitation pour une noue.
- Appliquer ce prototype à un cas d'espèce.

Les objectifs de l'étude sont atteints en suivant une méthodologie explicitée en partie II.

¹ GestPatPluvO : gestion patrimoniale durable et multi-échelles des solutions fondées sur la nature dédiée aux eaux pluviales urbaines

II METHODOLOGIE

II.1 Revue Bibliographique

La première étape de cette étude consiste à effectuer une revue bibliographique pour répondre à deux objectifs spécifiques :

- Identifier les solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux pluviales ;
- Recenser les différentes opérations d'entretien et de maintenance des solutions SfN.

La recherche bibliographique pour cette étude est menée en deux phases qui sont détaillées ci-dessous.

II.1.1 Identification des solutions fondées du la nature pour la gestion des eaux pluviales

Une fois la question de recherche générale formulée, « Quels sont les solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux pluviales ? », des mots clés ainsi que des associations ont été identifiés pour générer des articles sur le sujet. Les bases de données consultées pour la recherche sont : Google Scholar, Web of Science, et Science Direct. Le terme SfN est assez récent dans la littérature et plusieurs termes sont en réalité utilisés pour décrire les solutions de gestion des eaux pluviales qui répondent à la définition de l'UICN sur les solutions fondées sur la nature. D'autres sources ont également été consultées, notamment la revue technique TSM, le CEREMA, le Graie et les rapports de l'UICN. La période de recherche a été fixée à 10 ans (2014-2024) pour inclure les documents les plus récents. Comme présenté dans la **Figure 1**, 656 références ont initialement été obtenues. Un premier tri a permis de retirer les doublons, les articles qui n'étaient pas accessibles et ceux qui étaient dans une langue autre que l'anglais ou le français. Les titres, résumés et mots clés ont ensuite été analysés pour exclure tout article qui n'abordait pas spécifiquement des techniques ou solutions précises comme les articles de revue qui abordait les tendances dans la recherche sur les SfN. Une dernière étape de sélection qui consistait à examiner l'entièreté des articles a permis de retenir 39 documents finaux pour la suite de la revue.

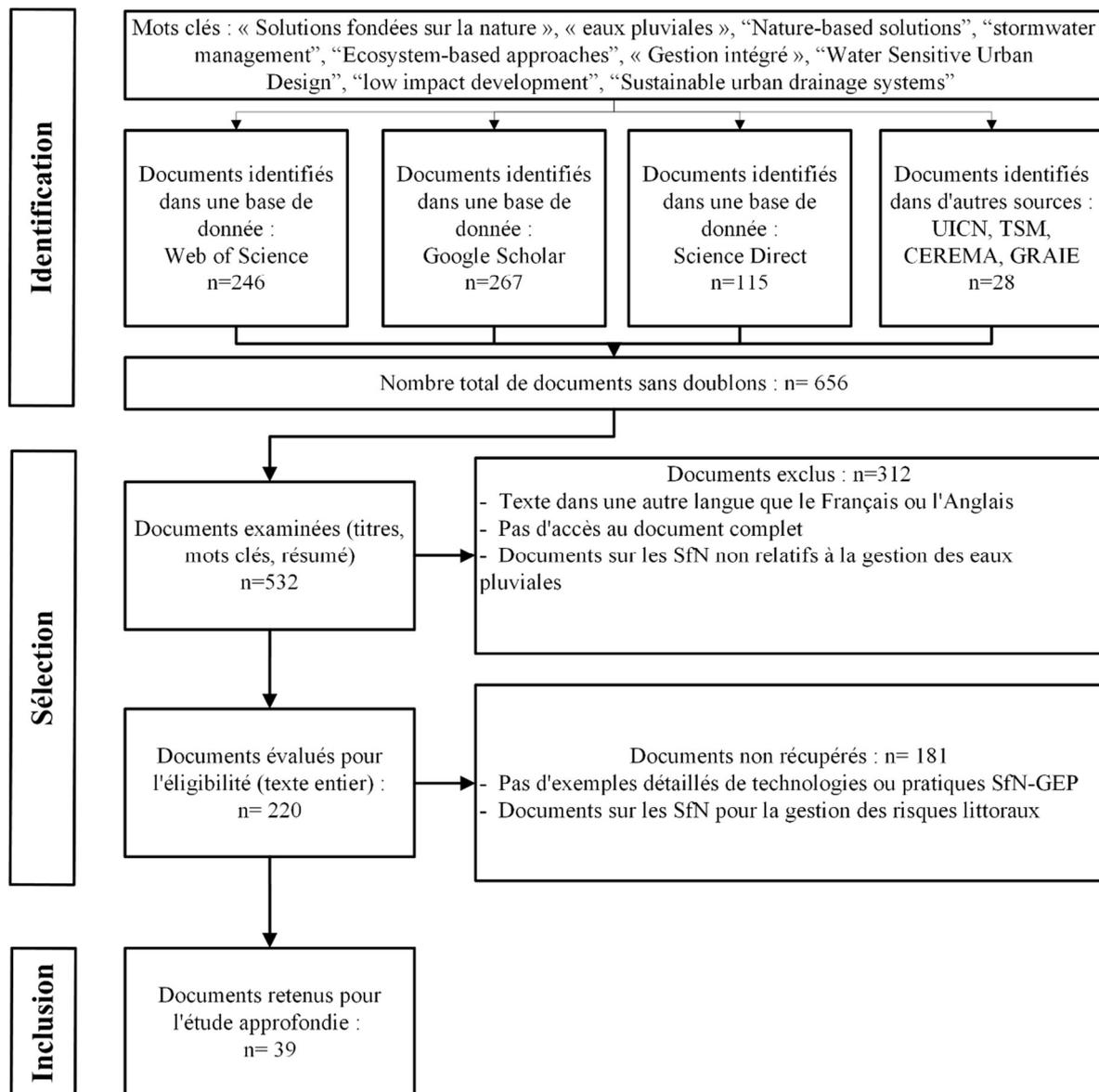


Figure 1: Logigramme PRISMA pour une revue systématique

Chaque document retenu a fait l'objet d'une lecture complète qui a permis d'identifier un nombre de SfN de gestion des eaux pluviales (Cf. Annexe 1). Cette analyse approfondie a permis d'identifier des SfN en retenant : le nombre de fois où elles étaient citées dans les documents ; leur échelle de mise en œuvre ; et si elles étaient reconnues comme ayant un bénéfice pour la biodiversité en plus d'une capacité de gestion qualitative ou quantitative des eaux pluviales. L'UICN définit les SfN comme ayant deux caractéristiques principales : elles procurent des bénéfices pour la biodiversité et répondent directement à au moins un autre défi sociétal. Les solutions de gestion des eaux pluviales répondent en général aux défis d'adaptation au changement climatique et parfois à d'autres défis tels que la sécurité de l'approvisionnement en eau. Pour se conformer à cette définition, l'absence de bénéfice pour la biodiversité est donc

un critère d'exclusion parmi les solutions identifiées. De plus, cette étude vise à évaluer les coûts des SfN pour les services publics qui en ont la charge, par conséquent les SfN dont l'exploitation est prise en charge par le privé ont également été exclues pour cette étude.

II.1.2 Recensement des différentes opérations d'entretiens des solutions identifiées

Chacune des solutions retenues pour l'étude a fait l'objet d'une deuxième phase de recherche qui avait pour but de recenser les modalités d'exploitation de la solution ainsi que les opérations d'entretiens et de maintenance de la solution. Des guides techniques et manuels ou carnets d'entretien de ces solutions auprès d'autorités tels que l'EPA, les Agences de l'eau, le Graie et CEREMA ont également été consultés. Les opérations d'entretien identifiées par la revue ont ensuite été regroupées en catégorie (que nous appelons des fonctions dans la suite de ce document) afin d'harmoniser les différentes pratiques d'entretien existantes.

II.2 Élaboration d'une typologie de classification des SfN

Les SfN pour la gestion des eaux pluviales sont conçues pour avoir un fonctionnement à la fois hydraulique et écologique. Plusieurs choix sont par ailleurs possibles quant aux caractéristiques hydraulique et écologique d'une solution et ces caractéristiques influent sur les opérations d'entretien à réaliser et donc sur le coût d'exploitation de la solution. Une typologie a été élaborée dans le but de classifier les différentes solutions retenues pour l'étude en fonction de critères identifiés comme ayant un impact direct sur les coûts d'entretien. Ces critères, présentés dans le **Tableau 1**, sont le résultat direct des observations faites sur les caractéristiques des solutions et les pratiques d'entretien lors de la revue bibliographique.

Tableau 1: Critères de classification des SfN

Critère	Observation
Forme et taille de la solution	Certaines solutions ont une longueur plus importante que la largeur. Pour d'autres, les dimensions caractéristiques de la solution sont la surface et la profondeur. Le type d'entretien dépend des dimensions de la solution. La taille de la solution a également un impact sur le temps passé pour son entretien et donc sur le coût de l'entretien.
Type de végétaux	Le type de végétaux ainsi que leurs caractéristiques (hétérogénéité, stratification, densité) favorise le développement de la biodiversité et donc la création d'écosystèmes autonomes qui nécessitent peu d'interventions humaines. Plus une solution présente de strates de plusieurs espèces, plus elle constitue un écosystème stable et moins elle a besoin d'entretien de sa végétation, ce qui peut réduire le coût d'entretien.

Mode d'arrivée d'eau	Le type d'entretien varie selon une arrivée d'eau directe (gestion à la source), par ruissellement d'eau de voirie, trottoir, etc. ou une arrivée d'eau via le réseau d'assainissement pluvial. La présence d'ouvrages de prétraitement (par exemple puisard de décantation pour les eaux de toiture ou bouche d'injection pour les eaux de voirie) influe également sur l'entretien.
Mode de restitution de l'eau	L'eau peut être restituée à débit contrôlé vers un exutoire, par infiltration (et/ou évapotranspiration), ou par double vidange (infiltration plus surverse à débit contrôlé). L'entretien du fond des ouvrages de stockage et des ouvrages de régulation de débit doit alors être pris en compte lorsqu'ils sont présents.

Le **Tableau 2** présente les différentes déclinaisons possibles pour chaque critère. La revue bibliographique en **II.1.2** a permis de classer les solutions retenues pour l'étude en fonction de ces déclinaisons.

Tableau 2 : Typologie de classification des SfN

Forme et taille de la solution	Type de végétaux	Mode d'arrivée d'eau	Mode de restitution de l'eau
Ouvrages linéaires	Strates herbacées (taille < 1m)	Gestion à la source	Débit contrôlé
Ouvrages de stockage (volume)	Strates arbustives (taille 1-5m)	Réseau d'assainissement	Infiltration et/ou Evapotranspiration
Ouvrage de surface	Strates arborées (taille > 5m)	Ruissellement	Double vidange
-	Végétation aquatique	-	-

II.3 Approche d'estimation des coûts d'exploitation des SfN

II.3.1 Définitions

En comptabilité, un coût fait référence à un ensemble de charges relatives à un élément (ex : coût de production, coût d'entretien, etc.). Ces charges se retrouvent généralement dans le compte des charges de la comptabilité générale. Les charges peuvent être réparties en quatre catégories comme présenté dans le **Tableau 3**. Les différents types de charges y sont présentées ainsi que des exemples de chaque catégorie de charges. Par exemple la charge salariale du personnel administratif est une charge fixe et indirecte car elle ne dépend pas du niveau d'activité du service GEPU et n'est pas affectable au coût d'exploitation seul.

Tableau 3 : Les différentes charges incorporables à un coût

Affectabilité/ Variabilité de la charge	Charge directe : qui concerne un seul coût et peut donc y être directement affecté	Charge indirecte : qui concernent toute la structure et ne peuvent pas être affectées à un seul coût.
Charge fixe : qui reste stable lorsque le niveau d'activité varie	-	- Salaire du personnel administratif - Local et entretien des bâtiments
Charge Variable : qui varie proportionnellement au du niveau d'activité de la structure ou des caractéristiques de l'infrastructures	- Main d'œuvre d'entretien des espaces verts (varie en fonction du nombre de site et leur importance)	- Loyers et entretien des locaux (nombre et surface des bureaux)

Avant de faire le choix d'une méthode d'estimation des coûts, il était important de définir le type de coûts auxquels nous nous intéressons. Ces coûts d'exploitation comprennent les charges directes de maintenance qui correspondent à l'entretien et la surveillance des composantes de la solution pour la maintenir en bon état. A cela s'ajoutent des charges indirectes telles que les frais de structure c'est-à-dire les frais liés à la structure où travaillent les agents d'exploitation (ex : frais de formation continue, moyens techniques, locaux, etc.), et les frais généraux liés au fonctionnement du service (ex : frais d'assurance, amortissements, etc.). Nous recherchons donc une méthode permettant d'évaluer l'ensemble de ces coûts à l'échelle d'une solution.

II.3.2 Evaluation des coûts par la méthode des coûts complets

Il existe plusieurs méthodes pour calculer des coûts en fonction des charges qui les constituent. Les méthodes les plus couramment utilisées sont les méthodes des coûts directes, du coût marginal, des coûts variables, des coûts standards, et celle des coûts complets. Pour le contexte de solutions multifonctions et multi-services dans lequel s'inscrit cette étude, la méthode des coûts complets semble être la plus adaptée. En effet, la méthode des coûts complets permet de calculer un coût en prenant en compte toutes les charges directes et indirectes qui y sont associées qu'elles soient fixes ou variables. Cette méthode permet une estimation complète d'un objet de coût contrairement aux autres méthodes qui ne prennent pas en compte tous les types de charges (par exemple la méthode du coût directe et celle des coûts variables n'incorporent pas aux coûts les charges indirectes et les charges fixes respectivement).

Le calcul des coûts par la méthode des coûts complets peut se faire par centre d'analyse (sections homogènes) ou par activité (activity-based costing, ABC en anglais). Dans les deux variantes, les charges directes sont directement affectées aux coûts sans traitement particulier. Les charges indirectes quant à elles sont affectées à des produits via des centres d'analyse (qui sont des services d'une entreprise) ou à des activités de l'entreprise. La variante par sections homogènes est plus simple car l'ABC nécessite une connaissance exhaustive des différentes activités de la structure dont le nombre rend le calcul plus lourd. Pour éviter cette complexité, l'outil que nous voulons élaborer s'appuie donc sur la méthode des coûts complets par sections homogènes dont les étapes de calcul de coûts sont présentées dans la **Figure 2**.

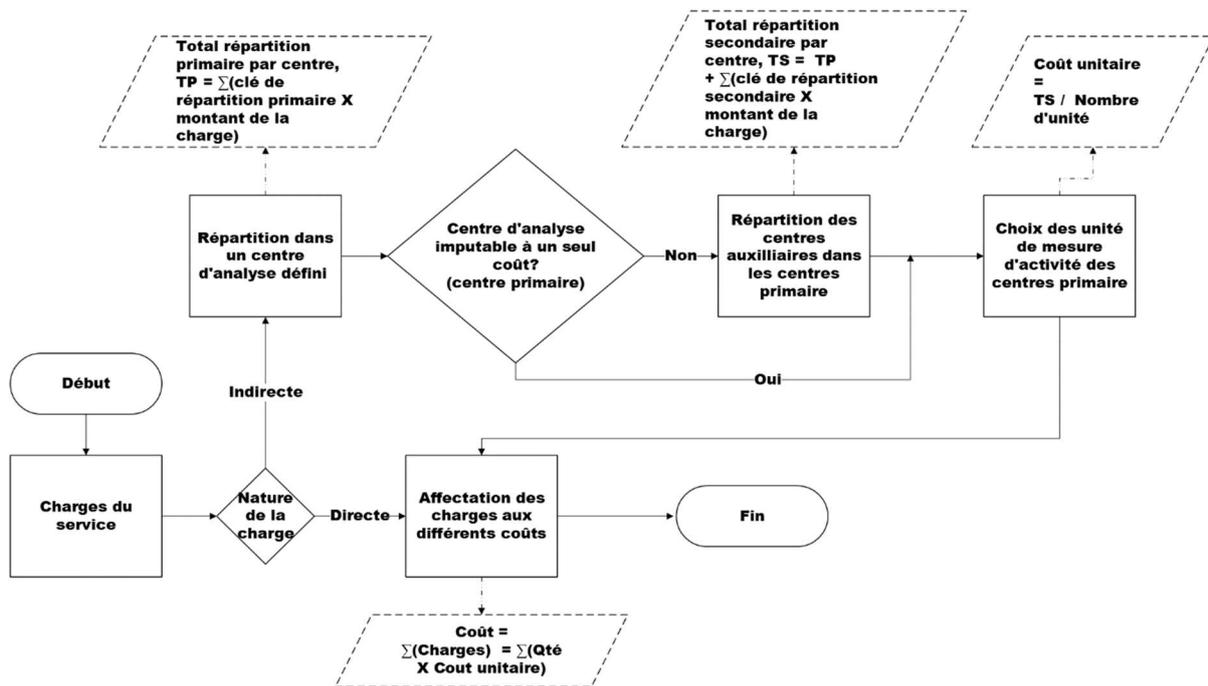


Figure 2 : Logigramme de la méthode des coûts complets par section homogène

La méthode des coûts complets prend en compte l'ensemble des charges relatives à un objet de coût. Elle nécessite alors pour être appliquée de connaître ces charges afin de les affecter, dans notre cas, aux coûts d'exploitation des SfN. Le calcul de ces charges peut s'effectuer de deux façons suivantes :

- **Par comptabilité analytique dédiée** qui consiste à mettre en place un suivi analytique des dépenses liées à la gestion des eaux pluviales à partir de la comptabilité générale. Pour la mise en place d'un outil d'estimation des coûts, cela requiert de mettre en place un cadre partagé entre les différents acteurs responsables de l'exploitation des SfN pour imputer au fil de l'eau les activités de chaque acteur à l'outil.

- **Par reconstitution des coûts** qui consiste à décomposer les activités d'exploitation des différents services responsables d'une SfN en tâches d'exploitation dont les coûts sont notamment fonction d'un prix de main d'œuvre et de matériel utilisé pour une fréquence de répétition de la tâche donnée. La **Figure 3** présente un logigramme du processus de reconstitution du coût d'exploitation à l'échelle d'une solution.

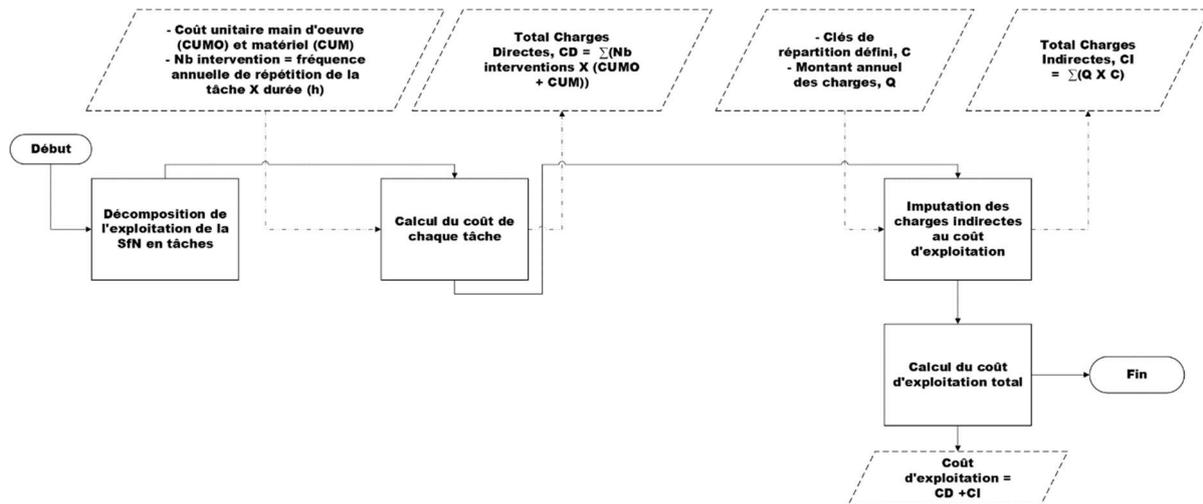


Figure 3 : Logigramme de la reconstitution du coût d'exploitation d'une SfN

Plusieurs contraintes liées au contexte de la gestion des eaux pluviales en France, que nous avons détaillé en partie I et rappelons brièvement ci-dessous, rendent la mise en place de la première méthode (par la voie comptable) difficile voire impossible en l'état actuel.

- La première est évidemment l'absence de comptabilité dédiée au service GEPU dont les dépenses sont noyées dans les budgets généraux des collectivités et relèvent en l'état actuel souvent de plusieurs collectivités (exemple : la compétence GEPU relève de la compétence de la Métropole du Grand Lyon et les tâches d'exploitation relatives aux espaces verts sont effectuées par la Ville de Lyon). La mise en place d'une comptabilité pour les SfN nécessiterait de flécher continuellement toutes les dépenses relatives à l'entretien des SfN à travers plusieurs comptes de résultats.
- La répartition des charges d'exploitation des SfN entre les services n'est pas toujours conventionnée et peut donc s'avérer différente d'une solution à une autre, ou d'un territoire à un autre, ce qui rend complexe l'harmonisation des dépenses en termes d'exploitation.
- Il y a un intérêt à mettre en place une comptabilité analytique pour chaque service et collectivité intervenant dans le processus de fourniture de service. Des cadres et des

modalités existent (Werey 2021), mais ils ne sont pas mis en œuvre en l'état pour des services récents (GEPU) en termes de gouvernance et d'organisation.

En l'état actuel de mise en œuvre institutionnel de la compétence GEPU et des modalités comptables constatées (absence de comptabilité analytique, imputation partielle des charges), il est impossible de mobiliser cette méthode pour déterminer les coûts d'exploitation des solutions SfN inventoriées. C'est pour cela que l'approche des coûts reconstitués est privilégiée. Historiquement, c'est cette méthode qui est d'ailleurs largement utilisée pour les compétences eau potable et assainissement collectif, notamment pour réaliser des expertises du prix de l'eau (Alexandre et Grand d'Esnon 1998). A titre illustratif, la CA de Lannion a opéré de cette façon pour déterminer les coûts de la GEPU au moment de la réalisation de son étude de transfert de compétence (Debril et Cholin 2023).

II.4 Démarche de proposition d'un prototype d'estimation de coûts

Pour reconstituer les charges directes à affecter aux coûts d'exploitation d'une SfN, trois données sont nécessaires pour chacune des tâches d'exploitation recensée : la fréquence d'intervention, le temps d'exécution par intervention, et les coûts unitaires associés. Au début de cette étude, nous avons tenté d'obtenir ces données via des entretiens avec les différents gestionnaires de SfN à l'échelle nationale afin d'obtenir des moyennes exploitables pour proposer un outil générique. Des collectivités identifiées par des projets précédents comme ayant un patrimoine important de SfN ont alors été sélectionnés pour des entretiens. La tâche s'est néanmoins avérée difficile car les premiers entretiens n'ont pas permis de recueillir les données nécessaires. Les collectivités ou établissements interviewés manquaient de connaissance suffisante de leur patrimoine SfN pour pouvoir identifier quelles opérations d'entretien étaient menées sur ces ouvrages. La répartition des tâches est tellement fractionnée entre les services qu'il faudrait mettre en place une collaboration sur le long terme avec les différents gestionnaires de plusieurs SfN comme le suggère une (Werey 2021) pour obtenir des données pour alimenter l'outil. Nous avons donc décidé de proposer un prototype basé sur un des cas d'étude de ces travaux et de l'appliquer à un autre cas pour proposer les pistes de construction de l'outil.

Le principe de l'outil que nous voulons proposer est un outil qui soit capable de calculer des estimations de coûts pour un utilisateur en fonction des fréquences d'intervention sur la SfN et des caractéristiques de celle-ci. En estimant les coûts de plusieurs SfN, on peut déterminer des ratios de coûts en regroupant les opérations d'entretien en plusieurs catégories (fonctions). Les

ratios sont affinés au fur et à mesure que l'on estime le coût de plusieurs SfN de même type. A défaut d'avoir pu obtenir les données nécessaires pour les SfN identifiées, le prototype de l'outil se base sur les deux cas d'études suivants.

(Bahy 2017) propose une estimation des coûts d'exploitation par la méthode des coûts complets à l'échelle d'une solution sur quelques sites de l'Eurométropole de Strasbourg (EMS). Cette estimation s'appuie sur la trame de calcul en Annexe 2. Nous avons sélectionné un des sites, la noue Sainte-Anne pour proposer un prototype de l'outil. La noue Sainte-Anne est située dans le quartier de la Robertsau, une zone résidentielle avec l'existence d'un bassin sec naturel et d'un ponton. La noue a une superficie de 3000 m², et son entretien est géré par le Service des Espaces Verts et de Nature de la Ville de Strasbourg et le Service de l'Eau et de l'Assainissement de l'Eurométropole de Strasbourg en cas de dysfonctionnement et pour les organes hydrauliques. Plusieurs entretiens avec ces différents services ont permis de reconstituer le coût d'exploitation de la noue.

A partir de l'identification des charges d'exploitation (cf. Annexe 3), nous avons déterminé des ratios de coûts via les étapes suivantes :

- Les différentes charges (directes et indirectes) ont été réparties dans six catégories (fonctions d'entretiens) principales A-F. Le coût annuel en € de chaque fonction (Tf) est calculé par l'équation suivante.

$$Tf_{i,j} = \sum \text{charges} \times CS$$

Où CS est le coefficient de charges de structure fourni par l'EMS ;

Les fonctions i sont celles qui dépendent de D et les fonctions j sont celles qui ne dépendent pas de D ; D étant la dimension caractéristique de la SfN (pour une noue, le m²)

- Les différents ratios de coûts (R) pour chaque fonction sont calculés par les équations suivantes : $R_i = \frac{Tf_i}{N_i \times D}$ $R_j = \frac{Tf_j}{N_j}$

Le nombre d'intervention (N) est la fréquence d'exécution des différentes tâches relatives aux charges d'une fonction. La dimension caractéristique, D peut être le mètre linéaire, le mètre carré, ou le mètre cube en fonction de la SfN concernée (Cf. la typologie en II.2).

Les ratios de coûts obtenus constituent la base du premier prototype dont les variables d'entrée pour déterminer les coûts sont le nombre d'intervention annuel de chaque fonction, $N_{i,j}$ et la surface de la noue concernée, D . Le coût d'exploitation (**CE**) est alors calculé comme suit :

Coût d'exploitation, CE ($\text{€} \cdot \text{an}^{-1}$)

$$= \sum (\text{coût des fonctions}) = \sum (R_i \times N_i \times D) + \sum (R_j \times N_j)$$

Ce premier prototype est ensuite appliqué sur une noue située dans un projet d'aménagement d'une zone artisanale (ZA) dans l'Ain (à 45 km de Lyon). Le projet d'aménagement a été décliné en trois scénarios : deux scénarios constitués d'un réseau pluvial avec un bassin d'infiltration à l'aval et un dernier où 2160 m² de noues d'infiltration remplace le réseau pluvial (Graie 2018). Les coûts d'entretien de chaque aménagement ont été comparés et les valeurs des différents coûts ont été définies sur la base de retours d'expérience des collectivités et bureaux d'études du projet. Nous reprenons l'estimation de ces coûts en mobilisant le premier prototype de reconstitution des coûts pour comparer les valeurs obtenues et alimenter des pistes d'amélioration.

III RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Identification des SfN pour la gestion des eaux pluviales

A travers la revue bibliographique, 13 solutions ont été identifiées. Le **Tableau 4** présente les différentes solutions identifiées ainsi que le nombre de références (Réf) où elles sont citées. On remarque également à travers la littérature que plusieurs termes sont utilisés pour décrire des solutions similaires. Les termes connexes, synonymes, et l'équivalent anglophone pour chaque solution ont ainsi été regroupés. Par exemple, les noues et fossés sont des ouvrages similaires à l'exception qu'une noue possède généralement une plus grande largeur, des pentes plus douces et une faible profondeur. Les deux ouvrages semblent remplir les mêmes fonctions et sont dimensionnés selon les mêmes principes. Les îles végétalisées quant à elles sont des jardins de pluie de faible superficie. Par ailleurs, le terme biorétention est utilisé pour décrire le processus d'abattement de la pollution des eaux pluviales par la végétation et les microorganismes. Les solutions de biorétention peuvent être des fosses d'arbre, des jardins de pluie ou des noues (sans fonction de transport), la différence avec les ouvrages classiques étant leur capacité de traitement qualitatif avancée des eaux pluviales.

Les toitures et murs végétalisés ont été exclus de la liste finale car ils sont généralement implantés dans le domaine privé et leur gestion n'incombe pas aux services publics car ils sont entretenus au même titre que le reste du bâtiment où ils sont implantés. Par ailleurs, les chaussées et tranchées drainantes ont également été exclues car elles n'ont pas été citées par les références comme rapportant des bénéfices à la biodiversité, critère primordial selon l'UICN pour qu'une solution soit classé comme étant une SfN.

Tableau 4: Synthèse des SfN identifiées dans la revue bibliographique

Solutions	Synonymes, Termes connexes	Description	Réf
Toiture végétalisée	Green roof	Toiture recouverte d'un substrat qui stocke temporairement les eaux pluviales pour être utilisé par des végétaux plantés sur le substrat.	22
Noue	Bioswale, green or grass swale, ditch, Fossé	Surface plantée le long d'une voie qui récupère les eaux pluviales pour les stocker, les transporter, ou les infiltrer dans le sol.	22
Jardin de pluie	Bioretention cell, rain garden, île végétalisée	Massif végétalisé de faible profondeur qui infiltre et stocke temporairement les eaux pluviales pour leur utilisation par les végétaux.	19

Chaussée drainante	Permeable pavement, porous pavement	Couche supérieure (couche de roulement) d'une chaussée constituée de matériaux permettant l'évacuation de l'eau par infiltration de l'eau dans le sol sans stagnation.	16
Zone humide artificielle	Constructed wetland, Zone de rejet végétalisée, zone tampon	Espace aménagé qui reproduit le fonctionnement de marais naturel pour traiter les eaux pluviales en servant de filtre pour éliminer la pollution.	13
Bassin sec	Bassin de rétention, detention pond, dry pond	Bassins de stockage temporaire des eaux qui peuvent également effectuer un prétraitement par décantation. L'eau est infiltrée dans le bassin ou évacuée progressivement en aval.	11
Bassin en eau	Bassin de rétention, retention pond, wet pond	Bassin de stockage naturel ou artificiel qui recueille les eaux pluviales et constitue un milieu écologique sous forme de mare ou d'étang	8
Arbres de pluie	Tree pit, fossé d'arbre, bioretention	Arbres plantés en milieu urbanisé dans une fosse qui reçoit les eaux pluviales via une tranchée d'infiltration.	7
Tranchée d'infiltration	Infiltration trench	Ouvrage peut profond dans le sol qui recueille les eaux pluviales sur sa longueur ou en un point pour les évacuer par infiltration.	7
Récupération d'eau de pluie	Rainwater harvesting	Dispositif qui permet de stocker les eaux pluviales dans une cuve ou une citerne au plus près de la source. L'eau peut être utilisée pour l'arrosage, la recharge des nappes etc.	6
Bassin d'infiltration	Infiltration basin	Bassin de retenue en surface ou enterré qui récupère et stocke temporairement les eaux pluviales pour les infiltrer dans le sol. Il peut être sec ou en partie en eau.	6
Mur végétalisé	Green wall	Structure verticale recouverte de végétaux qui sont alimentés en eau par les eaux pluviales de toitures.	3
Parc inondable	Flood park	Espace urbain recouvert de végétaux dimensionné pour être inondé temporairement en cas de forte pluie, et fournir d'autres services (loisirs, détente, etc.) lorsqu'il est sec.	2

Au total, huit (8) SfN ont donc été retenues pour la suite de cette étude. Ces solutions sont présentées ci-dessous.

1. Noues



Figure 4 : Schéma descriptif d'une noue
(Source : Innovyze, 2020)

Une noue peut prendre plusieurs formes différentes en fonction des objectifs visés avec la solution. Elle peut avoir une fonction principale de transport vers un autre ouvrage de gestion des eaux pluviales, ou d'infiltration dans le sol (elle peut alors être assimilée à une cellule de biorétention). Lorsqu'elle remplit une fonction d'infiltration elle peut être doublée d'une tranchée d'infiltration.

2. Jardin de pluie

Les jardins de pluie désignent plusieurs types de solutions de gestion des eaux pluviales sous forme de dépression végétalisée conçu pour stocker temporairement puis infiltrer les eaux pluviales. L'évapotranspiration des végétaux présents contribue également à diminuer les quantités d'eaux pluviales recueillies par la solution. Les jardins peuvent prendre plusieurs formes mais sont généralement composés de strates de matériaux filtrant (substrat) et de drain en profondeur lorsque la perméabilité du sol est insuffisante.



Figure 5 : Schéma descriptif d'un jardin de pluie
(Source : Innovyze, 2020)

3. Zone humide artificielle (ZHA)

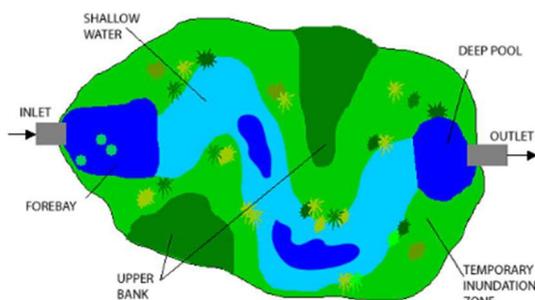


Figure 6 : Schéma descriptif d'une ZHA
(Source : North Carolina State, 2007)

Les ZHA sont généralement construites sur des terres hautes et en dehors des plaines ou voies d'inondation. Elles sont mises en place en modifiant le terrain naturel pour construire l'écoulement hydraulique souhaité. En présence de sols perméables, des couches d'argiles sont installées après excavation de la terre avant de

planter la végétation souhaitée. Celle-ci est soigneusement choisie pour répliquer au mieux les processus d'épuration des zones humides naturelles.

4. Bassin sec

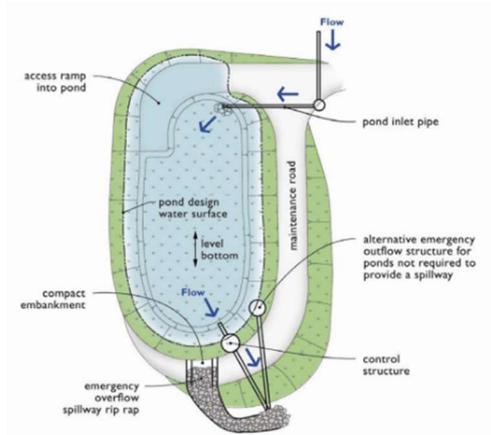


Figure 7 : Schéma descriptif d'un bassin sec
(Source: Clark County Stormwater Manual 2015)

Les bassins secs sont des ouvrages de stockage temporaire des eaux pluviales. Ils peuvent être placés en amont d'un réseau d'assainissement (pour contrôler les débits et limiter les rejets par déversoir d'orages) ou en aval (pour améliorer la qualité de l'eau rejetée vers le milieu naturel). Le fond du bassin peut être étanche (l'eau est restituée vers un exutoire) ou perméable lorsque le sol permet une évacuation rapide (on parle alors d'un bassin d'infiltration). Les bassins secs sont en

général enherbés et peuvent avoir plusieurs fonctions récréatives (terrain de sport, espace de détente, etc.)

5. Bassin en eau

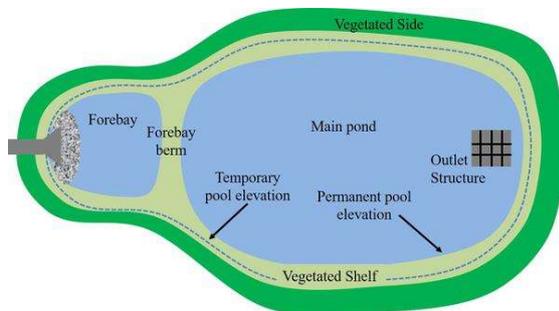


Figure 8 : Schéma descriptif d'un bassin en eau
(Source : North Carolina State University, 2010)

Les bassins en eau sont des réserves de stockage permanent d'eaux pluviales. Ils conservent un volume minimal par temps secs et peuvent accueillir une lame d'eau supplémentaire (marnage) lors d'un événement pluvieux. Pour maintenir la hauteur d'eau normale, la hauteur de marnage peut être évacuée par infiltration ou rejet

vers un exutoire (ou les deux). Cette solution est généralement installée en bout de réseau et peut être munie d'ouvrages de prétraitement (ex : dégrillage). Les bassins en eau accueillent généralement une biodiversité importante (qui augmente avec la taille de la solution) de faune et de flore et peuvent servir d'autres fonctions récréatives (pêche, loisirs nautiques, etc.)

6. Arbre de pluie

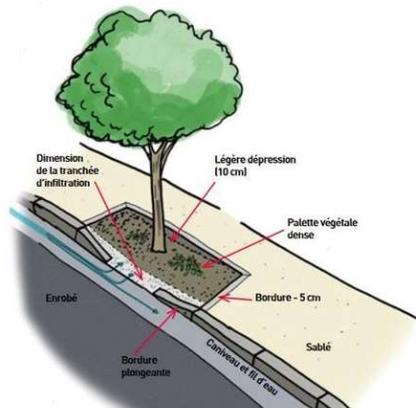


Figure 9 : Schéma descriptif d'un arbre de pluie
(Source : Caltran et al, 2022)

Le principe d'un arbre de pluie est de récupérer les eaux pluviales de surfaces imperméables adjacentes (voiries, trottoir) et de les acheminer vers la fosse d'un arbre. Une partie de l'eau est utilisée par l'arbre et l'autre s'infiltré dans le sol profond. Plusieurs arbres peuvent récupérer l'eau d'une seule fosse continue ou encore des fosses d'arbres unique alimentées en série.

7. Bassin d'infiltration

Les bassins d'infiltration sont une variante des bassins de retenue avec un stockage temporaire des eaux pluviales. Leur installation peut uniquement se faire sur des sols très perméables et avec un faible potentiel de contamination de la nappe phréatique. La présence d'ouvrages de prétraitement et de vidange est également importante pour leur bon fonctionnement. Les bassins d'infiltration fonctionnent mieux sur des surfaces restreintes et généralement plus petites que les bassins secs.

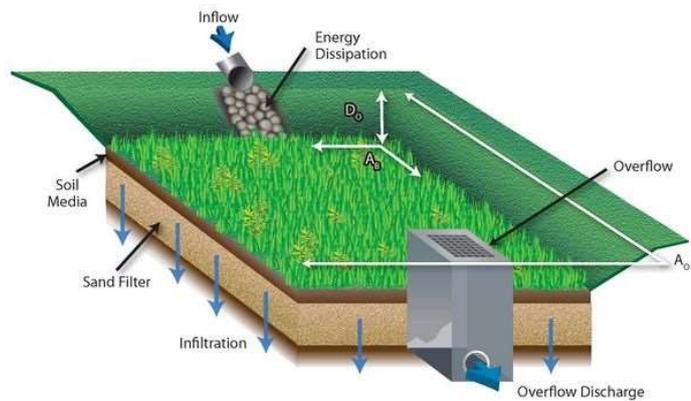


Figure 10 : schéma descriptif d'un bassin d'infiltration
(Source : Minnesota Stormwater Manual, 2015)

8. Parc inondable



Figure 11 : Photo d'un parc inondable
(Source : La Laguna, Tenerife, 2023)

Le parc inondable prend généralement la forme d'un grand espace urbain qui a vocation récréatrice par temps sec mais à la capacité d'être inondé en cas de fortes pluies pour limiter les débits transitant dans les réseaux. La partie inondable se présente souvent comme un bassin de rétention temporaire qui infiltre ou restitue les eaux vers un exutoire après l'événement pluvieux

III.2 Classification des SfN selon la typologie et recensement des opérations d'entretien

Le **Tableau 5** présente la classification des différentes SfN en fonction de leurs caractéristiques susceptibles d'influer sur la nature ou la fréquence des opérations d'entretien à effectuer et donc des coûts d'exploitation engendrés. Plusieurs options sont possibles pour une même solution ; par exemple l'arrivée d'eau dans une noue peut s'effectuer par infiltration (IN), à débit contrôlé vers un exutoire (DC), ou à double vidange (DV). La noue peut également abriter plusieurs strates de végétation allant d'herbacées à arborées. Les différentes noues sur un territoire donné peuvent alors avoir des caractéristiques différentes et donc des fréquences et temps d'entretien différentes ce qui aurait un impact sur le coût d'entretien de chaque noue. Dans le **Tableau 5**, les différentes caractéristiques possibles pour chaque SfN sont marquées par une croix. Cette classification présente une grille de description des SfN et permet de distinguer des SfN de même nature d'un point de vue d'entretien de la solution.

Tableau 5 : Classification des SfN suivant la typologie

Solution/ Critère		Noues	Bassin en eau	Bassin sec	Bassin d'infiltration	Arbre de pluie	Jardin de pluie	ZHA	Parc inondable
Forme et taille de la solution		Linéaire/ Surface	Volume	Volume	Volume	Surface	Surface	Surface	Volume
Type de végétaux	Strates herbacées	x*	x**	x	x	x	x	x	x
	Strates arbustives	x**	x**	x	x	x	x	x	x
	Strates arborées	x**	x**			x			x
	Végétation aquatique		x*					x	x*
Mode d'arrivée d'eau	Gestion à la source	x			x	x	x		x
	Réseau d'assainissement		x	x	x			x	
	Ruissellement		x	x	x			x	x
Mode de restitution de l'eau	Débit contrôlé	x	x	x				x	
	Infiltration et/ou Evapotranspiration	x			x	x	x		x
	Double vidange	x	x***	x			x		x

* au fond de l'ouvrage

** sur les berges ou pentes

*** une partie étanche et une partie infiltrante

Les différents critères permettent également de définir des classes de solutions. Par exemple les noues, jardins et arbres de pluie, ainsi que les zones humides peuvent être regroupés comme solutions de surface tandis que tous les types de bassins ainsi que les parcs inondables sont des solutions de retenue. Ce critère est utile pour déterminer la dimension caractéristique à appliquer pour chaque solution.

Les opérations d'entretien courantes pour les SfN sélectionnées ont été recensées pendant la revue bibliographique. Des plages de fréquences d'entretien ont également été retrouvées dans plusieurs documents analysés (cf. Annexe 5). L'ensemble des opérations d'entretien des SfN sont assez similaires d'une solution à une autre, et peuvent être regroupées en plusieurs catégories qu'on nomme des fonctions d'entretien. Les différentes opérations sont réparties en sept fonctions présentées dans le **Tableau 6**.

Tableau 6 : Recensement des opérations d'entretien des SfN

Fonction/SfN	Curage	Tonte	Surveillance/ inspection	Gestion des déchets	Nettoyage	Taille	Arrosage
Noues	X	X	X	X	X	X	
Bassin en eau	X		X	X	X		
Bassin sec	X	X	X	X	X		
Bassin d'infiltration	X		X		X	X	
Arbre de pluie			X	X		X	X
Jardin de pluie		X	X	X	X	X	X
Zone humide artificielle			X	X	X		
Parc inondable	Exploitation de l'espace inondable similaire à celui d'un bassin d'infiltration ou un bassin sec						

- Les opérations de curage concernent l'enlèvement de sédiments décantés dans le fond de l'ouvrage et dans certains cas le remplacement de la couche de terre colmatée.

- La tonte concerne les SfN avec la présence de strates de végétation herbacées tandis que la taille concerne ceux avec des strates arbustives. La nécessité de tondre ou de tailler la végétation relève du besoin d'esthétique ou d'efficacité de la solution et certaines solutions comme les bassins qui sont souvent situés hors de la ville peuvent s'en passer.
- La surveillance ou l'inspection concerne à la fois les organes hydrauliques (exutoires d'eau, ouvrages de prétraitement, etc.) et l'état de la végétation. Le suivi de la qualité de l'eau est également inclus pour les solutions en eau permanente. L'arrosage des espaces verts est nécessaire en période de forte sécheresse et pendant toute leur durée.
- La fonction de nettoyage regroupe à la fois l'entretien des espaces verts (débroussaillage, faucardage) et le nettoyage des organes hydrauliques (avaloirs, grille, etc.). La gestion des déchets concerne le ramassage des déchets et des résidus de végétaux lors de l'inspection ou du nettoyage.

Ce regroupement des opérations d'entretien permet d'identifier, à l'aide des fréquences et des temps d'entretien, les charges directes à affecter au coût d'exploitation de chaque solution. Les fonctions d'entretiens peuvent alors être utilisés pour harmoniser les pratiques d'entretiens existantes.

III.3 Présentation du prototype et application

Le **Tableau 7** présente les éléments considérés pour l'estimation des coûts d'exploitation de la noue Sainte-Anne. Les détails de calcul des charges sont présentés en Annexe 3. Les coûts unitaires de chaque intervention ont été déterminés via les grilles tarifaires de l'EMS pour l'année 2019. Les montants des différentes charges (CT) ont été réparties dans des fonctions d'entretiens A-F. Ces fonctions sont présentées dans le **Tableau 9**.

Tableau 7 : Calcul du coût d'exploitation de la noue Sainte-Anne (Source : Adapté de Werey, 2021)

Charges directes (CD)						
Opération d'entretien		Fonction	Unité (/an)	Quantité Q	Coût Unitaire(/h)	Charge (€/an)
Matériel	Gyrobroyage	A	m ²	3000	0,24 €	720,00 €
	Débroussailleuses manuelles	A	heure	8	62,40 €	499,20 €
	Taille	B	heure	20	54,00 €	1 080,00 €
	Nettoyage déchets	F	m ²	3000	0,72 €	2 160,00 €
Engin motorisé	Engin motorisé léger type piaggio	E	heure	12	2,72 €	32,64 €
	Curage de la buse/hydrocureuse	D	heure	0,33	165,00 €	54,45 €

	Curage des grilles puisard/ siphon de rue ou dessableur hydrocureuse	D	1/2 h	2	84,00 €	168,00 €
MOD	Frais de personnel (préparation, tâches et transport) catégorie C	C	heure	36	22,34 €	804,24 €
Elimination des déchets	Engins motorisés	E	heure	2	5,71 €	11,42 €
	Evacuation des déchets verts	E	tonne	1,5	45,00 €	67,50 €
	Traitement des boues du curage	E	tonne	0,23	78,00 €	17,94 €
Total Charges Directes (CD)						5 615,39 €
Charges Indirectes (CI)						
	Intitulé	Fonction	Unité	Total (€/an)	Clé de répartition	Charge (€/an)
	Frais d'assurance (6161)	E	€	45000	1,27E-05	0,57 €
	Dotation d'amortissements (2815,2818)	E	€	7140000	1,27E-05	90,39 €
	Frais de publicité (campagne de signalisation)	E	€	0	1,27E-05	-
	Carburant (6062)	E	€	22200	1,27E-05	0,28 €
	Somme des entretiens (61521,61523,61528,61551,6156)	E	€	705000	1,27E-05	8,93 €
	Fournitures (6063,6064,6068)	E	€	245000	1,27E-05	3,10 €
Total Charges Indirectes (CI)						103,27 €
Coefficient de frais de structure (CS)						1,11
Coût d'exploitation = (CD + CI) *CS						6 347,71 €

Les ratios de coûts sont ensuite calculés pour chacune des fonctions en fonction des fréquences d'interventions sur la noue. Ces fréquences sont présentées dans le **Tableau 8**. Les détails de calcul des volumes horaires se trouvent également en Annexe 3.

Tableau 8 : Volume horaire d'interventions sur la noue Sainte-Anne (Source : Adapté de Bahy, 2017)

Matériel utilisé	Nb agents	Fréquence /an	Durée (h)	Volume horaire (par an)
Gyrobroyage	2	2	2	8
Débroussaillage manuel	2	2	2	8
Taille	2	1	10	20
Engin motorisé léger type piaggio transport agents	2	2	-	12
Hydrocureuse curage buses	2	1/3	-	0,67
Hydrocureuses curage puisards	2	1	-	2
Total				38,67

La dimension caractéristique choisie pour le calcul des ratios de coûts est la surface de la noue (en m²). Puisque les fonctions C et D ne dépendent pas de la surface de la noue, leurs ratios de

coûts ont donc été calculés en euro par intervention. Pour la fonction C, le nombre d'interventions pratiqué est de 2 fois par an en considérant que les agents se déplacent simultanément pour la taille et le débroussaillage. Pour la fonction D, le curage des buses est effectué une fois tous les trois ans tandis que celui des puisards est effectué chaque année ; on considère que lorsque les deux curages ont lieu la même année, ils comptent comme une intervention unique. La fonction E traite des moyens de réalisation notamment du coût de l'engin motorisé pour les deux interventions des agents. Pour la fonction F, on estime que l'enlèvement des déchets se fait une fois par an.

Tableau 9 : Calcul des ratios de coûts de la noue Sainte-Anne

Fonction	Total sans CS	Total avec CS	N _{i,j}	R _{i,j}	Unité
A : Tonte	1 219,20 €	1 353,31 €	2	0,23	€/m²/intervention
B : Taille des végétaux	1 080,00 €	1 198,80 €	1	0,40	€/m²/intervention
C : Préparation des interventions et déplacements	804,24 €	892,71 €	2	446,35	€/intervention
D : Nettoyage et curage hydraulique	222,45 €	246,92 €	1	246,92	€/intervention
E : Moyens indirects de réalisation des activités	232,77 €	258,37 €	2	0,04	€/m²/intervention
F : Nettoyage des espaces verts	2 160,00 €	2 397,60 €	1	0,80	€/m²/intervention
Total	5 718,66 €	6 347,71 €	-	-	-

Le calcul du coût d'exploitation d'une noue peut alors s'effectuer par le prototype suivant où D représente la surface de la noue (en m²) et N_{i,j} le nombre d'intervention de la fonction i ou j.

$$CE(\text{€ par an}) = 0,23D(N_A) + 0,40D(N_B) + 447(N_C) + 247(N_D) + 0,04D(N_E) + 0,80D(N_F)$$

Les ratios de coûts ont ensuite été utilisés pour calculer le coût d'exploitation de la noue de la ZA de l'Ain comme présenté dans le **Tableau 10**. Le coût d'exploitation de la noue estimé par le Graie est de 9335 €/an (Cf. Annexe 4) tandis que celui estimé à partir du prototype est de 11 718 €.

Tableau 10 : Application du prototype à la noue de l'Ain

Evaluation du coût d'exploitation de la noue (Graie 2018)				
Opération d'entretien	Quantité	Unité	Coût unitaire	Total/an
Tonte (6 passages de 0,5j pour une équipe)	3	€/j/équipe	1000	3 000 €
Nettoyage des grilles des avaloirs (33 grilles pour 1ha de voirie)	33	€/grille	5	165 €
Propreté manuelle (3,4 jours par an pour une équipe)	3,4	€/j/équipe	1000	3 400 €
Visite de contrôle de la noue (0,25j/an pour une équipe)	0,25	€/j/équipe	1000	250 €
Réfection partielle à la suite d'un accident	2160	€/m2	70	2 520 €
Coût d'exploitation total				9 335 €
Evaluation du coût d'exploitation de la noue par le prototype				
Surface de la noue		2160 m ²		
Fonction	R_{i,j}	Unité	N_{i,j}	Total/an
A : Tonte	0,23	€/m2/intervention	6	2 923 €
B : Taille des végétaux	0,40	€/m2/intervention	-	-
C : Préparation des interventions et déplacements	446,35	€/intervention	6	2 678 €
D : Nettoyage et curage hydraulique	246,92	€/intervention	1	247 €
E : Moyens indirects de réalisation des activités	0,04	€/m2/intervention	-	-
F : Nettoyage des espaces verts	0,80	€/m2/intervention	3,4	5 869 €
Coût d'exploitation total				11 718 €

À partir du **Tableau 10**, nous faisons quelques observations sur le prototype. On remarque que la majorité des opérations d'entretien de la noue de l'Ain peuvent être regroupées dans les fonctions du prototype. Cependant, le prototype ne prend pas en compte les charges de surveillance de la noue estimé à 250 €/an par le Graie ; cette fonction a cependant été identifiée dans la revue bibliographique et il convient de l'ajouter au prototype. On note également un coût important estimé par le prototype par rapport aux estimations du Graie, on a notamment un écart de 2383 € en sachant que le prototype ne prend pas en compte les deux dernières opérations d'entretien. Il ne peut néanmoins pas en être déduit qu'il s'agit d'une surestimation des coûts d'exploitation de la noue de l'Ain par le prototype, puisque le prototype se base sur les coûts d'exploitation d'une seule noue.

La comparaison des coûts d'exploitation obtenus ne nous semble pas être une base évidente pour poser des recommandations pour l'élaboration de l'outil. Nous décidons de calculer de nouveaux ratios de coûts en se basant sur la noue de l'Ain comme présentés dans le **Tableau 11**. On rajoute pour cela une nouvelle fonction, G pour la surveillance de la noue. De plus, nous considérons que la réfection de la noue est une opération d'entretien curative et exceptionnelle, nous ne la prendrons pas en compte pour le calcul de ratios.

Tableau 11 : Calcul des ratios de coûts de la noue de l'Ain

Opération d'entretien	i,j	Total	N _{i,j}	R _{i,j}	Unité
Tonte (6 passages de 0,5j pour une équipe)	A	3000	6	0,23	€/m ² /intervention
Nettoyage des grilles des avaloirs (33 grilles pour 1ha de voirie)	D	165	1	165	€/intervention
Propreté manuelle (3,4 jours par an pour une équipe)	F	3400	3,4	0,46	€/m ² /intervention
Visite de contrôle de la noue (0,25j/an pour une équipe)	G	250	1	250	€/intervention

Le **Tableau 12** présente une comparaison des ratios de coûts obtenus pour la noue de l'Ain et celle de Sainte-Anne.

Tableau 12 : Comparaison des ratios de coûts des noues de l'Ain et de Sainte-Anne

Fonction	Unité	R _{i,j} (l'Ain)	R _{i,j} (St-Anne)	Écart
A : Tonte	€/m ² /intervention	0,23	0,23	0%
B : Taille des végétaux	€/m ² /intervention	-	0,40	-
C : Préparation des interventions et déplacements	€/intervention	-	446	-
D : Nettoyage et curage hydraulique	€/intervention	165	247	±33%
E : Moyens indirects de réalisation des activités	€/m ² /intervention	-	0,04	-
F : Nettoyage des espaces verts	€/m ² /intervention	0,46	0,80	±42%
G : Surveillance et contrôle	€/intervention	250	-	-

On observe des ratios quasi identiques pour la fonction A, mais des écarts de plus de 150% entre les deux ratios pour les fonctions D et F. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces disparités notamment les différences entre les coûts unitaires des opérations d'entretien de chaque noue. A partir de ces résultats, nous pouvons poser deux recommandations majeures pour l'élaboration de l'outil.

On constate des écarts importants entre les ratios que l'on peut expliquer par la différence qui existe entre les estimations de coûts faites pour les deux noues. Il paraît nécessaire, avant d'élaborer un outil, d'harmoniser le calcul des coûts d'exploitation des différentes solutions prises en compte pour le calcul des ratios de coûts. Cela permettra d'obtenir des ratios plus fiables et étendre le nombre de variables prise en compte dans l'équation du prototype. Ensuite on a des fonctions qui regroupe les opérations d'entretien dans un cas mais pas dans l'autre, comme la fonction de surveillance, G qui n'est pas prise en compte par le prototype. Une collaboration avec des gestionnaires de services est nécessaire pour recenser le plus d'opérations d'entretien possible, afin d'affiner les définitions et l'exhaustivité des fonctions d'entretien. Les observations faites à partir du prototype et de son application permettront de guider les discussions sur l'élaboration d'un outil générique pour l'ensemble des solutions identifiées.

III.4 Limites de l'étude et recommandations

III.4.1 Limites de l'étude

Cette étude a permis de proposer un prototype d'estimation des coûts d'exploitation pour les noues. Les résultats obtenus sont néanmoins sujets aux différentes limites de l'étude listées ci-dessous.

- Les opérations d'entretiens recensées par la revue de littérature ne sont pas exhaustives. Il existe peut-être des fonctions d'exploitation autres que celles identifiées à partir de la revue ainsi que celles proposés par le prototype.
- Certains calculs de coûts concernant les noues de l'Ain et Sainte-Anne ne sont pas explicités notamment le calcul des coûts unitaires. Cela limite la connaissance des différentes variables prises en compte dans les estimations de coûts, ce qui peut biaiser les résultats obtenus pour les différents ratios de coûts et ne permet pas de comparer objectivement les ratios obtenus avec chaque noue.
- Le prototype élaboré se base sur un coût unitaire de main d'œuvre et un coefficient de charges de structure propre à l'EMS, valeurs qui peuvent sans doute varier d'un service à un autre et qui influent sur la valeur des ratios de coût.
- Certaines informations sur les caractéristiques des noues utilisées dans cette étude ne sont pas explicitées, notamment le type de végétation et le fonctionnement hydraulique des noues. Appliquer le prototype sur une noue aux caractéristiques différentes crée

donc des disparités entre les coûts obtenus comme démontré avec le cas de la noue de l'Ain.

III.4.2 Recommandations

Les résultats obtenus permettent d'identifier les améliorations nécessaires pour proposer un modèle générique pour l'ensemble des SfN identifiées.

- Pour un prototype plus générique et applicable à d'autres solutions, il est nécessaire de prendre plus de variables en compte au-delà des fréquences d'interventions. Il faudrait trouver un compromis entre la facilité d'utilisation de l'outil et sa précision.
- Proposer un outil pour l'ensemble du catalogue des solutions identifiées nécessite un travail plus approfondi d'entretiens avec des gestionnaires de services suivant une trame commune pour harmoniser les opérations d'entretiens effectués et les méthodes de calcul de coûts unitaire. Cela pourrait palier à la disparité observée entre les ratios de coûts ou du moins mieux les expliquer pour pouvoir faire des choix lors du calcul des ratios de coût basés sur les données des gestionnaires.
- Pour le prototype, nous avons calculés les ratios pour les moyens indirects de réalisation des activités (fonction E) en fonction des interventions d'exploitation. Cette fonction est pourtant composée presque exclusivement de charges indirectes qui peuvent grandement varier d'un service à un autre. Pour généraliser l'outil, il serait peut-être plus efficace de laisser l'évaluation de cette fonction à l'utilisateur en fonction des clés de répartition définit dans la structure.
- Il convient également de normer des variables et de les définir afin d'avoir des ratios et des modalités de calcul transposables. Ainsi, les frais de structure indiqué pour la noue "Sainte-Anne" (coefficient 1,16 appliqué à l'ensemble des charges d'exploitation) sont très nettement inférieurs à ceux observés pour les outils d'expertises des coûts d'exploitation des services d'assainissement collectif (coefficient 1,7 appliqué sur les coûts chargés de main d'œuvre). L'examen des modalités d'inventaire des charges entre les deux noues laisse à penser que les approches de détermination des coûts d'exploitation de sont pas homogènes. Pour aboutir à des ratios de coûts génériques, il est impératif de dresser un cadre normatif.

CONCLUSION

La présente étude avait pour objectif de proposer un prototype d'estimation des coûts d'exploitation des solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux pluviales. Une revue de la littérature a permis d'identifier différentes SfN pour la gestion des eaux pluviales et les classer selon une typologie. A partir d'un cas réel, nous avons pu proposer un prototype d'estimation des coûts pour une noue qui serait fonction de sa superficie et des fréquences de répétition des opérations d'entretiens effectués. Ce prototype a été testé et les résultats montrent néanmoins qu'il y a une disparité entre les opérations d'entretiens effectuées sur un même type de solution, et sur la façon dont leurs coûts d'exploitations sont calculés.

Pour pallier ce problème, les opérations d'entretien courantes identifiées lors de cette étude vont constituer la base d'entretiens futurs avec des gestionnaires de service pour interroger les pratiques réelles sur le terrain. Le but de cette approche est également d'harmoniser les pratiques d'entretien sur le long terme afin de proposer un cadre normatif pour l'évaluation des coûts d'exploitation des solutions fondées sur la nature. Les différents gestionnaires interrogés lors de cette première phase de l'étude ont par ailleurs montré un intérêt pour l'avancée de cette étude au vu des nombreux enjeux de connaissances de coûts qu'ils ont évoquées au sein de leurs services. Il apparaît alors évident que l'élaboration d'un outil d'estimation des coûts d'exploitation serait bénéfique pour ces services et qu'il serait potentiellement prêts à mettre en place le cadre approprié pour son élaboration. En somme, cette première étude exploratoire a contribué à peaufiner la démarche nécessaire vers une meilleure connaissance des coûts d'exploitation des SfN, et donc du service GEPU, connaissance essentielle pour l'évaluation des performances du service et son amélioration.

Références bibliographiques

- Alexandre, O, et A. Grand d'Esnon. 1998. « Le coût des services d'assainissement ruraux. Evaluation des coûts d'investissement et d'exploitation ». *Le coût des services d'assainissement ruraux. Evaluation des coûts d'investissement et d'exploitation*, n° 7-8, 19-31.
- Bahy, F Z. 2017. « Elaboration d'une méthode de calcul des couts de gestion des ouvrages d'eau pluviales: etude exploratoire appliquée sur les sites de l'Eurométropole de Strasbourg et de la Métropole du Grand Lyon ». *Sciences de l'environnement*. <https://hal.inrae.fr/hal-02607220/document>.
- Banques des Territoires. 2021. « GEMAPI, Gestion des eaux pluviales urbaines et maîtrise des eaux de ruissellement : Périmètre et articulation des compétences ». novembre 26. https://www.banquedesterritoires.fr/sites/default/files/2021-12/TC-Webconf_Gemapi-Gepu_26-11-2021.pdf.
- Carron, D., et S. Guénéguou. 2013. « État des lieux des modes de financement des eaux pluviales en France ». *Techniques Sciences Méthodes*, n° 5, 83-91. <https://doi.org/10.1051/tsm/201305083>.
- Cerema. 2016. « Jardins de pluie : Une dimension écologique et paysagère de l'aménagement ». <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/jardins-pluie>.
- Chocat, B, M Abirached, D Delage, et J.A. Faby. 2008. « Etat de l'art sur la gestion urbaine des eaux pluviales et leur valorisation ». Office International de l'Eau. https://www.ekopolis.fr/sites/default/files/2019-09/CHOCAT-Bernard_%20Etat-de-lart-gestion-urbaine-des-eaux-pluviales.pdf.
- Chocat, B., F. Cherqui, B. Afrit, G. Barjot, M. Boumahdi, Pascal Breil, É Brelot, et al. 2022. « Contribution à une meilleure explicitation du vocabulaire dans le domaine des solutions dites « alternatives » de gestion des eaux pluviales urbaines ». *TSM. Techniques Sciences Méthodes – Génie urbain, génie rural*, n° 5 (mai), 103. <https://doi.org/10.36904/tsm/202205103>.
- Chouli, Eleni. 2006. « La gestion des eaux pluviales urbaines en Europe : analyse des conditions de développement des techniques alternatives ». Phdthesis, Ecole des Ponts ParisTech. <https://pastel.hal.science/pastel-00002263>.
- Debril, Johann, et Étienne Cholin. 2023. « Retour d'expérience sur la prise de compétence de gestion des eaux pluviales urbaines par une communauté d'agglomération ». *Techniques Sciences Méthodes* 7-8 (août):73-85. <https://doi.org/10.36904/tsm/202307073>.
- Graie. 2018. « Comparaison des coûts de différents scénarios de gestion des eaux pluviales ». https://asso.graie.org/portail/http-www-graie-org-graie-graiedoc-doc_telech-eaux_pluviales_gestion_source_cout_sept18-pdf/.
- Grand Lyon, Métropole. 2022a. « Livret Technique : les arbres de pluie ». <https://www.ofb.gouv.fr/le-projet-life-integre-artisan/documentation-life-artisan/grand-lyon-livret-technique-les-arbres-de>.

- . 2022b. « Méthodes de gestion des eaux pluviales ». https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/eau/assainissement/202208_eauxpluviales_ouvrages.pdf.
- IUCN. 2020. *Standard Mondial de l'UICN Pour Les Solutions Fondées Sur La Nature : Première Édition*. IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.08.fr>.
- Le Nouveau, Nathalie. 2017. « Éléments pour la connaissance des coûts et des dépenses de gestion des eaux pluviales ». <https://www.cerema.fr/fr/actualites/gestion-eaux-pluviales-journee-restitution-du-projet-giemu>.
- MDDEFP. 2020. « Considérations d'opération, d'entretien et de suivi ». In *Guide de gestion des eaux pluviales -Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec*. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide.htm>.
- Pays-de-la-loire, DREAL. 2012. « Les techniques alternatives en assainissement pluvial : descriptif et exemples de réalisation ». https://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/A4_techniques_alternatives.pdf.
- Thebault, Emma, Jérémie Sage, Véronique Ferrier, Bruno Kerloc'H, Muriel Saulais, et Emmanuel Berthier. 2020. « La gestion patrimoniale des ouvrages et aménagements dédiés à la gestion des eaux pluviales urbaines. Retour d'expérience auprès d'une sélection de 21 collectivités ». Research Report. Cerema. <https://hal.science/hal-03010195>.
- Werey, Cathy. 2021. « Gestion patrimoniale, coûts de gestion des eaux pluviales – techniques alternatives ».
- Werey, Cathy, B. Afrit, et G. Barjot. 2023. « Synthèse du guide Solutions de gestion durable des eaux pluviales - Gestion patrimoniale ». ASTEE. <https://www.astee.org/publications/synthese-du-guide-solutions-de-gestion-durable-des-eaux-pluviales-gestion-patrimoniale/>.
- Werey, Caty, Frederic Cherqui, Corinne Curt, Franck Taillandier, Sylvie Vanpeene, Christophe Wittner, et Pascal Di Maiolo. 2023. « GestPatPluvO : gestion patrimoniale durable et multi-échelles des solutions fondées sur la nature dédiées aux eaux pluviales urbaines ». juillet. <https://hal.science/hal-04185046>.
- Yang, Yubei. 2019. « Analyse du financement de la gestion des eaux pluviales: Apport des pratiques à l'échelle internationale et de l'étude d'instruments financiers ». Université de Lorraine. <https://hal.inrae.fr/hal-02610041>.

Webographie

- « Cconstruction de l'organisation territoriale de la France : chronologie ». 2017. *vie-publique.fr* (blog). 6 juillet 2017. <http://www.vie-publique.fr/eclairage/126857-cconstruction-de-lorganisation-territoriale-de-la-france-chronologie>.
- Chocat, B. 2023. « Solutions de gestion durable des eaux pluviales urbaines (HU) ». *Wikihydro* (blog). août 2023. [http://wikydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Solutions_de_gestion_durable_des_eaux_pluviales_urbaines_\(HU\)](http://wikydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Solutions_de_gestion_durable_des_eaux_pluviales_urbaines_(HU)).
- « Compétences eau et assainissement : du transfert à l'exercice par les communautés et métropoles ». 2020. *Intercommunalités De France* (blog). 12 octobre 2020. <https://www.intercommunalites.fr/publications/competences-eau-et-assainissement-du-transfert-a-lexercice-par-les-communautes-et-metropoles/>.
- « En quoi consiste l'intercommunalité? » 2024. *vie-publique.fr* (blog). 15 janvier 2024. <http://www.vie-publique.fr/fiches/270602-en-quoi-consiste-lintercommunalite>.
- « Les solutions fondées sur la nature ADOPTA ». s. d. *Adopta* (blog). Consulté le 8 février 2024. <https://www.adopta.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>.
- « L'exercice de la compétence gestion des eaux pluviales urbaines ». s. d. *Maires de France* (blog). Consulté le 13 février 2024. <https://www.mairesdefrance.com/m/article/?id=87>.
- Minnesota Stormwater Manual. s. d. « Best management practices/Specifications and details/Operation and maintenance ». Consulté le 5 mars 2024. https://stormwater.pca.state.mn.us/index.php?title=Category:Level_3_-_Best_management_practices/Specifications_and_details/Operation_and_maintenance.
- US EPA, OW. 2020. « National Menu of Best Management Practices (BMPs) for Stormwater-Post-Construction ». Overviews and Factsheets. 28 août 2020. <https://www.epa.gov/npdes/national-menu-best-management-practices-bmps-stormwater-post-construction>.
- Ville éponge. s. d. « Entretien | Boîte-à-outils | Ville éponge ». Consulté le 5 mars 2024. <https://eponge.org/boite-a-outils/entretien>.

Table des Matières

INTRODUCTION.....	10
I CONTEXTE ET JUSTIFICATION DE L'ÉTUDE.....	12
I.1 GESTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES : DEFINITION.....	12
I.2 L'ORGANISATION TERRITORIALE DE LA GESTION DES EAUX PLUVIALES ET SES ENJEUX	12
I.2.1 <i>L'exercice de la compétence gestion des eaux pluviales urbaines.....</i>	<i>13</i>
I.2.2 <i>Les délimitations entre la compétence GEPU et d'autres services publics.....</i>	<i>13</i>
I.2.3 <i>Le financement de la compétence gestion des eaux pluviales urbaines.....</i>	<i>13</i>
I.3 LE CHANGEMENT DE PARADIGME DANS LA GESTION DES EAUX PLUVIALES : DU TOUT-TUYAU A LA GESTION DURABLE ET INTEGREE.....	14
I.4 LES SOLUTIONS INTEGRES ET DURABLES DE GESTION DES EAUX PLUVIALES URBAINES ET LES ENJEUX DE LEUR MISE EN ŒUVRE.....	15
I.4.1 <i>Les techniques alternatives et solutions fondées sur la nature pour la gestion des eaux pluviales.....</i>	<i>15</i>
I.4.2 <i>Les enjeux de mise en œuvre des solutions de gestion durable et intégrée des eaux pluviales.....</i>	<i>16</i>
I.5 L'INTERET DE LA CONNAISSANCE DES COUTS DU SERVICE DE GESTION DES EAUX PLUVIALES.....	17
I.6 OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	18
II METHODOLOGIE.....	19
II.1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	19
II.1.1 <i>Identification des solutions fondées du la nature pour la gestion des eaux pluviales.....</i>	<i>19</i>
II.1.2 <i>Recensement des différentes opérations d'entretiens des solutions identifiées... 21</i>	
II.2 ÉLABORATION D'UNE TYPOLOGIE DE CLASSIFICATION DES SFN.....	21
II.3 APPROCHE D'ESTIMATION DES COUTS D'EXPLOITATION DES SFN.....	22
II.3.1 <i>Définitions.....</i>	<i>22</i>
II.3.2 <i>Evaluation des coûts par la méthode des coûts complets.....</i>	<i>23</i>
II.4 DEMARCHE DE PROPOSITION D'UN PROTOTYPE D'ESTIMATION DE COUTS.....	26
III RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	29
III.1 IDENTIFICATION DES SFN POUR LA GESTION DES EAUX PLUVIALES.....	29

III.2	CLASSIFICATION DES SFN SELON LA TYPOLOGIE ET RECENSEMENT DES OPERATIONS D'ENTRETIEN	34
III.3	PRESENTATION DU PROTOTYPE ET APPLICATION.....	36
III.4	LIMITES DE L'ETUDE ET RECOMMANDATIONS	41
III.4.1	<i>Limites de l'étude</i>	41
III.4.2	<i>Recommandations</i>	42
	CONCLUSION	43
IV	ANNEXES	49

IV ANNEXES

Annexe 1: Liste des 39 références sélectionnés pour l'étude	I
Annexe 2: Trame de calcul des coûts d'entretien.....	VI
Annexe 3 : Calcul de coûts d'exploitation de la noue Sainte-Anne	VII
Annexe 4 : Opérations d'entretien et coûts unitaires pour la noue de l'Ain.....	VIII
Annexe 5 : Recensement des opérations d'entretiens des SfN.....	IX

Annexe 1: Liste des 39 références sélectionnés pour l'étude

No	Auteur	Année	Titre	Publication	SfN concernées
1	Ahammed	2017	A review of water-sensitive urban design technologies and practices for sustainable stormwater management	Sustainable Water Resources Management	wetlands; Bioretention system; Permeable pavement; swales; infiltration trenches; rainwater harvesting
2	Bertrand-Krajewski et al.	2016	Comparaison de différentes solutions de gestion des eaux pluviales dans un projet d'aménagement	TSM. Techniques Sciences Méthodes	bassin d'infiltration, toiture végétalisée
3	Caltran et al.	2023	Retour d'expérience sur les arbres de pluie à Lyon, une stratégie efficace de gestion des eaux pluviales pour la ville existante	Novatech 2023	arbre de pluie
4	Cerema	2020	Gestion intégrée de l'eau en milieu urbain - Fiche n°2 - Évaluation des services écosystémiques rendus par différentes techniques alternatives végétalisées	Cerema	bassins secs; ile végétalisé; toiture; noue; fossé; bassin en eau
5	Chen et Gaspari	2023	Exploring an Integrated System for Urban Stormwater Management: A Systematic Literature Review of Solutions at Building and District Scales	MDPI SUSTAINABILITY	rain gardens; green roof ; Bioretention system; Permeable pavement; infiltration basins; retention ponds
6	Chocat et Cherqui	2018	Proposition d'une typologie systématique des techniques alternatives de gestion des eaux pluviales	Techniques Sciences Méthodes	bassins secs; toiture végétalisée; noue; fossé; bassin en eau ; tranchée d'infiltration
7	Dugue	2010	Conception d'un jardin de pluie: theorie et etude de cas	UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL	jardin de pluie
8	Esraz-UI-Zannat et al.	2024	A review of nature-based infrastructures and their effectiveness for urban flood risk mitigation	WILEY INTERDISCIPLINARY REVIEWS-CLIMATE CHANGE	green walls; rain gardens; green roof; constructed wetland; permeable pavement; swales;

					infiltration trenches; infiltration basins; retention ponds; detention ponds
9	Flanagan et al.	2022	Guide méthodologique pour l'évaluation de performances des ouvrages de maîtrise à la source des eaux pluviales	OFB	bassins secs; toiture; noue; fossé; bassin en eau; bassin de retention; jardin de pluie
10	Geheniau	2014	Evaluation experimentale de la performance d'un jardin de pluie et d'un toit vert en climat froid	École Polytechnique de Montréal	jardin de pluie; toitures végétalisées
11	Giroud et al.	2013	Gestion des eaux pluviales, usages et zone humide urbaine - parc Ouagadougou de Grenoble	Novatech 2013	zone humide
12	Guillon et al.	2008	Les ouvrages de gestion des eaux pluviales à la parcelle en France: État des lieux en termes de contrôle et d'entretien	Techniques Sciences Méthodes	bassins secs; noue; fossé; bassin en eau; bassin de retention; chaussée drainante
13	Handayani et al.	2018	Re-design of Tegalega Park in Bandung for flood evacuation park	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	flood park
14	Huang et al.	2020	Nature-based solutions for urban pluvial flood risk management	WIREs Water	green roof; Permeable pavement; infiltration trenches; bioswales
15	Kaykhosravi et al.	2018	A Comprehensive Review of Low Impact Development Models for Research, Conceptual, Preliminary and Detailed Design Applications	MDPI WATER	green roof; Permeable pavement; bioretention cells; porous pavements; swales; infiltration trenches; infiltration basins
16	Knapik	2022	An analysis of the understanding of maintenance of nature-based solutions for urban stormwater management	KTH Royal Institute of Technology	wetlands; green roof; Permeable pavement; infiltration basins; detention ponds; rainwater harvesting; bioswales
17	Kõiv-Vainik et al.	2022	Urban stormwater retention capacity of nature-based solutions at different climatic conditions	Nature-Based Solutions	green roof; bioretention system; constructed wetland; Permeable pavement; Vegetated swale

18	Lin et al.	2018	Evaluating the Effectiveness of Green Roads for Runoff Control	Journal of Sustainable Water in the Built Environment	green roof
19	Mulligan et al.	2020	Hybrid infrastructures, hybrid governance: New evidence from Nairobi (Kenya) on green-blue-grey infrastructure in informal settlements	Anthropocene	rain gardens; constructed wetland; porous pavements; swales; infiltration trenches; rainwater harvesting
20	Novak et al.	2023	Optimization of a Tree Pit as a Blue–Green Infrastructure Object	MDPI Sustainability	tree pit
21	Oral et al.	2020	A review of nature-based solutions for urban water management in European circular cities: a critical assessment based on case studies and literature	BLUE-GREEN SYSTEMS	constructed wetlands; green roof; rainwater harvesting
22	Palermo et al.	2023	Nature-based solutions for urban stormwater management: an overview	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	green walls; rain gardens; green roof; Permeable pavement
23	Prodanovic et al.	2022	Zero additional maintenance stormwater biofilters: from laboratory testing to field implementation	BLUE-GREEN SYSTEMS	rain gardens
24	Qi et al.	2020	Addressing Challenges of Urban Water Management in Chinese Sponge Cities via Nature-Based Solutions	MDPI WATER	rain gardens; constructed wetlands; green roof; Bioretention system; bioswales; flood parks
25	Qiu et al.	2021	Assessing cost-effectiveness of nature-based solutions scenarios: Integrating hydrological impacts and life cycle costs	JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	rain gardens; green roof; bioretention system; porous pavements
26	Rey et al.	2023	Les solutions fondées sur la nature : quelles recherches pour répondre aux défis de la gestion de l'eau ?	Techniques Sciences Méthodes	ile végétalisé; noue; jardin de pluie
27	Scher et al.	2004	Highway Stormwater Detention Ponds as Biodiversity Islands?	Archives des Sciences	detention ponds

28	Siering, et al.	2023	Stormwater Tree Pits for Decentralized Retention of Heavy Rainfall	MDPI Water	tree pit
29	Sood et Biswas	2022	Introducing Greenswales: a Nature-based Approach to Preserve Seasonal Channels - Learnings from Chandigarh, India	GEOGRAPHICA PANNONICA	greenswales
30	Sun et al.	2024	Mechanisms and Applications of Nature-Based Solutions for Stormwater Control in the Context of Climate Change: A Review	ATMOSPHERE	green roof; bioretention system; constructed wetland; permeable pavement
31	Tsatsou et al.	2023	Nature-based solutions for circular urban water systems: A scoping literature review and a proposal for urban design and planning	JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION	green walls; rain gardens; green roof; constructed wetland; permeable pavement; bioswales; tree pit
32	Udomcharoenchaikit	2016	Nature-based solutions for urban stormwater management: Experiences in Malmö and Copenhagen	Lund University	rain gardens; wetlands; green roof; bioswales
33	Valdelfener et al.	2019	Do Sustainable Drainage Systems favour mosquito proliferation in cities compared to stormwater networks?	Urban Water Journal	green roof; swales; infiltration basins; retention ponds; detention ponds
34	Vojinovic et al.	2021	Effectiveness of small- and large-scale Nature-Based Solutions for flood mitigation: The case of Ayutthaya, Thailand	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT	rain gardens; green roof ; bioretention system; permeable pavement; swales; detention ponds; rainwater harvesting; tree pit
35	Webber et al.	2022	Moving to a future of smart stormwater management: A review and framework for terminology, research, and future perspectives	Water Research	rainwater harvesting ; detention pond ; retention basin
36	Williams et al.	2019	Residents' perceptions of sustainable drainage systems as highly functional blue green infrastructure	Landscape and Urban Planning	rain gardens ; green roofs ; tree pits ; permeable pavement ; detention ponds ; swales

37	Wolff et al.	2023	Nature-based solutions in informal settlements: A systematic review of projects in Southeast Asian and Pacific countries	Environmental Science & Policy	rain gardens; constructed wetland; infiltration trenches
38	Zalaznik et al.	2023	Nature-based Solutions for Integrated Local Water Management	KEMIJA U INDUSTRIJI- JOURNAL OF CHEMISTS AND CHEMICAL ENGINEERS	rain gardens; constructed wetland; rain garden
39	Zhou	2014	A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts	MDPI Water	green roof; Permeable pavement; swales; infiltration trenches; detention ponds; rainwater harvesting

Annexe 2: Trame de calcul des coûts d'entretien

	Unité	Q	CU	CT
Charges directes				
Matériel utilisé	heures			- €
Engin motorisés	heures			- €
Frais de personnel (préparation, tâches et transport)	heures			- €
...				- €
Total CD				- €
Charges indirectes				
Frais d'assurance	€			- €
Dotation d'Amortissements	€			- €
Frais de publicité (campagne de signalisation)	€			- €
Carburant	€			- €
Frais d'administration				
Frais d'encadrement	€			- €
Frais de structure (EUROMÉTROPOLE DE STRASBOURG)	€			- €
...				- €
Total CI				- €
Coût complet partiel= CD + CI				- €
Coût d'élimination des déchets/rebuts				
Engins motorisés	heures			- €
Recyclage	tonnage			- €
Total Coût élimination déchets				- €
Coût complet de l'ouvrage sans Charges de Structure (CS)				- €
Coût complet de l'ouvrage avec CS				- €
volume d'eau gérée m ³ ou surface de l'ouvrage m ²				
Coût de l'entretien de l'ouvrage /m ³ eau gérée ou par m ² d'ouvrage sans CS				- €
Coût de l'entretien de l'ouvrage /m³ eau gérée ou par m² d'ouvrage avec CS				- €

Tableau 3: Trame de calcul des coûts d'entretien

Source : Bahy, 2017

Cette trame de calcul a été utilisée pour estimer les coûts d'exploitations de plusieurs SfN sur l'EMS et le Grand Lyon, y compris la noue Sainte-Anne. Pour le calcul des charges directes, les opérations d'entretiens y sont décomposées en trois fonctions : main d'œuvre, matériel, et engins. Pour les charges indirectes, une clé de répartition issu de l'exercice comptable de chaque service concerné est affectée aux frais généraux. Un coefficient est également affecté aux coûts pour la prise en compte des frais

Annexe 3 : Calcul de coûts d'exploitation de la noue Sainte-Anne

Coûts d'entretien (exploitation) annuels		Compétences						
STE ANNE		Assainissement				Espaces Verts		
		Régie				Ville de Strasbourg		
Charges directes								
	Unité	Q	CU/h Grilles tarif 2019	CU/h marché entretien(sous traitance espaces verts)	CT=CD	Q	CU/h données 2019	CT=CD
porte engin type reform ou unimog (grille tarifaire EMS)								
gyrobroyage	m2					3000	0,24 €	720,00 €
debroussaillages manuels	heures					8	62,40 €	432,00 €
taille	heures					20	54,00 €	1 080,00 €
nettoyage (dechets épars)	m2					3000	0,72 €	2 160,00 €
Engin motorisé léger type piaggio	heures					12	2,72 €	32,64 €
curage de la buse/hydrocureuse	Q=1h	0,33	165,00 €		55,00 €			
curage de la buse/hydrocureuse 1/2 supplémentaires	Q=1/2h	0	84,00 €		0,00 €			
curage des grilles puisard /siphon de rue ou dessableur hydrocureuse 1/2 supplémentaires	Q=1/2h	2	84,00 €		168,00 €			
Engin motorisé léger type piaggio			inclus					
Frais de personnel (préparation, tâches et transport)cat C (grille salaire EMS)	heures	2,67	inclus			36	22,34 €	804,21 €
Total CD					223,00 €			5 228,85 €
Charges indirectes								
	Unité	total annuel (CA)	clé de répartition		CI	charges indirectes (EV dansbudget general) non calculées		
Frais d'assurance(6161)	€	45000	1,266E-05		0,57 €			
Dotations d'Amortissements (2815,2818)	€	7140000	1,266E-05		90,43 €			
Frais de publicité (campagne de signalisation)	€	0	1,266E-05		0,00 €			
Carburant (6062)	€	22200	1,266E-05		0,28 €			
Somme des entretiens (61521,61523,61528,61551,6156)	€	705000	1,266E-05		8,93 €			
Fournitures (6063,6064,6068)	€	245000	1,266E-05		3,10 €			
Coût complet partie: CD + CI					103,31 €			5 555,16 €
Coût d'élimination des déchets/rebuts								
	Unité	Q	CU/h Grilles tarif 2019		CT=CD	Q	CU/h données 2019	CT=CD
Engins motorisés	heures	1,00	5,71 €		5,71 €	1,00	5,71 €	5,71 €
evacuation dechets verts	tonnes					1,5	45,00 €	67,50 €
traitement boues curage	tonnes	0,23	78,00 €		18,20 €			73,21 €
					23,91 €			73,21 €
Coût complet de l'ouvrage sans CS								5 652,28 €
Coût complet de l'ouvrage avec CS								6 277,42 €
surface de l'ouvrage m²	3000	3 000 m2 noues						
Coût de l'entretien de l'ouvrage /m² sans CS	1,88 €							
Coût de l'entretien de l'ouvrage /m² avec CS	2,09 €							

Source : Werey, 2021

En se basant sur la trame de (Bahy, 2017), Werey à effectuer le calcul du coût d'exploitation de la noue Sainte-Anne en séparant les activités entre les deux gestionnaires de la SfN (assainissement et espaces verts). Les opérations d'entretien ont été recensé par entretien directe avec ces gestionnaires ainsi que les prix unitaires de main d'œuvre et de matériel.

Tableau 7: Analyse de coûts d'entretien de la noue St-Anne (C. Werey, 2019) – régie Assainissement (Eurométropole de Strasbourg) et Espace Vert (Ville de Strasbourg)

Nom du matériel utilisé	Service concerné	Nombre d'employés	frequence	cat.employés	Temps passé
espaces verts					
gyrobroyage	EV ville de Strasbourg/EMS	2	2/an	C	2h*2/an par agent=8
debroussaillage manuel	EV ville de Strasbourg/EMS	2	2/an	C	2h*2/an par agent=8
taille	EV ville de Strasbourg/EMS	2	1/an	C	10h*1/an par agent=20
Engin motorisé léger type piaggio transport agents	EV ville de Strasbourg/EMS				2*2+2*2+2*1*2=12h
Assainissement					
hydrocureuse curage buses	assainissement Eurométropole	2	1/3an	C	2*1h/3=0,67h
hydrocureuse curages puisarts	assainissement Eurométropole	2	1/an	C	2*1h=2h

Annexe 4 : Opérations d'entretien et coûts unitaires pour la noue de l'Ain

Entretien (€HT/an)		
Collecte et transport		
Curage collecteurs (2%/an) Tarifs pour taux d'encrassement <30%	€/mL	2,5
Nettoyage annuel des grilles avaloir	€/grille	5
Infiltration et espaces verts		
Entretien courant noues enherbées ou espace vert (6 passages/an d'une équipe de 2 personnes. Durée de chaque passage : 0 pour S1 ; 1jr pour S1bis et S2 ; 0,5 jr pour S3)	€/jr/équipe	1000
Entretien propreté manuel (mécanisé non compté car identique pour tous les scénarios) 2h/équipe/mois = 3,4 jrs/an	€/jr/équipe	1000
Visite de contrôle de la noue (0,25 jr/équipe/an)	€/jr/équipe	1000
Réfection partielle noues suite à accidents (1%/an)	€/m ²	70

Source : Graie, 2018

D'après le projet d'aménagement de la noue, elle requière l'intervention régulière d'une équipe de 2 personnes pour la tonte (estimée à 6 jours/an) et le ramassage manuel des déchets (estimé à 2h/mois).

Cependant, en recalculant le coût d'exploitation de la noue avec les informations fournies, on obtient 9 335 € or le document mentionne le coût d'exploitation comme étant 9 952 €. Dans ce document, nous avons considéré les résultats obtenus en recalculant.

Annexe 5 : Recensement des opérations d'entretiens des SfN

Tâche d'exploitation	Fonction	Fréquence	Source
Noe			
Curage du fond de l'ouvrage et des orifices de vidange	Curage	tout les 10 ans ; après fortes pluies	(Pays-de-la-Loire, 2012) ; (SYMASOL, 2016)
Tonte ou taille des végétaux	Tonte, taille	1 à 2 fois par an	(Pays-de-la-Loire, 2012) ; (SYMASOL, 2016)
Inspection des rives pour érosion, des exutoires d'eau pour colmatage	Surveillance/inspection	1 à 2 fois par an	Ville éponge ; Minnesota SM ; US EPA
Ramassage des déchets, débris et résidus de végétaux	Gestion des déchets	1 à 3 fois par mois	(Pays-de-la-Loire, 2012) ; (Grand Lyon, 2022) ; (SYMASOL, 2016) ; (MDDEFP, 2020)
Nettoyage des exutoires d'eau (avaloirs)	Nettoyage hydraulique	1 fois par an	US EPA ; Minnesota SM
Désherbage et faucardage	Nettoyage espace verts	1 fois par mois	Ville éponge ; US EPA
Jardin de pluie			
Ramassage des déchets et de résidus de végétaux	Gestion des déchets	1 fois par mois	US EPA ; (Cerema, 2016)
Taille des végétaux	Taille	1 à 2 fois par an	US EPA ; (Cerema, 2016)
Désherbage	Nettoyage espace verts	2 à 2 fois par an	US EPA ; (Cerema, 2016)
Arrosage saisonnier	Arrosage	Si nécessaire	US EPA ; (Cerema, 2016)
Inspection de la couche de terre végétale, des exutoires d'eau	Surveillance/inspection	1 fois par mois (saison pluvieuse)	US EPA ; (Cerema, 2016)
Tonte	Tonte	1 fois par mois	US EPA ; (Cerema, 2016)

Bassin sec			
Ramassage des déchets et de résidus de végétaux	Gestion des déchets	1 à 2 fois par an	US EPA ; (MDDEFP, 2020)
Faucardage ou tonte	Nettoyage, Tonte	2 fois par an	Ville éponge
Inspection et nettoyage des exutoires d'eau	Surveillance, Nettoyage	1 fois par an	US EPA
Curage du bassin	Curage	Tout les 5 à 10 ans	Ville éponge ; (SYMASOL, 2016)
Remplacer la terre colmatée	Curage	Après fortes pluies	Ville éponge
Bassin en eau			
Ramassage des déchets et de résidus de végétaux	Gestion des déchets	1 à 3 fois par mois	Minnesota SM ; (SYMASOL, 2016) ; Ville éponge
Détection de plantes invasives, prolifération de moustiques , croissance d'algues	Surveillance/inspection	1 à 2 fois par an	US EPA ; Ville éponge
Suivi de la qualité et le niveau de l'eau	Surveillance/inspection	Saisonniers	(MDDEFP, 2020) ; Ville éponge ; (SYMASOL, 2016)
Inspection des exutoires d'eau, des vannes de sortie, tuyaux	Surveillance, nettoyage	1 fois par trimestre	US EPA ; (MDDEFP, 2020)
Surveillance de la santé des végétaux	Surveillance/inspection	1 à 2 fois par an	Minnesota SM; (SYMASOL, 2016)
Inspection du dépôt de sédiment et enlèvement	Curage	Tout les 1-3 ans	US EPA
Désherbage et faucardage	Nettoyage espace verts	1 à 2 fois par an	Ville éponge; (MDDEFP, 2020)
Zone humide artificielle			
Ramassage des déchets et de résidus de végétaux	Gestion des déchets	1 à 3 fois par mois	US EPA; Minnesota SM
Détection de plantes invasives, prolifération de moustiques , croissance d'algues	Surveillance/inspection	1 à 2 fois par an	US EPA ; Ville éponge ; (MDDEFP, 2020)
Faucardage	Nettoyage espace verts	3 à 4 fois par an	US EPA ; Ville éponge
Inspection des digues, des conduites et des pompes	Surveillance/inspection	1 fois par an	US EPA ; Ville éponge ; Minnesota SM

Surveillance de la santé des végétaux	Surveillance/inspection	Chaque trimestre	Minnesota SM
Inspection de la qualité et le niveau de l'eau	Surveillance/inspection	Chaque trimestre	Ville éponge ; (MDDEFP, 2020) ; Minnesota SM
Contrôle du niveau de dépôt de sédiments et enlèvement	Surveillance/inspection	Tout les 2 à 7 ans	Minnesota SM
Arbre de pluie			
Ramassage des déchets et de résidus de végétaux	Gestion des déchets	3 fois par mois	Minnesota SM ; (Grand Lyon, 2022)
Inspection de l'arrivée d'eau dans la tranchée	Surveillance/inspection	2 fois par an	Minnesota SM ; (Grand Lyon, 2022)
Taille des strates inférieures	Taille	1 fois par mois; saisons pluvieuse	Minnesota SM ; (Grand Lyon, 2022)
Vérifier qu'il n'y a pas de stagnation de l'eau ou de colmatage de la tranchée	Surveillance/inspection	1 à 2 fois par an	Minnesota SM ; (Grand Lyon, 2022)
Arrosage saisonnier	Arrosage	Si nécessaire	Minnesota SM ; (Grand Lyon, 2022)
Bassin d'infiltration			
Suivi de la perméabilité	Surveillance/inspection	1 fois par an	(SYMASOL, 2016)
Curage du bassin et renouvellement de la couche superficielle	Curage	Tout les 5 ans	US EPA
Enlèvement des sédiments et débris	Nettoyage espace verts	saisonniers	(MDDEFP, 2020)
Tailler et désherber	Taille	1 fois par mois	Minnesota SM
Inspection des exutoires d'eau pour colmatage	Surveillance/inspection	2 fois par an	Minnesota SM ; US EPA
Surveillance de la santé des végétaux	Surveillance/inspection	2 fois par an	Minnesota SM
Parc inondable			
Exploitation de l'espace inondable similaire à celui d'un bassin d'infiltration ou un bassin sec			