

# Vers une modélisation de l'évolution des performances des solutions fondées sur la nature dédiées aux eaux pluviales

E. Girot<sup>1,2</sup>, M. Génissel<sup>2</sup>, F. Cherqui<sup>1,3</sup>, C. Curt<sup>2</sup>, F. Taillandier<sup>2</sup>, P. Di Maiolo<sup>2</sup>, S. Vanpeene<sup>2</sup>, C. Wittner<sup>4</sup>

<sup>1</sup> INSA Lyon, DEEP, UR7429, 69621 Villeurbanne, France

<sup>2</sup> RECOVER (INRAE, Aix Marseille Université) 3275 Route de Cézanne CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France

<sup>3</sup> School of Agriculture, Food and Ecosystem Sciences, The University of Melbourne, Burnley, VIC 3121, Australia

<sup>4</sup> UMR SAGE, INRAE, 1 cour des Cigarières, CS 61039, 67070 Strasbourg, France

**RESUME** Au cours des dernières décennies, les solutions fondées sur la nature (SFN) dédiées aux eaux pluviales se sont imposées comme des alternatives crédibles aux stratégies « grises » classiques. Leurs performances et maintenance à moyen et long terme deviennent une préoccupation croissante à mesure que les premières solutions installées atteignent la fin de leur durée de vie. En outre, en raison de leur composition hybride mêlant éléments végétalisés et construits, la gestion de ces solutions implique de multiples acteurs, avec des compétences variées, issus de différents services aux cultures et pratiques différentes. Ceci induit des difficultés à collaborer et limite ainsi l'efficacité de ces solutions. Afin de déterminer les obstacles à une gestion patrimoniale de ces solutions, une enquête et 12 interviews semi-directives de gestionnaires publics en France métropolitaine ont été menées. De plus, une enquête auprès de 71 usagers de deux SFN dédiées aux eaux pluviales du Grand Lyon a mis en avant la perception des pratiques d'entretien par les usagers. Les données recueillies permettront d'alimenter un modèle multi-agents simulant l'impact des pratiques d'entretien sur les performances des SFN dédiées aux eaux pluviales. L'objectif est de contribuer à l'élaboration d'une vision stratégique de la gestion patrimoniale des SFN dédiées aux eaux pluviales. Les premiers résultats concernant le modèle sont présentés ici.

**Mots-clés** modélisation multi-agents, enquête, maintenance, gestion patrimoniale

## I. INTRODUCTION

Les solutions fondées sur la nature dédiées à la gestion des eaux pluviales (SFN GEP) font partie d'un changement de paradigme fort à l'échelle de la ville, visant à réduire les inondations tout en préservant l'environnement et les ressources en eau. Selon Raymond et al. [2017], « les solutions fondées sur la nature sont des solutions aux défis sociétaux qui sont inspirées et soutenues par la nature ». En ce qui concerne les eaux pluviales urbaines, « les SFN peuvent contribuer à la gestion durable des eaux urbaines en augmentant l'infiltration, en améliorant l'évapotranspiration, en

fournissant des zones de stockage pour les eaux de pluie et en éliminant les polluants » (Raymond et al., 2017). Ces solutions impliquent à la fois des composants construits dits gris tels que des arrivées d'eau, des canalisations et des composants végétalisés dits verts tels que des plantes, des arbustes et arbres.

Depuis l'émergence des SFN GEP il y a une trentaine d'années, les questions opérationnelles et de recherche se sont largement concentrées sur l'optimisation des performances hydrauliques et de qualité de l'eau. Après plusieurs décennies de fonctionnement, il y a cependant une préoccupation croissante concernant leurs performance et maintenance à moyen et long terme. Cette préoccupation opérationnelle est confirmée par des études récentes (Al-Rubaei, 2016; Cherqui et al., 2019; Cossais et al., 2017). Comme tout ouvrage, ces solutions doivent être gérées tout au long de leur durée de vie, de manière à minimiser leurs coûts d'exploitation et de maintenance, tout en fournissant le niveau de service requis. Cette gestion appelée patrimoniale implique des stratégies d'investissement sur le cycle de vie et la planification de travaux (Mohseni, 2003). Les pratiques actuelles de gestion patrimoniale des SFN GEP reposent principalement sur des méthodes de maintenance réactives, qui traitent les défaillances après leur survenue. Elles offrent des recommandations générales sur l'inspection et la maintenance, mais elles manquent d'efficacité et de modèles nécessaires pour guider les gestionnaires en fonction du contexte socio-écologique et des conditions climatiques locales.

Pour saisir pleinement le système complexe dans lequel les SFN GEP interviennent (Nesshöver et al., 2017), nous avons choisi d'explorer la modélisation multi-agents. La gestion patrimoniale est un processus sociotechnique, où l'interaction entre les systèmes sociaux et techniques a un impact direct sur l'évolution de la SFN GEP à long terme (Bush et al., 2014). Les modèles multi-agents offrent une approche globale à la modélisation de systèmes complexes dont les résultats ne peuvent être prédits par la simple somme des comportements individuels de leurs composants, en raison des nombreuses interactions et boucles de rétroaction internes au système et à son environnement proche, en particulier lorsqu'il s'agit d'un écosystème naturel ou semi-naturel (Dawson et al., 2011). En outre, la modélisation multi-agents excelle dans la simulation des actions et des interactions entre agents afin d'évaluer leur impact collectif sur le système. En ce sens, elle est un outil approprié pour explorer les interactions entre les différents composants des SFN GEP et les parties prenantes impliquées dans leur gestion afin d'évaluer l'impact des différentes stratégies mises en œuvre. De plus, en modélisant ces solutions et leurs gestionnaires dans le même environnement, ces derniers peuvent se saisir des répercussions futures potentielles de leurs stratégies (Bush et al., 2014). Bien que la modélisation multi-agents ait été utilisée avec succès pour la gestion d'infrastructures critiques telles que les routes (Osman, 2012) et les réseaux d'approvisionnement en eau (Davis, 2000), elle n'a pas encore été appliquée à la gestion patrimoniale des SFN GEP. Un frein à l'implémentation des modèles multi-agents est le manque de données existantes. Pour construire un tel modèle, il est nécessaire de pouvoir collecter des données, notamment auprès des parties prenantes impliquées.

Cet article présente les fondements d'un modèle multi-agents appliqué à la gestion patrimoniale des SFN GEP. Trois méthodes complémentaires - visant à recueillir, auprès de parties prenantes impliquées dans leur gestion, les données nécessaires à l'implémentation du modèle - sont introduites : un sondage en ligne, des entretiens semi-directifs à l'attention de

gestionnaires et une enquête directive auprès d'usagers fréquentant ces espaces végétalisés dédiés à la gestion des eaux pluviales.

## II. MODELE MULTI-AGENTS

Un modèle multi-agents est défini par trois composantes : un ensemble d'agents, un ensemble de relations entre les agents et des méthodes d'interaction (comment et avec qui les agents interagissent), et un environnement (Macal & North, 2010). Chaque agent est spécifié par ses attributs, ses comportements et ses actions. Un agent peut représenter une entité vivante ou non, physique ou abstraite. Un modèle multi-agents est simulé sur une durée choisie divisée en série d'unités de temps discrètes (pas de temps), pendant lesquelles les agents évaluent, de manière répétée, des règles de comportement, les exécutent et mettent à jour leurs caractéristiques individuelles (attributs) (Berglund, 2015).

Le système que nous souhaitons modéliser comprend une SFN GEP composée de multiples éléments ainsi que plusieurs services (par exemple, le service des espaces verts, celui de l'assainissement) responsables de sa gestion et son entretien. Pour simuler la détérioration de la solution au fil du temps, les éléments qui la composent sont susceptibles de subir ou une plusieurs défaillances. En outre, des pratiques d'entretien sont effectuées périodiquement selon la stratégie de maintenance des services impliqués. Les défaillances et les pratiques d'entretien impactent, respectivement de manière négative et positive, la performance des éléments et, par conséquent, la performance globale de la SFN GEP. Nous souhaitons évaluer des performances telles que la protection contre les inondations, la préservation des écosystèmes, l'adaptation au changement climatique, l'amélioration de la santé et du bien-être humain.

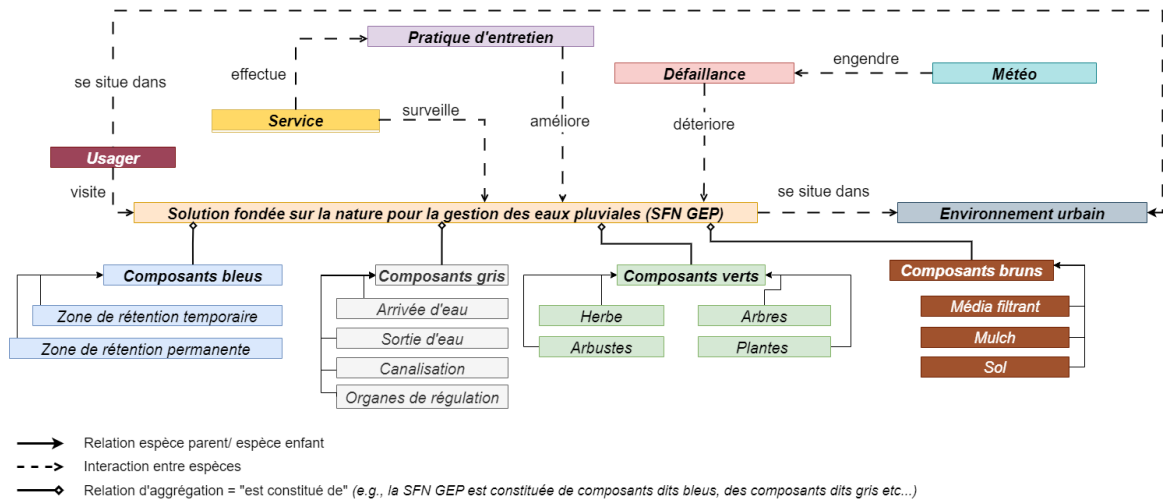
L'étape principale pour créer le modèle conceptuel multi-agents consiste à définir les agents impliqués et leurs interactions. Sept catégories d'agents ont été définies pour modéliser notre système (Tableau 1).

**TABLEAU 1.** Définition des sept catégories d'agents

Catégorie d'agents	Exemple d'agents	Description et interaction avec les autres catégories d'agents
<b>Service</b>	Service Assainissement; Service Espaces verts; etc.	Est responsable de la mise en œuvre des agents de la catégorie <i>Pratique d'entretien</i>
<b>Pratique d'entretien</b>	Ramassage des déchets; Fauche tardive; etc.	Impacte positivement un ou plusieurs agents de la catégorie <i>Composant de la SFN GEP</i> .
<b>Défaillance</b>	Accumulation de déchets; Accumulation de sédiments; etc.	Impacte négativement un ou plusieurs agents de la catégorie <i>Composant de la SFN GEP</i> .
<b>Composant de la SFN GEP</b>	Arrivée d'eau; Arbre; Média filtrant; etc.	Est défini par au moins un attribut qui sera impacté par les agents des catégories <i>Pratique d'entretien</i> et <i>Défaillance</i>
<b>Usager</b>	Habitant du quartier; Passant; etc.	Bénéficie des bienfaits ou subit les nuisances liées à la SFN GEP

<b>Météo</b>	Météo	Engendre des défaillances (par exemple, en cas de fortes intempéries ou fortes chaleurs) et donc active des agents de la catégorie <i>Défaillance</i>
<b>Environnement urbain</b>	Bassin versant de la SFN GEP	Définit les agents de la catégorie <i>Usager</i>

La figure 1 illustre les interactions entre les différentes catégories d'agents.



**FIGURE 1.** Modèle conceptuel multi-agents

Chaque agent des catégories *Pratique d'entretien* et *Défaillance* peut avoir une incidence sur un ou plusieurs attributs d'un ou plusieurs composants de la SFN GEP. Les attributs définissent l'état de l'agent à tout instant. Les attributs d'un agent peuvent être statiques, c'est-à-dire non modifiables au cours de la simulation (par exemple, le nom de l'agent) ou dynamiques. Dans le cas de notre modèle, les attributs dynamiques liés à chaque composant de la SFN GEP ont été identifiés pour décrire l'état des performances du composant afin d'évaluer les performances globales de la SFN GEP au fil du temps. Ils se basent sur la littérature, les enquêtes auprès des gestionnaires et seront validés par des groupes d'experts.

La figure 2 met en lumière les liens entre les trois méthodes de collecte de données et le modèle multi-agents. Les données collectées sont essentielles pour définir les agents du système et leurs interactions.

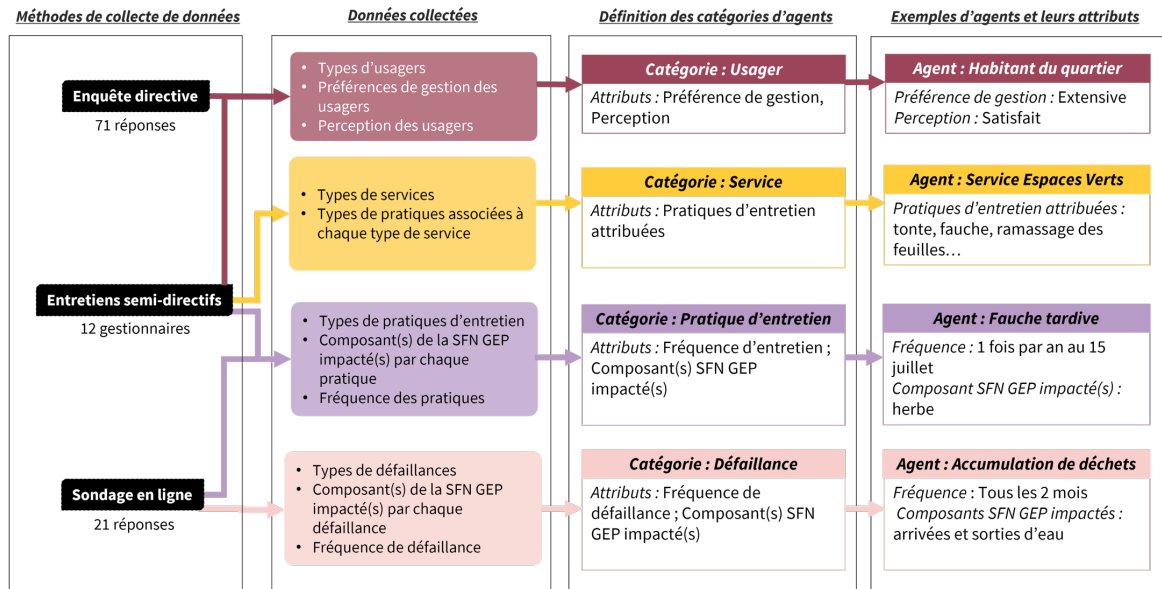


FIGURE 2. Liens entre les méthodes de collecte des données et les agents du modèle

Les agents des catégories *Défaillance* et *Pratique d'entretien* ainsi que les fréquences auxquelles ces agents seront appelés au cours de la simulation sont extraits de réponses issues de sondages en ligne. Les différents types d'agents de la catégorie *Service* sont issus d'entretiens semi-directifs. Enfin, une enquête directive auprès des usagers de deux parcs accueillant des SFN permet de définir des agents pertinents pour la catégorie *Usager* ainsi que leurs préférences de gestion et perception de la SFN GEP.

### III. SONDAGE EN LIGNE

Une première enquête en ligne a été menée auprès des gestionnaires français de solutions de gestion des eaux pluviales. Ce questionnaire avait pour objectif d'obtenir des retours opérationnels sur l'entretien de ces solutions. Il interroge les gestionnaires des eaux pluviales sur les pratiques d'entretien de leurs solutions grises et végétalisées, l'intérêt de ces pratiques et les difficultés rencontrées. Le sondage a été distribué du 21 mars au 10 mai 2024 en France métropolitaine, via divers réseaux de contacts afin d'assurer une diffusion la plus large possible. Parmi eux, on retrouve des associations spécialisées sur la thématique de l'eau comme le Graie, l'Association pour le Développement Opérationnel et la Promotion des Techniques Alternatives (Adopta) et l'Association française des professionnels de l'eau et des déchets (ASTEE). D'autres réseaux comme l'association Plante & Cité, l'Office français de la Biodiversité (OFB) et les agences régionales de biodiversité ont également été sollicités.

L'enquête française a enregistré un faible taux de réponse (21 réponses sur 357 connexions individuelles en ligne, soit 6 %) et des réponses très souvent incomplètes nous empêchant d'identifier clairement des tendances. De plus, ne connaissant pas le nombre total de gestionnaires pouvant prétendre répondre au sondage, nous n'avons pas de garantie de représentativité. La grande majorité (90 %) des personnes interrogées font partie de services

publics, qui sont les principales organisations françaises travaillant sur les SFN GEP. Nous supposons que le manque de réponses complètes peut s'expliquer par la dispersion de la gestion des SFN GEP à travers différents services (par exemple, le service assainissement, le service des espaces verts, le service de la voirie) au sein même d'une institution publique. Il est difficile de trouver un gestionnaire qui ait une compréhension globale de la maintenance des solutions. En effet, le manque de communication entre les différents services responsables de la maintenance des SFN GEP a été identifié comme l'une des principales causes de défaillance des SFN GEP.

Cependant, le sondage en ligne a permis de recueillir des données sur :

- Les types de SFN GEP les plus courantes sur le territoire français. Les plus citées sont les bassins, les noues et les toitures végétalisées.
- Les pratiques d'entretien les plus réalisées. Elles regroupent le curage, le nettoyage des arrivées et sorties d'eau (e.g., grilles d'eaux pluviales, avaloirs, dégrilleurs et exutoires), l'entretien des végétaux (e.g., tonte, fauchage, faucardage et débroussaillage) et les pratiques de contrôle visuel et de surveillance.
- La fréquence des pratiques d'entretien. Elle varie entre moins d'une fois par an à plus de quatre fois par an selon les pratiques mentionnées dans le point précédent. Cependant, cette fréquence varie pour un même type de pratique. Cette hétérogénéité au sein d'une même pratique peut être expliquée par l'hétérogénéité des SFN GEP et de leur végétalisation. Toutefois, cette question a été particulièrement peu abordée (moins de 25% des enquêtés y ont répondu) et laisse donc penser que la planification des opérations d'entretien selon une fréquence établie est peu commune.
- Les défaillances les plus répandues. Elles concernent l'accumulation et le colmatage des solutions par les sédiments, l'insuffisance du volume de stockage, la capacité limitée à l'entrée de l'ouvrage, la saturation des pièges à hydrocarbures et la défaillance des régulateurs de débit.
- Les principales causes de défaillances. On retrouve le manque de communication entre les différents services, ainsi que le besoin d'amélioration de l'efficacité des activités d'entretien et le manque de formation du personnel. Ces trois causes sont indirectes et liées à des problèmes organisationnels et techniques. En revanche, des causes directes telles que l'incivilité et la dégradation par la faune et/ou la flore ne sont pas considérées comme causes fréquentes de dysfonctionnements.

Ces résultats ont ainsi permis d'alimenter les types de pratiques et les types de défaillances du modèle multi-agents (Figure 2). L'enquête française a été mise à jour et traduite afin de la rendre internationale avec l'aide d'un groupe de chercheurs issus d'une dizaine d'universités dans le monde. Au moment de l'écriture, l'enquête est en cours.

#### IV. ENTRETIENS SEMI-DIRECTIFS

Afin de recueillir des retours d'expériences plus précis sur les pratiques d'entretien de la végétation ainsi que sur les enjeux de la gestion en lien avec la biodiversité, des entretiens semi-directifs ont été menés. Les profils ciblés pour les entretiens sont les gestionnaires publics ayant

précisé être responsables de la gestion de la végétation des SFN GEP dans l'enquête en ligne. Au total, l'enquête a été menée auprès de 12 gestionnaires sur la période de fin mai à début juillet 2024, répartis sur plusieurs collectivités.

Une grille d'entretien a été créée en amont afin de déterminer les thématiques à aborder durant l'entretien, privilégiant les relances face au discours de l'interviewé plutôt que des questionnements directs pouvant couper les dires. Le but de l'entretien semi-directif étant de recueillir au mieux les expériences de terrain de l'interrogé, en évitant d'influencer la parole (Pin, 2023). La grille d'entretien repose sur cinq grands thèmes à savoir : le contexte de gestion des eaux pluviales sur le territoire avec un focus sur les SFN, les pratiques de gestion pour la biodiversité appliquées sur le territoire (sur les SFN et les espaces verts autres), la communication sur les pratiques de gestion, les potentielles difficultés rencontrées dans la gestion de la végétation et les liens entretenus entre les acteurs impliqués de près ou de loin dans la gestion des SFN GEP.

Deux analyses ont été réalisées à la suite de ces entretiens. Une analyse thématique qui consiste à « identifier, analyser et rapporter des thèmes au sein des données. Cela implique la création de catégories thématiques à partir de données textuelles, ce qui permet de comprendre et d'interpréter les significations et les patterns présents dans le corpus » (Schreier, 2012). En complément, une enquête du réseau d'acteurs de la Métropole du Grand Lyon a été conduite à l'aide du logiciel d'interprétation visuelle Gephi afin d'identifier la complexité du réseau d'acteurs pouvant être impliqués dans la gestion des SFN GEP au sein d'un même territoire.

#### *A. Analyse thématique*

L'analyse thématique met en avant six grands thèmes (Génissel, 2024) : le type de SFN GEP présentes au sein des collectivités, les multiples services en charge de l'entretien, la perception des SFN GEP par les gestionnaires, les pratiques d'entretien réalisées, les difficultés rencontrées dans la répartition des tâches et le lien des gestionnaires avec les usagers.

Les noues et les bassins végétalisés sont les solutions les plus représentées au sein des collectivités. Cependant, les termes utilisés pour décrire ces ouvrages ne sont pas associés au concept de « SFN ». Ils sont plutôt reliés aux termes de Techniques Alternatives (TA) et de Gestion Intégrée des Eaux Pluviales (GIEP). Les SFN sont ainsi citées au même titre que les ouvrages bétons et/ou perméables de gestion intégrée tels que les tranchées d'infiltration et les bassins enterrés.

Les multiples services impliqués varient spatialement (d'un territoire à l'autre) et fonctionnellement (d'un ouvrage à l'autre).

Les ouvrages sont perçus positivement par les gestionnaires qui les considèrent comme des solutions durables qui facilitent la gestion. La perception diffère toutefois d'une compétence à l'autre. Les services assainissement et exploitation réseau considèrent les SFN GEP comme des ouvrages hydrauliques. D'un autre côté, les services espaces verts ou encore voirie considèrent les SFN au même titre qu'un espace vert classique, les jardiniers ne différencient pas les SFN GEP des autres espaces verts.

Les pratiques d'entretien sont hétérogènes et différentes selon le type de végétation et la fonction attribuée aux ouvrages. Les ouvrages gérés par les services assainissement étant perçus comme des ouvrages hydrauliques (souvent des bassins clôturés ou des noues), la végétation y est

libre et spontanée, laissant plus ou moins les strates végétales se développer. Les services espaces verts communaux, de leur côté, perçoivent et entretiennent les SFN GEP comme le reste des espaces verts. La végétation est souvent variée, les choix de plantations sont réfléchis et les pratiques d'entretien sont de plus en plus extensives.

La répartition des tâches entre les services est confrontée à un manque de clarté. Les gestionnaires signalent également des manques de communication entre les niveaux communal et intercommunal.

Les gestionnaires des différents territoires étudiés rapportent des retours similaires de la part des usagers concernant la perception des pratiques de gestion. Ces derniers sont souvent réticents face aux pratiques de fauche tardive, perçues comme un manque d'entretien plutôt qu'une démarche pour la biodiversité (mentionné dans six entretiens). Cependant, certains gestionnaires constatent un changement progressif des mentalités, avec une acceptation croissante des pratiques de gestion différenciée.

### *B. Représentation du réseau d'acteurs humains*

Afin d'étudier plus précisément le thème lié aux multiples acteurs en charge de la gestion SFN GEP, une représentation du réseau d'acteurs humains par spatialisation de Fruchterman Reingold (Figure 3) a été réalisée sur le territoire de la Métropole de Lyon.

Elle permet de visualiser au centre plusieurs services de la métropole, acteurs essentiels du réseau : la direction du cycle de l'eau, le service nature et fleuve, le service exploitation des réseaux d'assainissement, le service propreté et le service voirie. La distance entre les nœuds et leur disposition informent également sur les forces de connexions entre les acteurs. D'une part, les nœuds éloignés les uns des autres induisent une faible connexion directe. Nous observons par exemple que les jardiniers de la métropole sont à l'opposé des jardiniers de la commune de Villeurbanne. D'autre part, les traits épais traduisent des liens forts. C'est le cas des services reliés aux associations naturalistes (LPO, FNE, AELBO, Arthropologia) qui entretiennent un lien fort, en raison de l'implication des associations dans l'orientation des pratiques de gestion favorisant la biodiversité, à travers les relevés faune flore au sein des espaces végétalisés. La légende (%) associée aux classes de modularité représente la proportion de nœuds contenus dans chaque groupe. Au total 3 groupes sont identifiés. Le groupe vert rassemble la plus grande proportion d'acteurs : 44 % des nœuds du réseau appartiennent à cette communauté. Les principaux acteurs sont le service nature et fleuve, Grand Lyon Métropole, le groupe Ville perméable, le service voirie ou encore le service propreté. Ce groupe rassemble un ensemble de services techniques de la métropole de Lyon. Le groupe orange représentant 31 % de noeuds rassemble divers acteurs dont deux services techniques : le service exploitation réseaux et le service espaces verts de la commune de Villeurbanne.



**TABLEAU 2.** Caractéristiques des deux sites choisis pour l'enquête directive

Caractéristiques	Parc Jacob Kaplan	Parc Technologique de Porte des Alpes
<i>Surface</i>	0,5 ha	140 ha
<i>Végétalisation</i>	Une pelouse centrale entourée de quelques arbustes et arbres	80 ha d'espaces verts dont 30 ha de forêt
<i>Gestion de l'eau pluviale</i>	Une douve d'infiltration et de rétention ainsi qu'un bassin d'agrément	Un réseau de tranchées et de noues aboutissant à une succession de bassins (trois bassins de rétention en eau puis un bassin de décantation et un bassin d'infiltration)
<i>Public attendu</i>	Enfants et parents	Travailleurs de la zone d'activités et habitants de la commune de Saint-Priest

Le questionnaire est structuré en 4 parties. La première partie explore la fréquentation du parc, les usages et la perception de l'espace en termes d'esthétisme, de qualité environnementale et d'entretien. La deuxième partie introduit les SFN GEP présentes dans le parc, en interrogeant les usagers sur leur connaissance des SFN GEP et leur opinion sur ce type de gestion des eaux pluviales. La troisième partie utilise une planche de six photos (Figure 4) représentant plusieurs styles d'espaces verts permettant d'identifier les préférences des usagers en termes de modes de gestion de la végétation, de type d'espace le plus souvent fréquenté et d'évaluer la perception des milieux les plus favorables à la biodiversité.

**FIGURE 4.** Planche photo du questionnaire

Enfin, la dernière partie concerne les questions visant à cerner le profil des personnes interrogées (sexe, âge, catégories socio-professionnelles). La passation du questionnaire s'est faite sur une journée pour chaque parc. Les réponses au questionnaire ont été recueillies individuellement, en sélectionnant de manière aléatoire les usagers dans les deux parcs.

Les réponses au questionnaire ont été reportées sur le logiciel SphinxDeclic. Un premier tri « à plat » a été réalisé permettant d'obtenir une vision globale des réponses des enquêtés pour chaque question. Il a été effectué en séparant les réponses obtenues pour chaque parc. Un tri croisé et un test Khi2 ont ensuite été réalisés afin de déterminer si deux variables croisées sont dépendantes ou indépendantes l'une de l'autre, en calculant l'écart entre une distribution théorique et la distribution obtenue sur le terrain.

Au total, 71 réponses ont été collectées sur la base du volontariat : 47 dans le parc Jacob Kaplan et 24 dans le parc Technologique de Porte des Alpes. Bien que les usagers des deux parcs n'aient pas la même conception de la nature, leurs réponses convergent concernant les deux points suivants.

Les usagers fréquentent régulièrement les parcs urbains étudiés, proches de leur domicile ou leur lieu de travail, pour la sensation d'évasion par rapport aux éléments urbains. Pour autant, peu d'entre eux connaissent le rôle spécifique des parcs pour la gestion des eaux pluviales. Ces ouvrages ne détonnent pas du reste des aménagements et sont perçus comme des espaces verts urbains classiques. Malgré cette connaissance limitée des SFN GEP, les usagers ont une perception positive de ces dispositifs. Ils s'accordent à les considérer comme des solutions fiables, durables et qui participent positivement à l'environnement des parcs. Le peu d'inconvénients cités tournent autour de la crainte de moustiques ou autres nuisibles en cas d'eau stagnante (Génissel, 2024).

Des disparités sont observées cependant dans les préférences de gestion, notamment sur le plan esthétique. Une grande part des usagers apprécie les espaces bien entretenus, avec une végétation soignée et une diversité de strates végétales. Ils valorisent un équilibre entre couvert végétal et espaces ouverts. Cependant, certains usagers apprécient les espaces verts moins entretenus, avec un côté "sauvage", qu'ils qualifient de "vraie nature". Ces espaces en gestion extensive sont appréciés de manière bivalente, pouvant être perçus par certains comme un signe d'abandon. Les herbes hautes sont généralement acceptées du moment qu'elles ne nuisent pas aux activités récréatives. Ils ne sont pas contre la gestion extensive et spontanée, du moment que celle-ci n'entrave pas leurs usages, affirmant ainsi un besoin de nature en ville. Par ailleurs, les incivilités et la présence de déchets sont souvent mentionnées comme un point noir à l'égard de la gestion. Ainsi, les préférences de gestion semblent influencées par un côté récréatif et esthétique au sein des parcs (ibid). Ces résultats ont ainsi permis d'alimenter les types d'usagers et leurs préférences de gestion dans le modèle multi-agents (Figure 2).

### III. CONCLUSION et PERSPECTIVES

Cet article montre la pertinence de la modélisation multi-agents pour combler le manque de données concernant la maintenance à long terme des SFN GEP. La modélisation multi-agents offre en effet un outil permettant de décrire le système complexe socio-environnemental et

technique de leur gestion patrimoniale. Les trois méthodes de collecte de données ont permis d'impliquer indirectement les parties prenantes (gestionnaires et usagers) dans la création du modèle (choix des agents et attributs des catégories *Service*, *Usager*, *Pratique de maintenance*, *Défaillance*). Les prochaines étapes consistent à :

- Définir des attributs pour les agents *Composants* qui serviront d'indicateurs de performance pour évaluer la performance globale des SFN GEP ;
- Associer chaque agent des catégories *Pratique de maintenance* et *Défaillance* à un ou plusieurs de ces attributs ;
- Quantifier l'impact des agents *Pratique de maintenance* et *Défaillance* sur ces attributs.

Une fois ces étapes réalisées, le modèle sera simulé sur une durée variant de 10 à 25 ans avec un pas de temps d'une journée à une semaine. Nous pourrions explorer l'impact de différentes stratégies de maintenance sur les performances de la SFN GEP (analyse de sensibilité). Une dimension économique pourra également être intégrée au modèle en ajoutant un attribut de *coût* (humain ou monétaire) à chaque agent des catégories *Pratique d'entretien* afin de déterminer le coût des stratégies de maintenance en fonction des performances rendues. Une validation interne du modèle est prévue.

## REFERENCES

- Al-Rubaei, A.M. (2016). Long-term performance, operation and maintenance needs of stormwater control measures. Luleå University of Technology, Luleå.
- Berglund, E.Z. (2015). Using Agent-Based Modeling for Water Resources Planning and Management. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 141, 04015025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000544](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000544)
- Bush, S., Henning, T.F.P., Ingham, J.M., Raith, A. (2014). Agent-Based Modelling, a Quiet Revolution in Asset Management.
- Cherqui, F., Szota, C., Poelsma, P., James, R., Burns, M.J., Fletcher, T. (2019). How to manage nature-based solutions assets such as stormwater control measures? *8<sup>th</sup> Leading-edge conference on Strategic Asset Management*. IWA, 23-27 September, Vancouver, Canada.
- Cossais, N., Thomas, A.O., Cherqui, F., Morison, P., Bos, D., Martouzet, D., Sibeud, E., Rivière-Honegger, A., Lavau, S., Fletcher, T. (2017) Understanding the challenges of managing SUDS to maintain or improve their performance over time. *14<sup>th</sup> International Conference on Urban Drainage*, Sep 2017, Prague, Czech Republic. hal-01722327
- Davis, D.N. (2000). Agent-based decision-support framework for water supply infrastructure rehabilitation and development. *Computers, Environment and Urban Systems* 24, 173–190. [https://doi.org/10.1016/S0198-9715\(99\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0198-9715(99)00056-3)
- Dawson, R.J., Peppe, R., Wang, M. (2011). An agent-based model for risk-based flood incident management. *Nat Hazards* 59, 167–189. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9745-4>
- Génissel, M. (2024). Synergies et contraintes de la gestion des Solutions fondées sur la Nature (SfN) en regard des enjeux de biodiversité - Application à la gestion des eaux pluviales urbaines en France métropolitaine. Mémoire de Master 2 ERPUR, Université de Rennes.
- Macal, C.M., North, M.J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation* 4, 151–162. <https://doi.org/10.1057/jos.2010.3>
- Mohseni, M. (2003). What does asset management mean to you? *IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, IEEE, Dallas, TX, USA, pp. 962–964. <https://doi.org/10.1109/TDC.2003.1335069>
- Nesshöver, C., Assmuth, T., Irvine, K.N., Rusch, G.M., Waylen, K.A., Delbaere, B., Haase, D., Jones-Walters, L., Keune, H., Kovacs, E., Krauze, K., Külvik, M., Rey, F., Van Dijk, J., Vistad, O.I., Wilkinson, M.E.,

- Wittmer, H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Science of The Total Environment* 579, 1215–1227. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>
- Osman, H., (2012). Agent-based simulation of urban infrastructure asset management activities. *Automation in Construction* 28, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.004>
- Pin, C., (2023). L'entretien semi-directif. LIEPP Fiche méthodologique n°3.
- Raymond, C.M., Berry, P., Breil, M., Nita, M.R., Kabisch, N., de Bel, M., Enzi, V., Frantzeskaki, N., Geneletti, D., Cardinaletti, M., Lovinger, L., Basnou, C., Monteiro, A., Robrecht, H., Sgrigna, G., Munari, L. and Calfapietra, C. (2017) An Impact Evaluation Framework to Support Planning and Evaluation of Nature-based Solutions Projects. *Report prepared by the EKLIPSE Expert Working Group on Nature-based Solutions to Promote Climate Resilience in Urban Areas*. Centre for Ecology & Hydrology, Wallingford, United Kingdom
- Schreier, M. (2012). *Qualitative content analysis in practice*. (Vols. 1-0). SAGE Publications, Inc, <https://doi.org/10.4135/9781529682571>