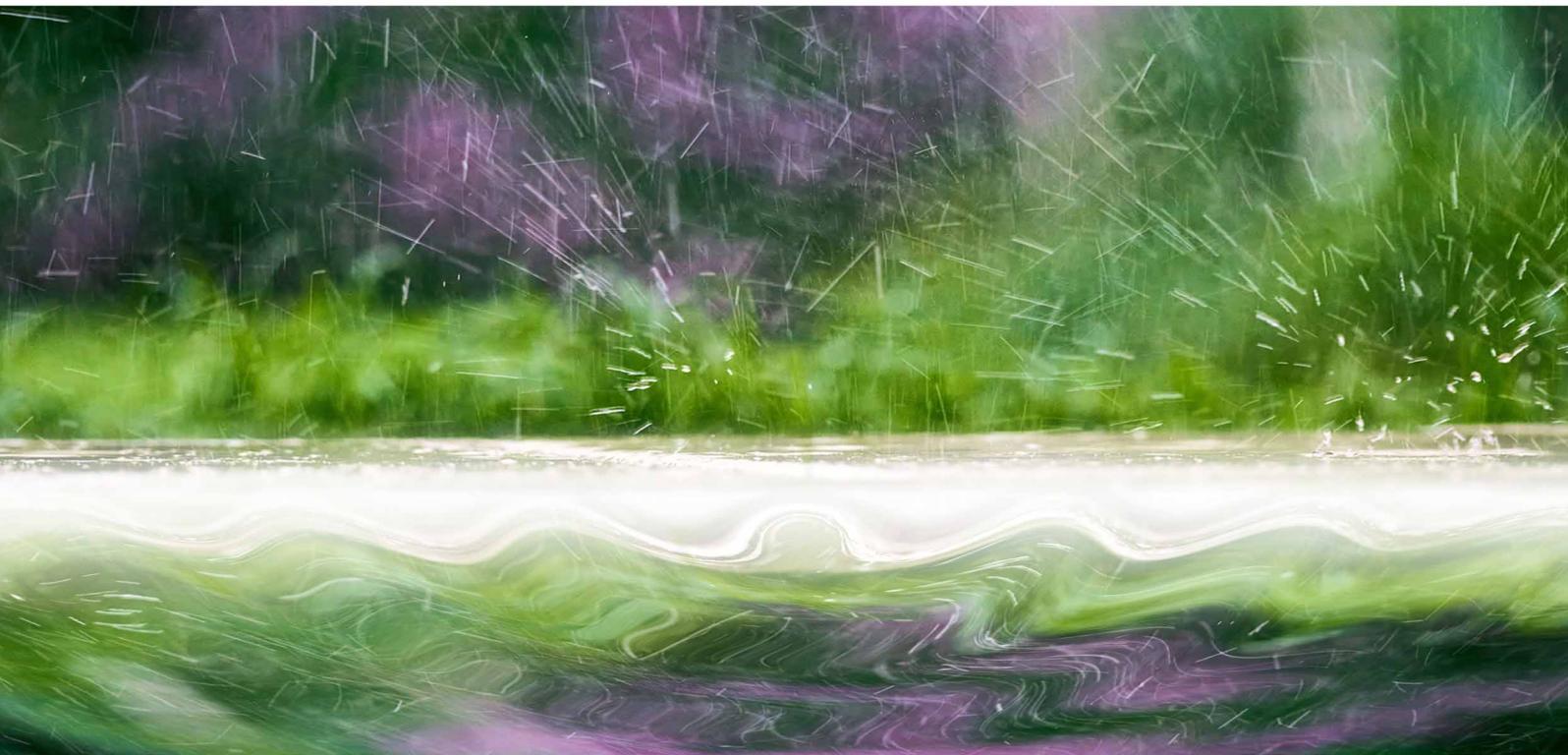


GUIDE MÉTHODOLOGIQUE

pour l'évaluation de performances des ouvrages
de maîtrise à la source des eaux pluviales



Groupe de Liaison Inter-Projets : Matriochkas, MicroMegas et Roulépur

Auteurs, coauteurs et contributeurs

Auteurs et coordinateur

- Kelsey Flanagan (1) (coordination)
- Sylvie Barraud (2)
- Marie-Christine Gromaire (1)
- Fabrice Rodriguez (3)

Coauteurs

- Sébastien Ah-Leung (4)
- Laëtitia Bacot (5)
- Anne Honegger (4)
- José-Frédéric Deroubaix (1)
- David Ramier (6)
- Lucie Varnede (6,7)

Contributeurs

- Alexandre Bak (8)
- Philippe Branchu (6)
- Hélène Castebrunet (2)
- Frédéric Cherqui (2)
- Nina Cossais (4,9,13)
- Bernard de Gouvello (1)
- Alexandre Fardel (10)
- Robin Garnier (2)
- Pascale Neveu (11)
- Julien Paupardin (12)
- Véronique Ruban (3)
- Martin Seidl (1)
- Elisabeth Sibeud (13)
- Eric Thomas (14)

■ Contact : Stéphane Garnaud-Corbel

stephane.garnaud-corbel@ofb.gouv.fr

Direction de la recherche et de l'appui scientifique - Office français de la biodiversité

Ce guide est présenté en ligne sur le portail technique de l'OFB (<https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1252>) et référencé dans le portail documentaire partenarial Eau et biodiversité (www.documentation.eauetbiodiversite.fr)

(1) Laboratoire eau environnement systèmes urbains (Leesu), École des Ponts ParisTech, Université Paris Est Créteil, 77600 Marne-la-Vallée

(2) INSA Lyon, Laboratoire DEEP, OTHU, EUR H2O'Lyon (ANR-17-EURE-0018), 69621 Villeurbanne

(3) Université Gustave Eiffel, GERS Laboratoire eau et environnement, 44344 Bouguenais

(4) Laboratoire EVS - UMR CNRS 5600, 69007 Lyon

(5) GRAIE, OTHU, 69603 Villeurbanne

(6) Cerema Ile de France, équipe de recherche Team, 78197 Trappes-en-Yvelines

(7) Ecovégétal, 28410 Broué

(8) St Dizier Environnement, 59147 Gondrecourt

(9) Laboratoire Citeres, Université de Tours, 37204 Tours

(10) CSTB CAPE, Aquasim 44300 Nantes

(11) Ville de Paris, Direction de la propreté et de l'eau, Service technique de l'eau et de l'assainissement, 75014 Paris

(12) Conseil départemental de la Seine-Saint-Denis, Direction de l'eau et de l'assainissement, Service Hydrologie urbaine et environnement, 93003 Bobigny

(13) Direction de l'eau, Grand Lyon la Métropole, 69003 Lyon

(14) Conseil départemental de Seine et Marne, Direction des routes, 77250 Moret-Loing-et-Orvanne

GUIDE MÉTHODOLOGIQUE

pour l'évaluation de performances des ouvrages
de maîtrise à la source des eaux pluviales

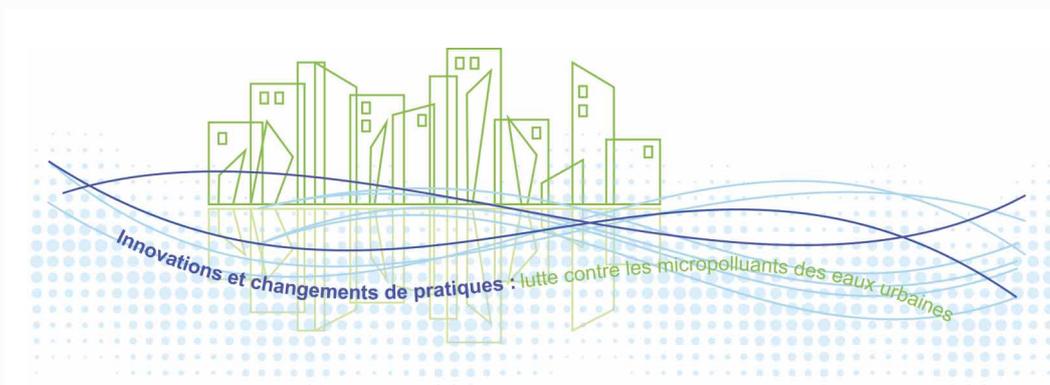


Groupe de Liaison Inter-Projets : Matriochkas, MicroMegas et Roulépur

Kelsey Flanagan (coordination)
Sylvie Barraud
Marie-Christine Gromaire
Fabrice Rodriguez

Avant-propos

En 2013, l'Onema (actuellement Office français de la biodiversité), les agences de l'eau et le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (actuellement le ministère de la Transition écologique) ont lancé conjointement l'appel à projets *Innovations et changements de pratiques - Lutte contre les micropolluants des eaux urbaines*. Parmi les treize projets retenus, trois étaient consacrés à l'évaluation des performances des ouvrages de gestion des eaux pluviales : Matriochkas à Nantes, MicroMegas à Lyon et Roulépur en Ile-de-France. Afin d'harmoniser les approches d'évaluation de performances et ainsi de faciliter l'intercomparaison des résultats, les trois projets se sont coordonnés dès le départ à travers un groupe de liaison inter-projets (GLIP) pour définir des méthodes d'évaluation des performances des solutions de maîtrise des eaux pluviales. Ce guide est le fruit de ce travail commun. Le suivi *in situ* de 12 ouvrages dans le cadre des trois projets a fourni des exemples d'application des méthodes proposées ; ces exemples permettent d'adapter les méthodes aux difficultés pratiques pouvant être rencontrées sur le terrain.



Résumé et mots clés

L'évaluation de performances des ouvrages de maîtrise à la source des eaux pluviales : une démarche complexe mais pertinente pour les acteurs de la gestion des eaux pluviales.

Dans le contexte actuel de changements multiples (perturbation climatique, urbanisation continue, densification) impactant le fonctionnement hydrologique mais aussi la qualité des environnements urbains, la gestion des eaux pluviales intégrée à l'urbanisme et au plus près de sa source est devenue un enjeu majeur de développement d'une ville durable, résiliente et viable pour ses habitants.

Les ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales sont plurifonctionnels, et les acteurs en charge de la gestion des eaux sont en attente d'outils méthodologiques leur permettant de concevoir et gérer ces ouvrages, et d'évaluer leurs performances. Pour cela, il faut pouvoir définir des indicateurs adaptés, qui peuvent être liés à différents enjeux auxquels les ouvrages peuvent répondre, ainsi qu'aux différentes fonctions de service qu'ils peuvent assurer pour répondre à ces enjeux.

Ce guide propose des éléments méthodologiques pour mettre en œuvre l'évaluation des performances de ces ouvrages. Il est destiné aux maîtres d'ouvrage ayant en charge la gestion d'un parc d'ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales, des organismes mettant en œuvre des études de suivis d'ouvrages (bureaux d'études), ainsi que des organismes prescripteurs de suivis tels que les polices de l'eau ou financeurs de suivis comme les agences de l'eau. Ce guide est le fruit d'un travail commun réunissant des chercheurs et des acteurs opérationnels de la gestion de l'eau au sein de trois projets de recherche (Matriochkas, MicroMegas et Roulépur) financés dans le cadre de l'appel à projet *Innovations et changements de pratiques : lutte contre les micropolluants des eaux urbaines* de l'Office français de la biodiversité et des agences de l'eau (notamment Loire-Bretagne, Rhône-Méditerranée-Corse et Seine-Normandie pour les trois projets).

Le guide présente une démarche destinée à l'évaluation des performances des ouvrages. Elle est basée sur un inventaire des 6 enjeux auxquels les ouvrages de gestion à la source peuvent répondre, ainsi que des 21 fonctions de services associées. Le guide propose une quarantaine d'indicateurs regroupés en 3 catégories, les fonctions hydrologiques (relatives aux flux d'eau), les fonctions relatives aux polluants et les fonctions de gestion ou socio-techniques. Ces indicateurs font l'objet d'une fiche détaillée permettant son estimation. Des exemples d'application de ces indicateurs sont présentés ; ils sont basés sur les retours d'expérience issus des ouvrages investigués dans le cadre des projets Matriochkas, MicroMegas et Roulépur, situés en milieu urbain ou routier dans l'agglomération nantaise, la métropole de Lyon et la région parisienne. Ces ouvrages et l'instrumentation mise en œuvre pour évaluer leurs performances sont décrits en détail dans cette publication.

Mots-clés

Eaux pluviales
Gestion à la source
Performance
Qualité des eaux pluviales
Ouvrages
Hydrologie



Sommaire

- 2 **Avant-propos**
- 3 **Résumé et mots clés**
- 6 **1 - Introduction**
 - Un guide pour qui ?
 - Un guide pour quoi faire ?
 - Comment utiliser ce guide ?
- 8 **2 - Définition des enjeux et des fonctions de l'ouvrage**
 - Présentation de l'approche méthodologique pour la définition des enjeux et des fonctions
 - Identification des enjeux et fonctions de service des ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales
 - ENJEU :
 - ENJEU 1 - Lutter contre les inondations
 - ENJEU 2 - Préserver les ressources
 - ENJEU 3 - Préserver l'état écologique des milieux récepteurs
 - ENJEU 4 - Protéger les milieux construits
 - ENJEU 5 - Favoriser la qualité des environnements urbains
 - ENJEU 6 - Faire preuve d'une gestion efficace aujourd'hui et demain
- 23 **3 - Indicateurs de performances et méthodes d'évaluation**
 - Qu'est-ce qu'un indicateur et comment l'appliquer ?
 - Types d'indicateurs
 - Définition du système évalué et des données à acquérir
 - Cas de la mise en place d'un dispositif d'investigation
 - Fonctions traitées dans ce guide
 - Indicateurs hydrologiques et relatifs aux polluants
 - Délimitation du système évalué et données à acquérir
 - Indicateurs hydrologiques
 - Indicateurs relatifs aux polluants
 - Indicateurs socio-techniques
 - Délimitation du système évalué et données à acquérir
 - Présentation des indicateurs socio-techniques



89 4 - Bibliographie

95 5 - Annexes

■ Recommandations météorologiques pour caractériser les flux météorologiques, concentrés et diffus

Flux météorologiques

Flux concentrés

Flux diffus

■ Fiches des sites d'étude

Chassieu – Bassin Django Reinhardt

Compans – Accotement filtrant et noue filtrante

Couëron – Bassin sec BO3-Chézine

Paris – STOPPOL®

Nantes - Noue Dumont (Bottière Chenaie)

Rosny-sous-Bois – Filtres à sable horizontaux plantés

Vertou – Bassin en eau de La Ville au Blanc

Villeneuve-le-Roi – Parking perméable végétalisé

Villeurbanne (éco-campus de la Doua) – Chaussée à structure réservoir, noue et tranchée drainante

163 Glossaire



1. Introduction

Les ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales peuvent remplir des fonctions multiples, telles que l'écrêtement de débits de ruissellement, la limitation du volume ruisselé, la maîtrise des flux de polluants ou encore l'intégration dans le projet urbain à travers d'usages connexes (valorisation paysagère du site, des usages récréatifs...). Ce guide fournira des recommandations pour effectuer une évaluation fiable *a posteriori* de la performance des ouvrages de gestion à la source. Il est le fruit d'un travail commun entre trois projets de recherche (Matriochkas, MicroMegas et Roulépur), tous financés dans le cadre de l'appel à projet « Innovations et changements de pratiques : lutte contre les micropolluants des eaux urbaines » de l'Agence française pour la biodiversité, maintenant l'Office français de la biodiversité, et des agences de l'eau (notamment Loire-Bretagne, Rhône-Méditerranée-Corse et Seine-Normandie pour les trois projets). Ces projets s'attachent à l'évaluation des performances des ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales urbaines.

1.1 Un guide pour qui ?

Ce guide est à destination des maîtres d'ouvrage ayant en charge la gestion d'un parc d'ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales dont ils souhaitent évaluer la performance, des organismes mettant en œuvre des études de suivis d'ouvrages (bureaux d'études), ainsi que des organismes prescripteurs de suivis tels que les polices de l'eau ou financeurs de suivis comme les agences de l'eau.

1.2 Un guide pour quoi faire ?

Afin d'aider ces acteurs à analyser le fonctionnement et à évaluer les performances des ouvrages dont ils assurent la gestion ou le suivi, ce guide s'attachera à :

- 1 - présenter un inventaire des enjeux** auxquels les ouvrages de gestion à la source peuvent répondre, ainsi que les différentes fonctions de service qu'ils peuvent fournir pour répondre à ces enjeux ;
- 2 - proposer des indicateurs pour évaluer une sélection de ces fonctions**, sur la base des connaissances développées au cours des projets Matriochkas, MicroMegas et Roulépur ;
- 3 - présenter des exemples d'application** de ces indicateurs principalement sur la base de l'expérience des trois projets.

1.3 Comment utiliser ce guide ?

Pour utiliser ce guide, le lecteur peut suivre la démarche proposée par la Figure 1 qui se décompose en 4 étapes principales.

Les premières étapes dans l'évaluation des performances d'un ouvrage consistent à identifier les **enjeux** environnementaux et sociétaux locaux auxquels l'ouvrage répond et les **fonctions de service** qu'on attend de l'ouvrage en fonction de ces enjeux. Par exemple, si un ouvrage de gestion à la source est conçu afin de préserver ou restaurer l'état écologique d'un cours d'eau du point de vue de sa qualité chimique, il peut avoir une fonction de service de maîtrise du flux polluant. Un ouvrage de gestion à la source des eaux pluviales répond souvent à plusieurs enjeux à travers de multiples fonctions de service. L'utilisateur peut se servir de la **partie 2** de ce guide, décrivant les enjeux et les fonctions de service possibles, pour faire cette identification.

Pour évaluer le niveau de performance des fonctions, des **indicateurs** doivent être définis. La **partie 3** aidera le lecteur à les identifier. Ce guide comprend des indicateurs relatifs à des fonctions de service courantes des ouvrages de gestion à la source dans le contexte français et sont illustrés à l'aide des résultats obtenus dans les trois programmes de recherche. Au début de la partie 3 (Tableau 2), le lecteur trouvera un tableau qui relie les fonctions de service aux indicateurs associés.

Enfin, afin de pouvoir appliquer ces indicateurs, il est nécessaire d'identifier le système sur lequel l'indicateur sera évalué et d'identifier les informations qu'il est nécessaire d'acquérir. Ce guide comprend des recommandations sur l'identification du système évalué et les données à acquérir au sein de la première partie. En Annexe, des recommandations, des exemples d'expérimentations réalisées au sein des projets Matriochkas, MicroMegas et Roulépur et des éléments de retour d'expériences en matière de suivi météorologique sont donnés. Une fois le ou les indicateur(s) évalué(s), l'utilisateur aura à sa disposition des informations permettant d'évaluer la **performance** contribuant à une **aide à la décision éclairée** par rapport au fonctionnement de l'ouvrage et à sa maintenance.

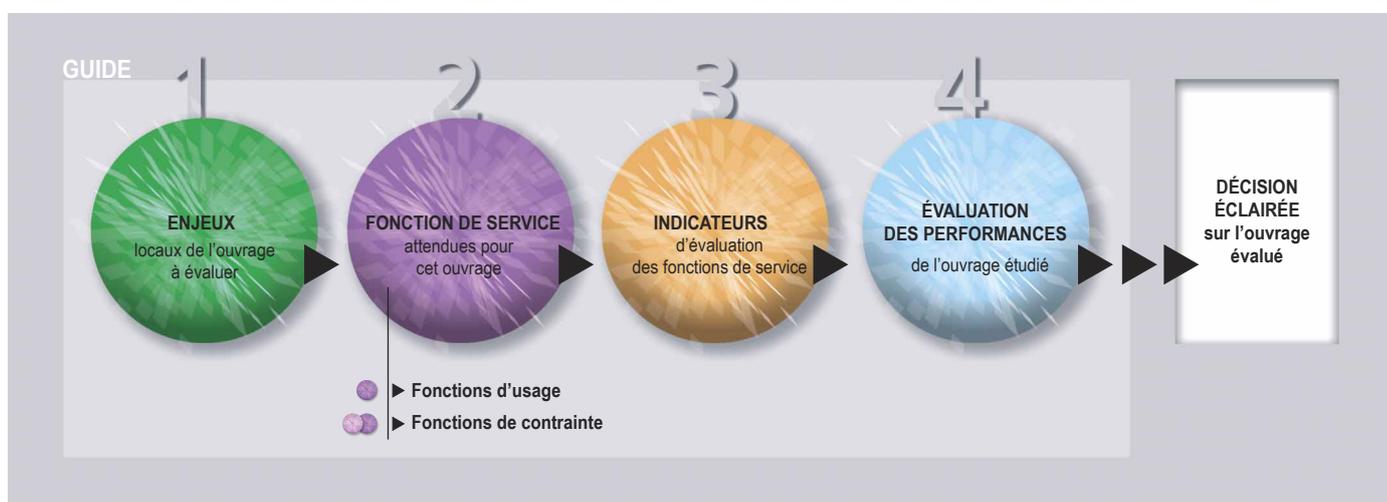


Figure 1. Démarche d'utilisation de ce guide.

2. Définition des enjeux et des fonctions de l'ouvrage



Enjeux



Fonctions
de service

2.1 Présentation de l'approche méthodologique pour la définition des enjeux et des fonctions

Les ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales (OGA) sont des objets multifonctionnels, souvent conçus pour remplir plusieurs objectifs. Dans cette section, avec une approche basée sur l'analyse fonctionnelle (normes NF EN 1325-1, NF X 50-151, analyse de valeur, analyse fonctionnelle), nous définirons d'abord les **enjeux**, ou les problématiques environnementales ou sociétales auxquels les OGA peuvent répondre, puis les **fonctions de services** pouvant être attendues d'un OGA pour répondre à chaque enjeu. Parmi les fonctions de service, on distinguera les **fonctions d'usage**, qui répondent aux objectifs principaux pour lesquels un ouvrage a été conçu et les **fonctions de contrainte**, qui ne sont pas les fonctions premières pour lesquelles l'OGA a été conçu mais qui constituent celles qui lui sont imposées par le fait de son existence. Par exemple, un OGA a pu être conçu pour maîtriser les flux polluants (fonction d'usage). Une fois que l'OGA a été conçu et fonctionne, sa maintenance devient un facteur d'évolution de cet ouvrage. L'ouvrage n'a pas été conçu dans l'objectif de réaliser sa maintenance, mais de fait, cette fonction s'impose. Les facilités d'entretien et de maintenance sont des fonctions de contrainte. L'utilisateur de ce guide peut se servir de cette section afin d'identifier, en fonction des enjeux locaux, les fonctions pertinentes de l'ouvrage dont il aimerait évaluer la performance. Dans la section suivante, des indicateurs de performance seront proposés pour les fonctions de service dont la performance a pu être abordée au cours des projets Matriochkas, MicroMegas et Roulépur.

2.2 Identification des enjeux et fonctions de service des ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales

6 enjeux ou problématiques environnementales ou sociétales auxquels les OGA peuvent répondre ont été identifiés :

- lutter contre les inondations ;
- préserver les ressources (eau et sol) ;
- protéger les milieux construits ;
- préserver l'état écologique des milieux récepteurs ;
- favoriser la qualité des environnements urbains ;
- s'engager dans une gestion efficace des eaux pluviales, aujourd'hui et demain.

L'utilisateur du guide doit définir le ou les enjeux qu'il souhaite analyser sur l'ouvrage à évaluer, en fonction des problématiques auxquelles il est soumis. 21 fonctions ont été envisagées pour les 6 enjeux. Elles sont listées dans le Tableau 1 et la Figure 2 (à noter que les numéros ne correspondent à aucune hiérarchie). Pour des raisons de clarté du document, les enjeux et les fonctions associées seront développés simultanément dans les paragraphes suivants.

Tableau 1. Synthèse des enjeux et des fonctions associées

ENJEU 1 - Lutter contre les inondations
<ul style="list-style-type: none"> ● Fonction d'usage : accueillir le ruissellement ● Fonction d'usage : écrêter le débit de pointe ● Fonction d'usage : réduire le volume de ruissellement
ENJEU 2 - Préserver les ressources
<ul style="list-style-type: none"> ● Fonction d'usage : maîtriser les flux polluants ● Fonction d'usage : alimenter les ressources en eau ●● Fonction de contrainte : réduire les besoins de prélèvement d'eau ●● Fonction de contrainte : préserver la valeur agronomique du sol ●● Fonction de contrainte : réduire l'empreinte environnementale
ENJEU 3 - Préserver l'état écologique des milieux récepteurs
<ul style="list-style-type: none"> ● Fonction d'usage : maîtriser le régime hydrologique ● Fonction d'usage : maîtriser les flux polluants
ENJEU 4 - Protéger les milieux construits
<ul style="list-style-type: none"> ●● Fonction de contrainte : limiter les désordres géotechniques et hydrogéologiques ●● Fonction de contrainte : prévenir le dysfonctionnement des systèmes d'assainissement existants
ENJEU 5 - Favoriser la qualité des environnements urbains
<ul style="list-style-type: none"> ● Fonction d'usage : favoriser le confort thermique ●● Fonction de contrainte : limiter l'exposition humaine à la pollution ● Fonction d'usage : s'intégrer dans le projet urbain et favoriser des usages multiples ●● Fonction de contrainte : prévenir les mésusages et les pratiques « déqualifiantes » ●● Fonction de contrainte : limiter les nuisances liées à la faune et la flore ● Fonction d'usage : accueillir la biodiversité
ENJEU 6 - S'engager dans une gestion efficace aujourd'hui et demain
<ul style="list-style-type: none"> ●● Fonction de contrainte : faciliter l'entretien et la maintenance ● Fonction d'usage : servir de démonstrateur ●● Fonction de contrainte : optimiser les coûts ●● Fonction de contrainte : gérer les interfaces entre les espaces publics et privés

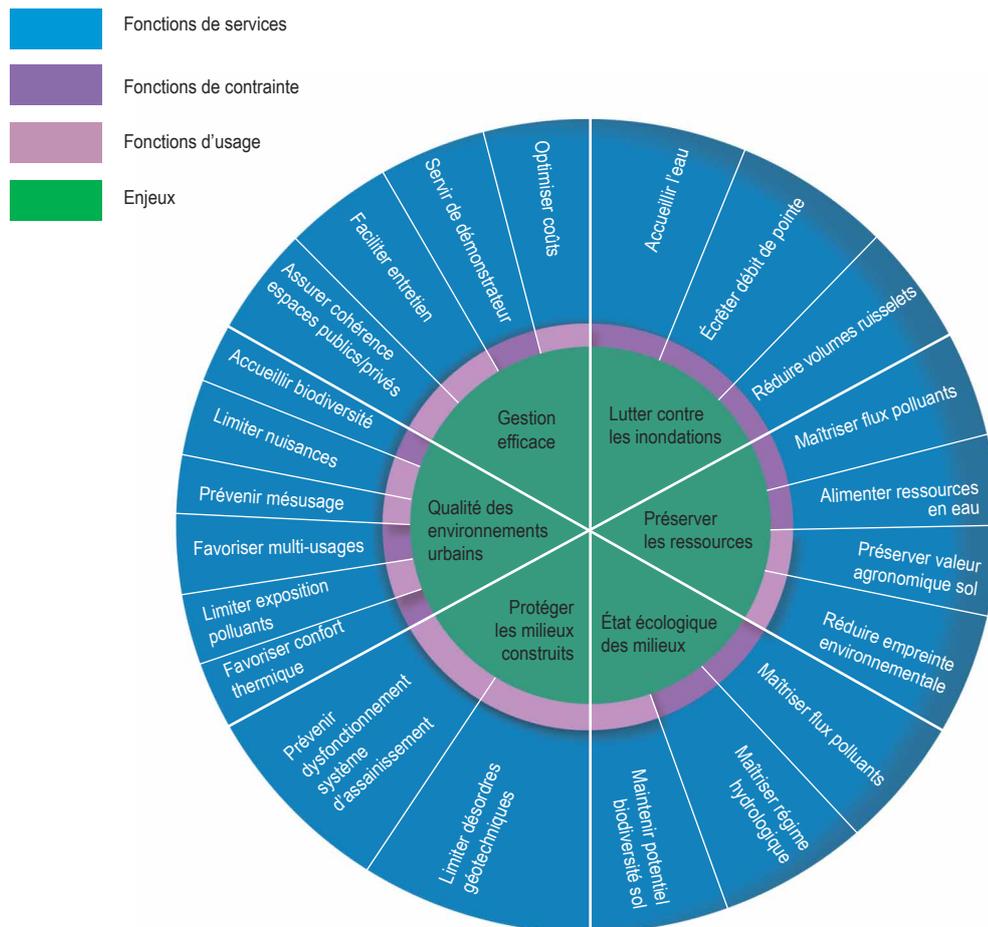


Figure 2. Marguerite des enjeux et fonctions.



ENJEU 1 - Lutter contre les inondations

Les inondations en milieu urbain perturbent le fonctionnement de la ville. Elles causent des dégâts matériels plus ou moins graves et peuvent mettre en danger la santé et la sécurité humaine. L'imperméabilisation des sols, généralement associée à l'urbanisation, aggrave ce risque en augmentant la quantité de ruissellement produite et en modifiant sa dynamique (écoulements plus rapides). Il faut distinguer l'inondation pluviale, générée par le ruissellement issu de pluies très intenses que le réseau hydrographique et/ou le réseau d'assainissement ne parviennent pas à évacuer, de l'inondation fluviale qui arrive lorsque le débit d'un cours d'eau dépasse la capacité de son lit ou encore l'inondation par remontée de nappe. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux inondations pluviales (par ex. inondation par le ruissellement produit localement, lorsque l'eau ruisselée ne peut pas être absorbée par le système d'assainissement superficiel ou souterrain ou encore l'inondation par débordement du réseau d'assainissement en des points limitants du système).

Les OGA permettent de lutter localement contre les inondations par ruissellement. La systématisation de la gestion à la source sur une proportion importante de la surface d'un bassin versant urbain permet par ailleurs d'envisager une limitation sensible du risque d'inondation par surcharge du système d'assainissement, si elle est menée correctement. Les OGA peuvent en outre constituer un mode autonome de drainage (infiltration par exemple).

Fonction d'usage : accueillir le ruissellement

Afin de limiter le risque d'inondation pluviale en amont d'un OGA, l'ouvrage doit être conçu pour pouvoir accueillir le ruissellement produit par son bassin versant d'apport. Un ouvrage peut accueillir le ruissellement lorsque :

- l'entrée de l'ouvrage est la voie de moindre résistance pour le ruissellement produit par le bassin versant ;
- le débit du ruissellement ne dépasse pas la capacité hydraulique d'engouffrement de l'entrée de l'ouvrage ;
- la capacité de stockage de l'ouvrage est disponible pour accueillir les quantités d'eaux pluviales (capacité maximale non atteinte et/ou capacité résiduelle compatible avec la quantité d'eau collectée).

La conception hydraulique de l'ouvrage se fait généralement selon une approche probabiliste, selon laquelle l'inondation du bassin versant en amont est acceptée avec une fréquence fixée (généralement la même que celle de la pluie de dimensionnement). La capacité d'un ouvrage à accueillir le ruissellement peut aussi être compromise par l'accumulation de sédiments ou la présence de déchets liés ou non à son fonctionnement. Ceux-ci peuvent aussi bloquer ou diminuer la capacité hydraulique d'engouffrement dans l'ouvrage, voire diminuer l'espace de stockage ou encore bloquer la sortie. Cela souligne l'importance de l'entretien pour assurer le bon fonctionnement de l'ouvrage à long terme.

Fonction d'usage : écrêter le débit de pointe

Les OGA peuvent également contribuer à limiter les inondations en aval en écrétant le débit de pointe de ruissellement par rapport à celui généré par le bassin versant d'apport. En France, les OGA sont le plus souvent dimensionnés pour assurer un débit de fuite limité fixé par des règlements locaux pour une période de retour donnée. Une limitation de débit peut être associée à une réduction de volume (nécessité par exemple d'intercepter systématiquement pour les événements courants au moins 15 mm de hauteur de pluie à la parcelle). L'écrêtement du débit de pointe limite les inondations directement en aval de l'ouvrage.

En revanche, à grande échelle, lorsqu'il y a conjonction de plusieurs bassins versants régulés par des ouvrages de stockage sans réduction de volume, l'effet sur le risque d'inondation peut être moins bénéfique voire contre-productif. En effet, chaque sous-bassin régulé sans réduction de volume va conduire à des débits de pointe certes plus faibles mais avec un étalement de l'écoulement dans le temps. Leur conjonction augmente les chances de superposition des débits régulés qui durent alors plus longtemps. Cette superposition peut avoir pour effet une augmentation de débit de pointe en aval. Ces possibles effets peuvent être évités en étudiant la dynamique temporelle des flux d'eau sur l'ensemble du bassin versant avec des modèles hydrologiques et/ou hydrauliques aujourd'hui disponibles dans tous les logiciels du marché traitant de la gestion des eaux pluviales.

Fonction d'usage : réduire le volume de ruissellement

La réduction du volume de ruissellement par un OGA peut également contribuer à limiter les inondations en aval de l'ouvrage. Le volume de ruissellement peut être limité par rétention d'eau dans une zone de stockage pouvant se vidanger entre les événements pluvieux par des processus de redistribution d'eau dans le sol, d'évaporation ou d'évapotranspiration. Au cours d'un événement pluvieux, dans le cas d'un ouvrage non-étanche, le volume peut également être infiltré. La capacité d'un système à réduire le volume du ruissellement dépend de nombreux facteurs comme le ratio entre sa surface et celle du bassin versant, de la conductivité hydraulique du sol et l'évolution possible du colmatage de l'ouvrage, du volume de stockage disponible, du type et de la densité de végétation, des conditions d'ensoleillement et encore de la répartition de la pluie dans l'année. La réduction du volume contribue à limiter le risque d'inondation pluviale en aval de

l'ouvrage, même si l'effet dépend de la configuration du bassin versant. Comme la réduction du volume ne correspond pas à un étalement du débit dans le temps, elle ne présente pas les effets pervers pouvant être associés à la régulation des débits.

1 POUR ALLER PLUS LOIN

Petrucci, G. (2012). La diffusion du contrôle à la source des eaux pluviales urbaines. Confrontation des pratiques à la rationalité hydrologique. Thèse de doctorat, Université Paris Est.

Sage, J. (2016). Concevoir et optimiser la gestion hydrologique du ruissellement pour une maîtrise à la source de la contamination des eaux pluviales urbaines. Thèse de doctorat, Université Paris Est.

2

ENJEU 2 - Préserver les ressources

L'urbanisation tend à dégrader la disponibilité et la qualité des ressources naturelles. Par exemple, l'imperméabilisation du sol tend à limiter la recharge de la nappe phréatique par la pluie ou les aires cultivables. La contamination du ruissellement urbain peut dégrader la qualité des eaux de surface, limitant les utilisations qui peuvent en être faites.

Les ouvrages de gestion à la source peuvent en revanche contribuer à la préservation des ressources à travers diverses fonctions. En effet, les OGA peuvent remplir des fonctions d'usage de maîtrise des flux polluants apportés par les eaux pluviales afin de protéger les milieux aquatiques superficiels et donc les ressources en eau. L'infiltration peut également contribuer à réalimenter les nappes. Ils peuvent par ailleurs contribuer à limiter la pression sur les sols et préserver sa valeur agronomique et enfin réduire globalement l'empreinte environnementale liée à gestion des eaux pluviales.

Fonction d'usage : maîtriser les flux polluants

Les OGA peuvent contribuer à la préservation de la qualité des ressources en eau par la fonction « maîtriser les flux polluants ». Quand on considère la qualité de l'eau en termes de ressources, on vise la limitation des flux polluants susceptibles de limiter les usages actuels ou futurs de l'eau. Par exemple, si on souhaite protéger la qualité des eaux de surface pour la baignade, il est nécessaire de limiter les flux des pathogènes (ou par proxy, des coliformes fécaux). Si on souhaite utiliser les eaux souterraines pour l'énergie géothermique, il est important de les protéger des perturbations thermiques. Si un ouvrage se situe dans le périmètre d'un captage d'eau potable, on devra limiter les flux de pathogènes ou de polluants toxiques susceptibles d'être ingérés par l'homme.

La maîtrise des flux polluants liée à l'utilisation des OGA passe par la diminution des quantités rejetées par l'ouvrage, à son aptitude à dépolluer (processus internes). Il faut également veiller à limiter les contacts de l'eau traitée avec des matériaux pouvant émettre des polluants ou traverser des couches de sol pollués par ailleurs. À l'international, il est courant de concevoir les OGA (par ex. les filtres végétalisés) afin d'optimiser la dépollution de l'eau, en agissant sur le choix du substrat et les conditions d'écoulement. Cependant, outre la conception de l'ouvrage, la possibilité d'améliorer la qualité de l'eau en sortie dépend de son niveau de pollution en entrée (il est plus facile de réduire les concentrations trouvées dans les eaux fortement chargées) et des propriétés du polluant concerné (par exemple, les polluants associés aux particules sont plus facilement retenus que les polluants dissous). Lorsque les conditions sont peu favorables à une dépollution de l'eau, la réduction du volume de ruissellement peut devenir le processus dominant de contrôle du flux polluant.

Fonction d'usage : alimenter les ressources en eau

Les ouvrages de gestion à la source peuvent être conçus afin de valoriser les eaux pluviales. Cela peut être fait à long terme de manière indirecte par l'alimentation de la nappe phréatique en favorisant l'infiltration de l'eau. Bien que la recharge de la nappe phréatique soit un avantage souvent revendiqué pour les ouvrages infiltrants, ce flux est difficile à mesurer directement du fait de sa nature diffuse. De plus, étant donnée la différence entre les échelles spatiales d'un ouvrage et d'une nappe phréatique, un changement du niveau de la nappe ne peut généralement pas être attribué à un seul ouvrage sauf très localement et sans effet réel sur la ressource. Une modification significative pourrait être observée uniquement à plus grande échelle, par exemple, lorsqu'un quartier entier est aménagé avec des ouvrages infiltrants. Si des eaux de ruissellement initialement polluées atteignent la nappe, il y a un risque d'une dégradation de la qualité de celle-ci ; cependant, on note que l'eau sera filtrée par le sol (via des processus mécaniques, biologiques et physico-chimiques) au cours de son infiltration, ce qui limite ce risque notamment pour les polluants particuliers.

Les eaux pluviales peuvent également être valorisées plus directement par un OGA lorsqu'elles sont récupérées en sortie, puis stockées, avant d'être utilisées comme ressource. Ce type de fonctionnement est courant dans des pays soumis à une pénurie d'eau comme l'Australie. Le plus souvent, les eaux récupérées sont employées pour l'arrosage de jardins ou comme réserve de chasses d'eau dans les bâtiments. Lorsque l'eau sortant d'un OGA est valorisée, il est important que la qualité d'eau en sortie soit en adéquation avec l'utilisation envisagée.

Fonction de contrainte : réduire les besoins de prélèvement d'eau

Si les ouvrages de gestion à la source peuvent contribuer à alimenter la ressource en eau, ils peuvent également contribuer à améliorer le bilan hydrique urbain en réduisant les besoins de prélèvement d'eau. Les ouvrages végétalisés alimentés par le ruissellement reçoivent en effet plus d'eau que des surfaces recevant seulement la pluie. Une réserve d'eau peut être constituée dans ou sous une couche de sol ou de substrat poreux, afin d'alimenter la végétation lors des périodes plus sèches. Le choix des plantes utilisées dans les OGA conditionne évidemment le besoin en eau pour l'arrosage. Les besoins en arrosage peuvent donc aussi être minimisés en choisissant des plantes qui peuvent survivre en périodes de sécheresse ainsi qu'en conditions très humides.

Fonction de contrainte : préserver la valeur agronomique du sol

Lorsque l'eau s'infiltré dans le substrat d'un OGA, la rétention du flux polluant implique la contamination de ce sol. Cela peut paraître antinomique de la fonction « maîtriser les flux polluants ». Le sol est une ressource naturelle importante à protéger.

Le réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS) rappelle que les principales causes de dégradations des sols sont l'érosion, l'appauvrissement en matières organiques [naturelles], la contamination, le tassement et l'imperméabilisation. Ainsi, il est important que le sol puisse rendre son office d'infiltration de l'eau (lutte contre l'imperméabilisation) et que l'interception des matières associées ne dégradent pas sa valeur agronomique ou qu'elle soit facile à régénérer ; l'idée étant de ne pas créer d'irréversibilités.

Il convient d'évaluer dans quelle mesure l'infiltration de l'eau et l'interception des matières associées risquent de dégrader sa valeur agronomique, et d'adapter la gestion de ce sol. Pour les ouvrages à la source dits centralisés, la contamination se limite en général à la zone impactée par les pluies courantes et à la couche de surface. Les niveaux de contamination atteints restent souvent limités pour les ouvrages de gestion très amont drainant des

surfaces à faible potentiel de contamination (peu de sources polluantes ou peu de lessivage des surfaces).



Fonction de contrainte : réduire l'empreinte environnementale

Souvent conçus comme des systèmes semi-naturels relativement rustiques, les ouvrages de gestion à la source peuvent avoir la fonction de réduction de l'empreinte environnementale globale associée à la gestion des eaux pluviales par rapport aux systèmes de drainage traditionnels, plus industriels (réseau de conduites, bassin enterré, décanteur préfabriqué...). Cette empreinte environnementale doit prendre en compte l'ensemble des ressources consommées, des pollutions émises et des déchets produits au cours de la vie d'un ouvrage lors de sa construction, de sa mise en œuvre et de sa fin de vie. Elle peut être évaluée par une analyse de cycle de vie.

2

POUR ALLER PLUS LOIN

Dechesne, M. (2002). Mesure et modélisation des flux d'eau et de polluants dans les systèmes d'infiltration. Thèse INSA de Lyon.

Petavy, F. (2007). Traitement des sédiments issus de l'assainissement pluvial. Thèse Ecole centrale de Nantes.

Tedoldi, D. (2017) - Mesure et modélisation de la contamination du sol dans les ouvrages de gestion à la source du ruissellement urbain. Thèse Université Paris Est, <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01703864>.

Lipeme Kouyi, G., Barraud, S., Becouze-Lareure, C., Blaha, D., Perrodin, Y., Wiest, L. et Bernardin-Souibgui, C. (2018). Caractérisation des sédiments d'un bassin de retenue-décantation des eaux pluviales et éléments pour la gestion. Techniques Sciences Méthodes (9), 65-75.

Analyse de cycle de vie :

Lerey, S. (2019). Livrables 4.a, b, c et d Roulépur – Rapports d'ACV.



ENJEU 3 - Préserver l'état écologique des milieux récepteurs

L'urbanisation modifie la quantité et la qualité du ruissellement, ce qui peut nuire aux écosystèmes des milieux récepteurs, superficiels ou souterrains. En effet, l'imperméabilisation des surfaces induit un accroissement du volume ruisselé et sa concentration dans le temps et dans l'espace, ce qui peut modifier l'hydromorphologie des cours d'eau, notamment dans les bassins versants urbains. Ces modifications sont caractérisées par une augmentation du débit des cours d'eau pendant ou immédiatement après un événement pluvieux, menant potentiellement à la modification des habitats (les berges ou les lits de rivière par incision ou ensablement) de la faune et la flore, et par une baisse de débit en période d'étiage du fait d'un écoulement de base (l'alimentation par les eaux souterraines) non-assuré.

Les volumes ruisselés plus importants, combinés à la dégradation de la qualité des eaux de ruissellement, amplifient le transfert des flux polluants vers les milieux récepteurs, ce qui peut compromettre leur bon état chimique et/ou écologique.

Les ouvrages de gestion à la source peuvent de par leur conception participer à l'enjeu de préservation de l'état écologique des milieux récepteurs. Ils peuvent alors remplir les fonctions d'usage et de contrainte suivantes.



Fonction d'usage : maîtriser le régime hydrologique

Une première fonction répondant à cet enjeu consiste à maîtriser le régime hydrologique, notamment en limitant le débit de pointe et en assurant le débit d'étiage des cours d'eau.

La limitation du débit de pointe passe généralement par un effet tampon joué par l'OGA grâce à un espace de stockage et/ou par une réduction de volume du fait de l'infiltration de l'eau. Dans une moindre mesure la réduction de volume peut être liée à l'interception par la végétation dans le cas d'ouvrages végétalisés. Un OGA peut potentiellement contribuer à maintenir l'écoulement de base d'un cours d'eau. Cependant, la transformation de l'eau infiltrée en débit d'étiage du cours d'eau dépend de facteurs particuliers du site (géologie) et de son climat (évapotranspiration par exemple).

Fonction d'usage : maîtriser les flux polluants

Les OGA peuvent également contribuer à protéger les écosystèmes par la fonction « maîtriser les flux polluants » vers les milieux récepteurs. Cette maîtrise passe par la limitation des volumes rejetés, ainsi que l'aptitude des OGA à participer au traitement de l'eau pluviale.

Fonction de contrainte : maintenir le potentiel de biodiversité du sol

Lorsqu'un OGA utilise un substrat pour la gestion de l'eau, la rétention du flux polluant implique une contamination de celui-ci. Cet anthroposol est un support d'une biodiversité lui permettant de fournir différents services écosystémiques. Une fonction des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales est de maintenir le potentiel de biodiversité du sol dont l'ouvrage est composé. Cela implique une gestion du sol limitant le cumul de polluants écotoxiques et maintenant un potentiel agronomique apte à la fertilité (voir fonction « préserver la valeur agronomique des sols »).

Pour ce qui est de la biodiversité liée à la flore, les études ont montré que les anthroposols des fonds de bassins d'infiltration peuvent être riches en biodiversité (vers de terre...). Les graines peuvent être apportées soit par voie atmosphérique (vent), soit par les apports d'eau. Les conditions régnant dans les bassins par exemple (lumière, apports hydriques et apports de nutriments par les eaux pluviales) suffisent à une colonisation spontanée par les plantes. Les bassins d'infiltration de l'Est lyonnais étudiés lors du projet FAFF GESOL par exemple présentent une grande hétérogénéité, tant au niveau de la surface d'occupation (de 5 à 95 %) qu'au niveau de la diversité des espèces présentes. Cette biodiversité peut être également implantée et maintenue (noue végétalisée, jardin de pluie par exemple).

La biodiversité liée à la faune est aujourd'hui de plus en plus étudiée pour ses bienfaits. La présence de lombrics par exemple dans les sols peut jouer un rôle favorable dans le maintien de la perméabilité (formation de galeries) mais aussi dans la croissance ou le développement végétal limitant le colmatage.

3

POUR ALLER PLUS LOIN

Saulais, M. (2011). Colonisation végétale des bassins d'infiltration et de rétention: caractérisation de la flore et évolution des caractéristiques physico-chimiques de l'horizon de surface végétalisé. Thèse INSA de Lyon. HAL Id : tel-00715802.

Goutaland, D., Winiarski, T., Lassabatere, L., Dubé, J. S. et Angulo-Jaramillo, R. (2013). Sedimentary and hydraulic characterization of a heterogeneous glaciofluvial deposit: Application to the modeling of unsaturated flow. *Engineering geology* 166, 127-139.

Goutaland D., Roux G. et Winiarski T. Les ouvrages d'infiltration : la fonction filtration. Recommandations à l'usage des gestionnaires - Projet FAFF GESOL <http://www.gessol.fr/sites/default/files/Gessol-ouvrages-infiltration-web.pdf> (consulté le 20/12/2019).

4

ENJEU 4 - Protéger les milieux construits

Les ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales sont susceptibles de créer des désordres associés aux milieux construits dans certains cas. En effet, l'infiltration de l'eau souvent associée aux OGA fait parfois craindre des désordres géotechniques et hydrogéologiques. En outre, la modification des débits et des volumes de ruissellement arrivant dans les systèmes d'assainissement existants peut provoquer des dysfonctionnements. Ainsi, on doit construire les OGA afin de limiter ces risques.



Fonction de contrainte : limiter les désordres géotechniques et hydrogéologiques

Dans certains contextes géologiques, en particulier lorsque le sol est composé de gypse, l'infiltration peut mener à une dissolution des sols et des problèmes de stabilité du milieu construit. C'est notamment vrai pour des infiltrations localisées type puits d'infiltration, bassins... Pour des ouvrages plus diffus le risque est évidemment moindre. Certains types d'argiles peuvent subir des phénomènes de retrait / gonflement liés à la variabilité de la teneur en eau. Il faut dans ce cas veiller à ce que les ouvrages qui ont dû être conçus en intégrant ces aspects restent stables. Pour les OGA construits, l'analyse visuelle lorsque les dispositifs sont superficiels peut permettre d'identifier des déformations structurelles. Il existe par ailleurs pour certains d'entre eux des tests de déformation (par exemple test à la poutre de Benkelman pour les chaussées à structure réservoir). Lors de l'implantation d'OGA, il faudra veiller à la présence éventuelle de sols peu perméables en profondeur qui pourraient nuire à l'évacuation des eaux infiltrées et générer des désordres (de type inondation de cave) lors de pluies longues en hiver.



Fonction de contrainte : prévenir le dysfonctionnement des systèmes d'assainissement existants

Les ouvrages de gestion à la source peuvent améliorer le fonctionnement des réseaux d'assainissement en réduisant la fréquence de la surcharge de ceux-ci et donc les déversements par les déversoirs d'orage. En revanche, si la gestion à la source des eaux pluviales est généralisée, la réduction des débits peut également limiter l'effet d'autocurage dans les réseaux d'assainissement, ce qui peut créer des dysfonctionnements à terme (dépôt et formation de gaz par exemple). De plus, l'infiltration de l'eau à grande échelle pourrait également avoir pour effet d'augmenter la quantité des eaux parasites dans le réseau, en lien avec des potentielles remontées de la nappe.

4

POUR ALLER PLUS LOIN (sur les règles constructives)

Azzout, Y., Barraud, S., Cres, F.N. et Alfakih, E. (1994). Techniques alternatives en assainissement pluvial. Choix, conception, réalisation et entretien, Lavoisier-Tec. et Doc. ed., Paris, 372 pages.

5

ENJEU 5 - Favoriser la qualité des environnements urbains

Contrairement aux systèmes d'assainissement traditionnels qui sont généralement invisibles, les OGA se situent souvent au cœur des zones habitées. Ainsi, ils peuvent contribuer à favoriser la qualité de ces environnements urbains à travers diverses fonctions. Les OGA peuvent notamment avoir les fonctions d'usage suivantes : favoriser le confort thermique, s'intégrer dans le projet urbain et favoriser de multiples usages, accueillir la biodiversité. En revanche, la proximité de ces ouvrages implique des fonctions de contrainte afin de ne pas dégrader la qualité de l'environnement urbain comme la limitation de l'exposition humaine à la pollution, la prévention des mésusages, des pratiques déqualifiantes et la limitation des nuisances associées à la faune et la flore.

Fonction d'usage : favoriser le confort thermique

Les ouvrages de gestion à la source peuvent contribuer à **favoriser le confort thermique** en milieu urbain. En effet, en raison des propriétés thermiques des surfaces minérales urbaines et de la production de chaleur anthropogénique, les zones urbaines peuvent présenter des températures plus élevées que les zones naturelles environnantes, phénomène connu de l'îlot de chaleur urbain. Les ouvrages de gestion à la source végétalisés peuvent contribuer à réduire l'îlot de chaleur urbain dans le sens où ils favorisent l'évapotranspiration et même la création d'îlots de fraîcheur. En outre, lorsque les OGA sont intégrés dans des bâtiments (par exemple, les toitures végétalisées), ils peuvent jouer un rôle d'isolation, ce qui peut augmenter le confort thermique et réduire la consommation en énergie pour la climatisation. Leur contribution réelle est à l'heure actuelle encore à l'étude.

Fonction de contrainte : limiter l'exposition humaine à la pollution

Les ouvrages de gestion à la source ont souvent un objectif d'interception de la pollution transportée par les eaux de ruissellement. Lorsque les ouvrages de gestion à la source se situent dans l'espace habité et surtout quand on envisage d'autres usages de l'espace hors période de pluie, il peut y avoir exposition humaine à la pollution. Il faut relativiser ce risque en soulignant que le ruissellement urbain contient des polluants qui ont été mobilisés depuis les surfaces urbaines et donc qui sont déjà présents dans l'environnement urbain. Néanmoins, il est important que la fréquentation et l'utilisation de l'OGA soient en adéquation avec les niveaux de pollutions attendus. Par exemple, il ne serait pas judicieux d'installer un square avec des aires de repos dans une zone qui reçoit fréquemment des eaux de ruissellement de voirie.

POUR ALLER PLUS LOIN (sur le confort thermique et l'évapotranspiration)

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M. et Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning* 97(3), 147-155.

De Munck, C. (2013). Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville Thèse École doctorale Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace (Toulouse), 159341302.

Shafique, M., Kim, R. et Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90, 757-773.

Fonction d'usage : s'intégrer dans le projet urbain et favoriser des usages multiples

Un ouvrage de gestion à la source des eaux pluviales se distingue d'autres techniques de gestion des eaux pluviales par le fait qu'il peut remplir d'autres fonctions d'usage dans le projet urbain. Si elle peut complexifier la conception, la multiplicité des usages est souvent une garantie de pérennité et de bon entretien des ouvrages sur le long terme. Leur multifonctionnalité peut contribuer à ce que la puissance publique ou le propriétaire privé « n'oublie pas » leur existence.

Outre son fort potentiel de valorisation paysagère, un ouvrage de gestion à la source des eaux pluviales peut assurer d'autres fonctions dans le projet urbain comme des fonctions récréatives (aire de jeu) ou de mobilité (voie piétonne, cycliste ou automobile, chaussées perméables). Dans la mesure où ces fonctions sont rendues compatibles avec les fonctions

hydrologiques de l'ouvrage, elles sont souhaitables car elles permettent de valoriser le foncier dédié à la gestion à la source et ainsi de contribuer là encore à la pérennité de l'ouvrage.

Il est important de considérer que les différents espaces du projet urbain, et donc les différents usages qui s'y déploient, évoluent dans le temps. Cette évolution est parfois prévisible au moment de l'aménagement d'un ouvrage de gestion à la source (par exemple, un ouvrage de gestion à la source recueillant les eaux d'une voirie qui dessert une zone de logements qu'on a prévu de construire dans un futur plus ou moins proche). Au contraire, cette évolution est parfois difficile à anticiper (par exemple, un projet urbain au cours duquel certaines zones vont être réaffectées à d'autres usages ou dans le cas de figure d'un bassin versant déjà aménagé qui subit une imperméabilisation plus importante que celle prévue au départ).

Pour assurer la pérennité des fonctions de l'ouvrage (par exemple hydrologiques et paysagères), il est important que l'aménageur anticipe la nature des constructions prévues dans la zone autour de l'ouvrage (dans un périmètre qui excède le projet d'aménagement) et pense à la lisibilité de l'ouvrage dans ce contexte. L'exigence de qualité paysagère, et donc le type de dispositif le plus adéquat, dépend en effet des futurs résidents ou usagers (elle n'est pas la même pour une zone commerciale ou une zone résidentielle). De même, il convient d'anticiper autant que faire se peut l'évolution possible et probable du ruissellement liée aux formes urbaines du projet urbain (par exemple, on peut anticiper une tendance à l'imperméabilisation non contrôlée ou à la densification d'un quartier pavillonnaire en fonction de contraintes imposées par un plan local d'urbanisme). Il conviendra autant que possible de penser la flexibilité des ouvrages dès lors qu'il existe une probabilité d'extension ou de densification des territoires à aménager.

6

POUR ALLER PLUS LOIN

Seidl, M. (dir.) (2019), Aménager la ville avec l'eau, pour une meilleure résilience face aux changements globaux, Presses des Ponts, décembre 2019, 300 pages.

(a) Maytraud, T. La gestion des eaux pluviales en milieu urbain, des années 1990 à aujourd'hui. Les enjeux de demain, pp. 17-36.

(b) Piel, C. Réactiver la nature en ville. L'eau, une clé d'entrée technique, juridique et financière, pp. 37-54.

(c) Deroubaix, J-F. La fabrique de la ville rattrapée par les eaux pluviales ? Analyse rétrospective de deux grands projets urbains en région parisienne, pp. 55- 79.



Fonction de contrainte : prévenir les mésusages et les pratiques « déqualifiantes »

Cette fonction est relative aux conditions d'appropriation de l'ouvrage par les riverains, les usagers ou le grand public. Les interactions humaines avec les ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales peuvent en effet poser des problèmes de fonctionnement en lien avec leur acceptation.

Le mésusage désigne une interaction avec l'ouvrage qui, en raison de l'utilisation qu'en fait l'utilisateur, conduit à une dégradation de son fonctionnement hydrologique et plus globalement de ses fonctions techniques. On peut citer l'exemple d'une noue au cœur d'un lotissement, traversant diverses propriétés soumises à une servitude d'accès et dont l'écoulement va être perturbé par la clôture « sauvage » installée par l'un des copropriétaires. L'écoulement superficiel de la noue, dont le riverain n'a pas idée de la fonction de drainage, se trouve perturbé entraînant des inondations dans le voisinage.

On peut citer aussi les observations *in situ* qui ont été menées sur le site de l'Ecocampus Lyon Tech La Doua qui indiquent que le manque de lisibilité ou de compréhension des dispositifs peut être effectivement préjudiciable. Lors d'épisodes de chantier par exemple (rénovation des bâtiments du campus) une noue végétalisée est considérée comme une simple pelouse et donc parcourue par les engins alors que la même noue située au voisinage, mais présentant une surface en galets est respectée. L'une n'est pas identifiée comme un ouvrage. La deuxième « ressemble » davantage à un ouvrage et fait l'objet d'un soin plus important.

Ce type de problème peut être évité si les fonctions hydrologiques sont lisibles. La lisibilité peut être inscrite dans la forme même du dispositif, mais elle peut aussi passer par des éléments techniques qui signalent le fonctionnement de l'ouvrage ou par des actions de communication (panneaux explicatifs, réunions publiques). Cependant, il est important de retenir que les actions de communication ponctuelles (notamment lors de la livraison de certaines opérations immobilières d'envergure) n'auront pas un effet pérenne, *a fortiori* si la population se renouvelle. Des actions plus pérennes comme l'installation de panneaux « en dur » à proximité des ouvrages peuvent être plus pertinentes pour informer durablement les riverains.

Les pratiques « déqualifiantes », désignent les pratiques de certains usagers dans l'espace environnant de l'ouvrage que d'autres usagers ou le grand public considèrent comme « déviantes » (miction, abandon de déchets et de déjections canines, pratique sauvage d'engins motorisés...). Ces pratiques « déviantes » compromettent l'appropriation de l'ouvrage pour des usages initialement prévus par son concepteur. Nous qualifions ces pratiques de « déqualifiantes » car elles génèrent chez certains usagers une aversion pour l'ouvrage et son environnement.

Mésusages et pratiques déqualifiantes peuvent se combiner. Un exemple de ce type de dysfonctionnement est observable au sein du parc Bourlione (Corbas), espace combinant initialement des fonctions de gestion des eaux pluviales et de récréation. Nombre d'usagers du parc qui ne pensent pas aux fonctions hydrologiques de l'espace et considèrent certains éléments en eau comme dangereux sont dans une posture de défiance vis-à-vis des gestionnaires du parc. Cette défiance se traduit notamment par l'abandon de déchets conduisant à une fuite des autres usagers et donc à une véritable déqualification sociale de l'espace public. Le réaménagement de certains éléments (remodelage paysager des bassins de rétention, de traitement et d'infiltration) et la mise en œuvre d'actions de communication plus ou moins permanentes a permis de « normaliser » les différents usages du parc.

Des actions de sensibilisation, ainsi qu'une plus grande adéquation de l'espace aux attentes des utilisateurs (ce qui implique une concertation avec ceux-ci dès la conception de l'ouvrage), peuvent donc contribuer à éviter ce type de problème.



Fonction de contrainte : limiter les nuisances liées à la faune et la flore

Il se peut que l'arrivée d'espèces faunistiques ou floristiques indésirables au sein d'un ouvrage de gestion à la source engendrent des nuisances pour les usagers, les riverains ou les agents chargés de l'entretien. Ces nuisances, généralement des externalités non prévues à l'origine, peuvent mener à des problèmes d'acceptation des ouvrages, ce qui peut entraîner des pratiques déqualifiantes ou des performances moindres. Ainsi, lorsque ces problèmes arrivent, il est important qu'ils soient bien gérés.

Par exemple, ces ouvrages peuvent accueillir un certain nombre de plantes au caractère allergisant (par ex. *phalaris arundinacea*) ou invasives (renouée du Japon) qui peuvent être gênantes pour les riverains et les agents dédiés à l'entretien de ces espaces.

Les nuisances peuvent relever de la crainte plus que la réalité. Par exemple une espèce particulièrement problématique est le moustique qui se développe en eau stagnante et peut être un vecteur de maladies (moustique tigre *Aedes albopictus* par exemple). Les moustiques utilisent une large gamme d'habitats tant que ceux-ci conservent de l'eau stagnante à minima 5 jours (pour de nombreuses espèces). Le risque de propagation de moustiques peut être géré en s'assurant que l'espace de stockage à la surface est rapidement drainé (< 5 jours) pour ne pas permettre de développement larvaire. Une étude récente a montré que le risque de propagation de moustiques tigres est très faible pour les ouvrages de gestion à la source végétalisés, alors qu'il est plus élevé pour les systèmes d'assainissement traditionnels, notamment lié aux regards de visite.

Fonction d'usage : accueillir la biodiversité

Les ouvrages de gestion à la source végétalisés peuvent servir d'habitats permettant d'accueillir la biodiversité en milieu urbain. La protection de la biodiversité est une fin en soi et peut également être associée à des services écosystémiques.

Cependant, il peut y avoir une tension entre la fonction de service d'accueillir la biodiversité et la fonction de contrainte de limiter les nuisances liées à la faune et la flore. La biodiversité peut également entrer en conflit avec les conditions d'entretien et de maintenance du dispositif. Par exemple, lorsqu'une espèce protégée est constatée, les opérations de fauchage ou de curage peuvent être contraintes.

La fonction d'accueillir la biodiversité est parfois planifiée au moment de la conception de l'ouvrage, mais même quand ce n'est pas le cas, la biodiversité peut être constatée *a posteriori*.

POUR ALLER PLUS LOIN

Ah-Leung, S. (2017). Les objets de nature : quelles places dans la ville ? Conditions d'appropriation des dispositifs de gestion des eaux pluviales de la métropole lyonnaise. Thèse Université de Lyon.

Valdelfener, M., Sibeud, E., Bacot, L., Besnard, G., Rozier, Y., Barraud, S. et Marmonier, P. (2018). Développement de peuplements de moustiques (Diptera, Culicidae) dans des ouvrages de techniques alternatives de gestion des eaux pluviales-Exemple de la Métropole de Lyon. Techniques Sciences Méthodes (4), 55-71.

ENJEU 6 - Faire preuve d'une gestion efficace aujourd'hui et demain

Au-delà de l'adéquation technique d'un ouvrage de gestion à la source à répondre aux enjeux environnementaux associés, une gestion efficace des processus de planification, de conception et d'exploitation est essentielle. Différents aspects sont à prendre en compte notamment pour : assurer la pérennité du fonctionnement de l'ouvrage, l'optimisation des coûts associés, la valorisation des retours d'expériences et la valorisation à des fins pédagogiques ou de communication.

Fonction de contrainte : faciliter l'entretien et la maintenance

Puisque l'ouvrage existe, si l'on veut qu'il continue à fonctionner, il est nécessaire qu'il soit bien entretenu et maintenu. L'entretien désigne les opérations courantes de nettoyage, de fauchage, etc., alors que la maintenance désigne l'ensemble des opérations ponctuelles sur la structure de l'ouvrage, comme par exemple le décolmatage d'une noue ou le dérasement des accotements à une fréquence déterminée.

Un défaut d'entretien ou de maintenance peut mener à une défaillance d'un ouvrage dont la conception technique est pourtant appropriée. Il est important de faciliter l'entretien et la maintenance par la prise en compte de ces deux aspects dès la conception de l'ouvrage. Cela peut se faire à travers l'établissement d'un cahier des charges d'entretien au moment de sa mise en œuvre. Cependant, ces éléments ne suffisent pas pour garantir la bonne exécution des tâches.

Les nouvelles activités d'entretien liées aux ouvrages de gestion à la source se traduisent, selon les services concernés, par un surcroît de travail, ainsi qu'un coût d'apprentissage et d'équipement. À défaut de moyens supplémentaires alloués, l'entretien risque de ne pas être effectué avec toute la rigueur nécessaire.

L'organisation du travail de maintenance est également rendue difficile par la multitude de structures et d'acteurs impliqués (les services d'assainissement, de nettoyage, de voirie, d'espaces verts), qui tous possèdent leur propre culture professionnelle, leurs échelles de valeurs et leurs propres représentations de l'excellence professionnelle.

L'implication de tous ces services, ainsi que de tous les niveaux hiérarchiques au sein des services, dès la conception de l'ouvrage dans le développement d'un cahier des charges pour l'entretien et la maintenance peut favoriser la coordination inter et intra-services. La situation idéale est une situation dans laquelle les services chargés de l'entretien et de la maintenance sont impliqués dans le design même de l'ouvrage et peuvent ainsi en comprendre ses fonctions et y intégrer les contraintes liées à leur activité (accessibilité, acheminement du matériel, réduction de la pénibilité des tâches effectuées).

Le développement d'un métier spécifique lié à la construction et la maintenance des ouvrages de gestion à la source peut également contribuer à faciliter l'entretien de ces systèmes. Ce type d'approche est proposé et formalisé outre-Atlantique à travers un programme national de formation et de certification (*National Green Infrastructure Certification Program*).

Fonction d'usage : servir de démonstrateur

Un ouvrage de gestion à la source peut parfois avoir un rôle de démonstrateur visant à promouvoir les techniques alternatives et/ou un type de technique particulier utilisé. Cette fonction suppose une forme d'exemplarité de l'ouvrage et la conduite d'actions de communication permettant de montrer l'exemplarité de l'ouvrage. On peut distinguer les démonstrateurs techniques, qui visent à montrer l'intérêt d'une technique de gestion à la source à des professionnels, et les démonstrateurs pédagogiques qui visent à sensibiliser le public aux questions de gestion de l'eau ou de l'environnement.

Dans le premier cas, il est important d'évaluer les performances de l'ouvrage pour toutes les fonctions de service affirmées. Si l'ouvrage doit servir à inspirer d'autres aménageurs, il est essentiel d'avoir un retour d'expérience réel sur l'ouvrage pour ne pas propager des techniques bien intentionnées mais inefficaces. La construction de la communication autour du démonstrateur est une opération délicate (pour le concepteur ou le propriétaire de l'ouvrage) dans la mesure où le suivi peut conduire à mettre en évidence des performances non optimales. Il convient de construire un discours qui permette d'expliquer la « relativité » de ces performances en fonction des contraintes territoriales ou organisationnelles (topographie problématique, rareté des ressources financières ou de main d'œuvre...).

La communication sur l'ouvrage peut être déployée à travers différentes actions de sensibilisation : panneau explicatif, réunion publique dès l'amont de la réalisation des aménagements, suivi dans le temps, visites guidées, ateliers, communications dans des conférences ou des journées techniques, maquettes permettant de se représenter le

système en fonctionnement, jeux. Sur l'Ecocampus Lyon Tech La Doua par exemple, des documents de sensibilisation du grand public ont été développés avec un parcours dédié et autonome ou via des animations dans le cadre de « science en fête ». Cependant, si les efforts ont été faits pour le grand public, les enquêtes menées auprès des usagers et des personnels techniques du campus dans le cadre du projet MicroMegas montre que les gestionnaires (et les chercheurs du campus) ont manqué une cible majeure dans leur sensibilisation. Le passage d'une gestion des eaux pluviales centralisée par un réseau enterré à une gestion alternative est passée complètement inaperçue pour les personnels en charge de l'entretien et pour les usagers. Une signalétique pérenne en plus des actions ponctuelles de sensibilisation pourrait être une piste pour remédier à ce manque de visibilité auprès des usagers et acteurs techniques du campus.



Fonction de contrainte : optimiser les coûts

Puisque le choix d'un ouvrage est conditionné par le contexte urbain, les critères économiques ne peuvent pas souvent être utilisés comme critères de choix. On peut néanmoins comparer les types de dépenses : les coûts d'investissement pour la gestion des eaux pluviales (lorsque l'ouvrage remplit d'autres fonctions, il convient de prendre en compte uniquement le surcoût lié à la gestion des eaux pluviales, ce qui complexifie généralement les études économiques) et les coûts d'entretien et de maintenance. L'optimisation des coûts est entendue ici au sens de la multifonctionnalité (plusieurs fonctions permettant d'optimiser les coûts).

Les coûts d'entretien et de maintenance sont difficiles à prévoir à l'avance car ils sont spécifiques aux contraintes du site ; il convient néanmoins d'anticiper les variations de ces coûts en fonction du temps et du degré de technicité. Il existe également des ordres de grandeur des coûts mais qui restent très approximatifs et trop sites dépendants pour être utilisés tels quels. On pourra plutôt les estimer au coup par coup via les recommandations d'entretien que l'on trouve dans différents documents édités par les collectivités. Ces coûts peuvent être contrebalancés par des aménités planifiées ou pas. Lorsque certaines aménités non planifiées sont constatées, il faut veiller à prendre en compte les coûts d'entretien et de maintenance induits (même si les coûts induits ne sont pas toujours faciles à calculer).



Fonction de contrainte : assurer la cohérence entre les espaces publics et privés

Dans le cadre de projets urbains de moyenne ou de grande échelle, il est fréquent de constater des dysfonctionnements des dispositifs résultant d'une mutualisation mal maîtrisée de la gestion des eaux pluviales dans les espaces publics et dans les espaces privés. En effet, ces espaces étant gérés par différents acteurs, comme c'est le cas dans de nombreuses ZAC et dans de nombreuses métropoles régionales, la coordination entre les deux types d'espaces n'est pas évidente. Il convient donc si l'on veut préserver les fonctions techniques du dispositif de s'assurer d'une conception cohérente et coordonnée des ouvrages et d'envisager les risques de dysfonctionnements en cascade (induits par la mutualisation des ouvrages privés et publics). Ce risque de dysfonctionnement de la chaîne suppose que des procédures d'entretien et de maintenance aient été ajustées sur la chaîne d'ouvrages.

3. Indicateurs de performances et méthodes d'évaluation



Indicateurs

Les projets Matriochkas, MicroMegas et Roulépur ont étudié une partie des fonctions présentées dans la section précédente (fonctions indiquées dans le Tableau 2). Nous ne présentons donc dans ce chapitre que les indicateurs de performance en lien avec ces fonctions. Les indicateurs servent à évaluer *a posteriori* la performance d'un ouvrage vis-à-vis de chacune de ces fonctions.

3.1 Qu'est-ce qu'un indicateur et comment l'appliquer ?

Un indicateur est une représentation synthétique d'information permettant la communication, l'évaluation et/ou la prise de décision. Un indicateur de performance doit pouvoir communiquer une tendance par rapport à une fonction de service de l'ouvrage, ce qui le distingue d'un simple paramètre mesuré. Ainsi, il permet de faire le lien entre la tendance observée et un jugement de la performance (Moura, 2008). Il s'applique sur un système évalué donné. Le calcul de cet indicateur peut notamment s'appuyer sur un réseau de mesures permettant d'acquérir les données nécessaires.

3.1.1 Types d'indicateurs

Quatre types d'indicateurs peuvent être définis, selon la nature et l'objectif de l'évaluation. Un indicateur **normatif** compare la grandeur évaluée à un niveau considéré comme acceptable (par exemple, un référentiel réglementaire, normatif, usuel...). Un indicateur **relatif** compare la valeur d'une grandeur après ou avec l'effet de l'ouvrage à la valeur de cette grandeur avant ou sans l'effet de l'ouvrage (par exemple un abattement de débit, de volume, de flux polluant ou de concentration). Un indicateur **descriptif** permet de décrire le fonctionnement de l'ouvrage, dans l'objectif de comparer le fonctionnement de différents ouvrages ou types d'aménagement entre eux. Ce type d'indicateur peut être une grandeur mesurée en absolu ou normalisée par rapport à un facteur de l'environnement supposé influencer sa valeur sans que cela reflète la performance de l'ouvrage (par exemple, une masse de polluant par unité de surface active du bassin versant).

Enfin, un indicateur **explicatif** permet de décrire un aspect du fonctionnement qui pourrait expliquer une performance observée. Ce type d'indicateur peut aider à comprendre les niveaux de performance observés ou, si on arrive à établir un lien entre cet indicateur et une performance pour un ouvrage donné, être employé pour estimer indirectement la performance.



INDICATEURS
d'évaluation
des fonctions de service

NORMATIF

RELATIF

DESSCRIPTIF

EXPLICATIF

Les indicateurs se différencient également par l'échelle de temps à laquelle ils sont évalués. Par exemple, les indicateurs hydrologiques et relatifs aux polluants peuvent être évalués :

- à l'échelle de l'événement pluvieux (lorsque plusieurs événements sont caractérisés, plusieurs valeurs sont générées ; ces valeurs peuvent être comparées entre événements ou leur distribution peut être estimée pour décrire la performance de l'ouvrage de façon synthétique) ;
- à l'échelle inter-événementielle (l'indicateur requiert les données issues de plusieurs événements pluvieux pour pouvoir être évalué, mais ces événements ne doivent pas obligatoirement être continus) ;
- ou à une échelle annuelle intégrée (l'indicateur requiert des mesures ou des estimations de la grandeur considérée pour l'ensemble d'événements dans la période).

Le choix de l'échelle de temps dépend de l'objectif de l'évaluation.

Par exemple, si on cherche à avoir une valeur unique traduisant l'effet généralisé d'un ouvrage, l'échelle annuelle intégrée est la plus adaptée, alors que l'échelle événementielle permet de caractériser la performance pour les conditions particulières d'un événement.

3.1.2 Définition du système évalué et des données à acquérir

Un indicateur est toujours estimé par rapport à un *système défini* dont on veut évaluer les performances – ce système doit être cohérent avec les fonctions recherchées par l'ouvrage. Le choix du système évalué est un prérequis du dispositif d'investigation à mettre en place car il détermine les données ou les informations devant être caractérisées et où elles doivent être mesurées.

Le système évalué peut être, par exemple, l'ouvrage à proprement parler ou l'aménagement entier comprenant l'ouvrage et le dispositif sociotechnique dans lequel s'inscrit l'ouvrage.

En fonction du type de performance que l'on souhaite caractériser, il peut être nécessaire d'acquérir différents types de données, par exemple, des mesures de débit et de volume d'eau, des mesures de concentrations ou de teneurs en polluants ou des informations issues d'entretiens ou d'enquêtes auprès des acteurs concernés par l'ouvrage.

3.1.3 Cas de la mise en place d'un dispositif d'investigation

Une fois identifié le type de performance que l'on souhaite évaluer, le système par rapport auquel la performance sera évaluée et les indicateurs possibles, il est nécessaire de mettre en place un dispositif d'investigation afin d'obtenir les données nécessaires. Parmi les dispositifs d'investigation figure l'*observation in situ*. Pour les 3 projets et pour ce qui concerne la performance hydrologique et épuratoire des ouvrages, c'est ce dispositif qui a été mis en œuvre de façon prioritaire. Pour ce qui concerne les aspects socio-techniques, les dispositifs sont plus variés : enquêtes, questionnaires, entretiens, analyse de corpus de texte, observation visuelle directe.

Il est parfois difficile d'obtenir les données que l'on souhaite acquérir, car il est souvent difficile d'instrumenter un ouvrage dont le suivi n'a pas été prévu dès sa conception. L'établissement des objectifs pour l'évaluation des performances doit suivre un processus itératif en lien avec la mise en place du dispositif d'observation (Figure 3).

Après le choix initial des indicateurs à évaluer, l'identification du système évalué et avant de mettre en place le dispositif d'observation, il faut considérer *a priori* la faisabilité du dispositif pour obtenir ces données nécessaires (Encadré 1 - *La faisabilité de la mesure*). Dans certains cas, le suivi des performances peut s'avérer complètement infaisable et doit être abandonné. Dans d'autres cas, on peut limiter les ambitions du suivi, en réajustant le choix des indicateurs à évaluer pour arriver à un dispositif d'observation *a priori* faisable.

Une fois le dispositif d'observation en place, on peut également se rendre compte *a posteriori* de l'impossibilité à obtenir les mesures nécessaires (par exemple, du fait de

pannes de matériels de mesure, d'une invalidation des mesures, de la difficulté d'obtenir des échantillons du fait de manque de pluie ou du manque d'écoulements en sortie d'ouvrage). Ainsi, on peut être amené à réajuster le choix des indicateurs en fonction des données que l'on arrive réellement à acquérir.

ENCADRÉ 1

LA FAISABILITÉ DE LA MESURE

Avant de s'engager à mener une campagne de mesures ou à instrumenter en continu un point de mesure, il est essentiel de considérer la faisabilité du programme de mesures prévu. On recommande ainsi de considérer la configuration de l'ouvrage, les moyens économiques et matériels (qui doivent considérer les équipements du dispositif métrologique, ainsi que le coût d'analyses chimiques ou biologiques éventuelles), la faisabilité organisationnelle (par exemple, les conditions d'accès à l'ouvrage et aux équipements nécessaires), ainsi que les ressources humaines disponibles.

Dans le cas de mesures de polluants à l'échelle de l'événement pluvieux, il est généralement nécessaire d'avoir du personnel disponible en continu, puisque ce type de campagne ne peut pas être prévu à l'avance du fait de sa dépendance aux conditions météorologiques. Des ressources humaines doivent également être prévues pour entretenir et vérifier régulièrement les équipements de mesure en continu (par exemple, pluviomètres, débitmètres ou sondes multiparamètres de la qualité de l'eau), ainsi que pour la validation et l'exploitation des données issues du suivi.

Dans certains cas, une évaluation rigoureuse des performances peut s'avérer impossible étant donné les moyens disponibles. Dans ces cas, il est préférable de ne pas effectuer une évaluation des performances et de ne pas dépenser des ressources qui ne permettraient pas d'avoir des résultats fiables. On note aussi que la faisabilité peut être difficile à aborder à l'avance.

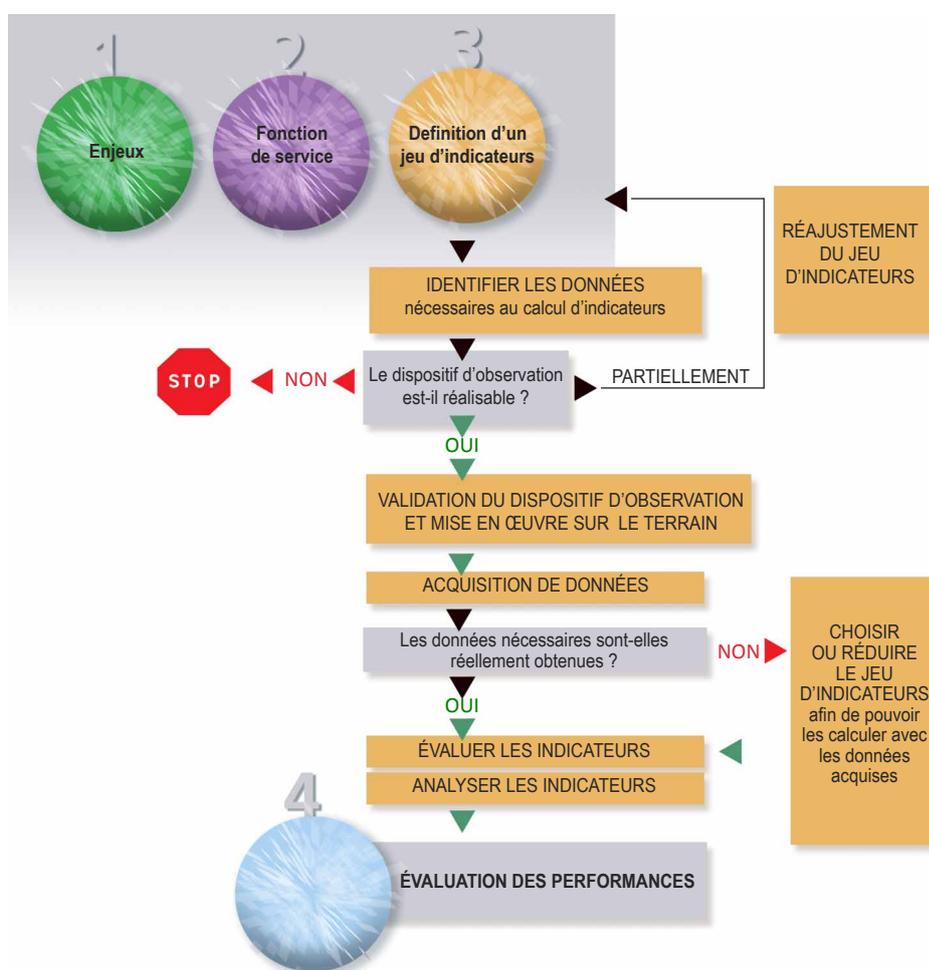


Figure 3. Logigramme pour le choix d'indicateurs.

3.2 Fonctions traitées dans ce guide

Les fonctions étudiées dans le cadre des projets Matriochkas, MicroMegs et Roulépur sont regroupées sous trois catégories :

- fonctions hydrologiques (relatives aux flux d'eau) ;
- fonctions relatives aux polluants ;
- fonctions de gestion ou socio-techniques.

Le Tableau 2 présente les fonctions pour lesquelles des indicateurs ont été proposés, les enjeux associés, les catégories d'indicateurs et les codes des indicateurs faisant l'objet d'une fiche détaillée par la suite. On note que certains indicateurs peuvent être utilisés pour plusieurs fonctions.

Tableau 2. Synthèse des indicateurs par fonction et par enjeu

Enjeux	Fonction traitée	Catégorie d'indicateurs	Code des indicateurs	
			Indicateurs de base	Indicateurs complémentaires
Lutter contre les inondations	Accueillir le ruissellement	Hydrologique	HS	HTv
	Écrêter le débit de pointe		HQ, HQf	HDQ, HQDF
	Réduire les volumes ruisselés		HV	HTp, HDQ
Préserver les ressources	Alimenter les ressources en eau	Hydrologique	HV	HTp
Préserver les ressources, Préserver l'état écologique des milieux récepteurs	Maîtriser les flux polluants	Hydrologique, Polluant	PC, PCA, HV, PMA	PM, PG, HS, HTs, HTr, HTv, HTd, PS
Préserver l'état écologique des milieux récepteurs	Maîtriser le régime hydrologique	Hydrologique	HQ, HV, HS	HDQ, HTv, HQDF, HQf
	Maintenir le potentiel de biodiversité du sol	Polluant	PS	
Favoriser la qualité des environnements urbains	Limiter l'exposition aux polluants	Polluant	PS	
Favoriser la qualité des environnements urbains	Accueillir la biodiversité	Gestion ou socio-technique	SB1	
	Limiter les nuisances liées à la faune et la flore		SB2	
	Prévenir les mésusages et les pratiques « déqualifiantes »		SB3	
	S'intégrer dans le projet urbain et favoriser multiples usages		SB4	
Faire preuve d'une gestion efficace aujourd'hui et demain	Faciliter l'entretien et la maintenance	Gestion ou socio-technique	SA1	HTd, HTv
	Prise en compte des coûts d'entretien et de maintenance		SA2	
	Servir de démonstrateur		SA3	
	Assurer la cohérence entre les espaces publics et privés		SA4	

3.3 Indicateurs hydrologiques et relatifs aux polluants

Cette section présente les indicateurs des performances hydrologiques et relatives aux polluants des ouvrages de gestion à la source. Ces indicateurs se basent sur des mesures de débit et/ou de qualité des flux entrant et sortant des ouvrages. Les indicateurs présentés sont de quatre types (normatifs, relatifs, descriptifs et explicatifs).

3.3.1 Délimitation du système évalué et données à acquérir

La majorité des indicateurs hydrologiques et relatifs aux polluants considèrent les flux d'eau et de polluants sortant du système évalué. La définition des indicateurs nécessite d'une part de définir le système évalué, et d'autre part de définir les grandeurs à considérer et de caractériser les chroniques temporelles de ces grandeurs.

Pour ce qui concerne le système évalué, on définit plusieurs entités (Figure 4) :

- le bassin versant d'apport (BV_a), qui est la surface géographique sur laquelle se produit le ruissellement qui parvient à l'ouvrage ;
- l'ouvrage de gestion (OGA), qui reçoit également la pluie directe ;
- le bassin versant total (BV_t), dont la surface est la somme de la surface du bassin versant d'apport et de la surface de l'ouvrage.

Notons que certains ouvrages n'ont pas de bassin versant d'apport (cas d'une chaussée perméable) ; dans ce cas le bassin versant total et l'ouvrage sont confondus.

Pour certains indicateurs et selon l'ouvrage considéré, on pourra considérer l'un ces trois systèmes (BV_a , OGA ou BV_t) ou utiliser plusieurs de ces trois systèmes de façon complémentaire.

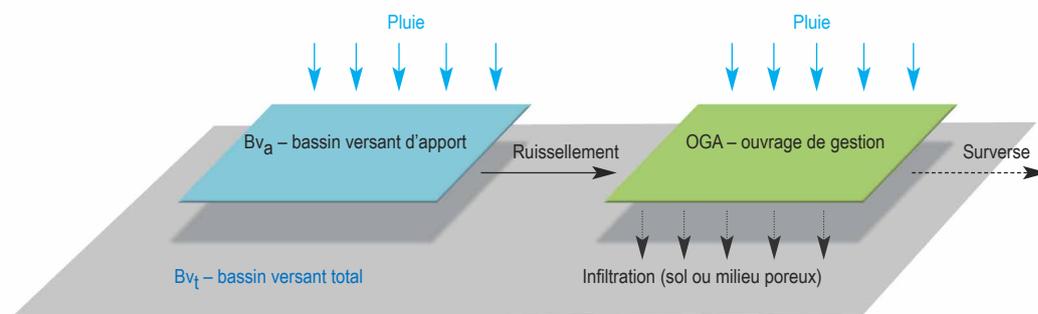


Figure 4. Présentation schématique des systèmes évalués – Cas général.

L'entrée du ruissellement dans le système (« entrée » ou « amont ») peut se faire de différentes façons :

- par une ou plusieurs conduites (exemple : bassin de rétention) ;
- par ruissellement diffus (exemple : noue de voirie) ;
- pour les ouvrages sans bassin versant d'apport (chaussée ou parking perméable), il n'y a pas de ruissellement amont à proprement parler, et l'ouvrage est uniquement alimenté par la pluie. Dans ce cas, on aura souvent recours à une surface de référence pour qualifier le ruissellement en entrée, c'est à dire une surface de même aire située à proximité immédiate de l'ouvrage, que l'on désignera par bassin versant de référence (BV_{ref}).

La sortie du système comprend l'une ou plusieurs des composantes suivantes :

- l'écoulement de surface (ou surverse) ;
- l'écoulement par un drain enterré ;
- l'infiltration vers le sol sous-jacent (exfiltration) ; dans certains cas, pour estimer cette infiltration, on peut avoir recours à un système de drainage (drain ou couche drainante) ;
- l'évapotranspiration peut être considérée également, même si elle sera souvent négligée à l'échelle de l'événement pluvieux.

Ceci peut nécessiter de redéfinir le système étudié pour ce qui concerne l'ouvrage de gestion : le système peut être constitué de l'ouvrage en surface seulement (OGA/surf), pour des ouvrages étanches par exemple, ou de l'ouvrage en surface et de son sol et/ou substrat (OGA/sol), en particulier pour les ouvrages d'infiltration.

Les **grandeurs** considérées pour estimer les indicateurs sont tout d'abord les **flux d'eau** estimés par les débits en entrée et en sortie des systèmes considérés. Les débits enregistrés permettent d'estimer le volume d'eau sur une durée donnée (échelle de l'événement pluvieux ou échelle de la chronique complète), et les débits de pointe (échelle de l'événement pluvieux). Par ailleurs, les **concentrations** des contaminants considérés seront estimées à l'échelle de l'échantillon caractérisant un événement pluvieux ou une partie d'un événement pluvieux, et seront en général caractérisées par des concentrations moyennes événementielles. Les **flux de polluants** peuvent donc être déduits des débits et des concentrations des contaminants à l'échelle des événements pluvieux.

Plusieurs indicateurs nécessitent de délimiter les **événements pluvieux** d'une chronique de débits enregistrés. Une méthode automatique a été utilisée (Encadré 2 - *La séparation de séries de pluie et de débit en événements pluvieux*), elle a été développée au cours de travaux de recherche portant sur le comportement hydrologique des bassins versants urbains.

2

ENCADRÉ

LA SÉPARATION DE SÉRIES DE PLUIE ET DE DÉBIT EN ÉVÉNEMENTS PLUVIEUX

Afin d'étudier les indicateurs de performances à l'échelle événementielle, de réaliser des bilans de masse des polluants, d'identifier les caractéristiques des événements pluvieux, il est nécessaire d'identifier des événements pluvieux indépendants ayant eu lieu sur les ouvrages. Afin de prendre en compte la pluie et ses conséquences sur le débit de l'ouvrage, un événement pluvieux est ici défini par un début de pluie et la fin du débit.

La séparation en événements pluvieux se base sur l'analyse d'une chronique continue de pluie et de débits d'écoulement à un pas de temps constant, Δt , choisi par l'utilisateur. Cette chronique peut être constituée de plusieurs séries de débits d'écoulement enregistrées pour différents ouvrages et soumis à la même pluie.

Pour identifier l'ensemble des événements pluvieux, la chronique temporelle de pluie et des débits est scrutée dans l'ordre chronologique. Il est d'abord cherché le début d'un événement puis sa fin. Le début de l'événement est défini par le début de la pluie. Dès que celle-ci commence, le début de l'événement est déclenché. La fin de l'événement est déterminée par l'arrêt de l'écoulement en sortie, de l'ouvrage ou de tous les ouvrages, s'il y en a plusieurs, ou la fin de la pluie s'il n'y a pas eu d'écoulement. La reconnaissance du début de la pluie et de la fin de l'écoulement nécessite de définir des critères d'identification présentés ci-après.

La sélection du début de l'événement

La chronique de pluie est analysée au pas de temps Δt correspondant au pas de temps des données. Le pas de temps est idéalement adapté à la taille du bassin versant ou à son temps de réponse ; un pas de temps compris entre 3 et 10 min paraît adapté aux surfaces urbaines. Lorsque l'intensité de la pluie est supérieure à une intensité seuil, I_{Seuil} , alors le début de l'événement est identifié à cet instant (Figure 5). Tant que l'intensité de la pluie est supérieure à cette valeur seuil, l'événement continue.

Sélection de la fin de l'événement

Si l'intensité de la pluie pendant un pas de temps Δt devient inférieure à la valeur limite I_{Seuil} alors on scrute la chronique de pluie et de débit sur une période définie, DT_{fin} . Pendant cette période, l'événement est considéré comme terminé si :

a - la hauteur de pluie cumulée, H , sur la période DT_{fin} est inférieure à une hauteur cumulée seuil H_{fin} ; et si,

b - le cumul du débit sur la période DT_{fin} est inférieur à une fraction, $Frac$, du débit cumulé depuis le début de l'événement ou si le débit maximum, sur un pas de temps Δt , pendant DT_{fin} est inférieur à la valeur du débit au début de l'événement.

Si ces conditions ne sont pas obtenues, il est considéré que l'événement continue et on recommence les tests à partir du pas de temps suivant.

La délimitation des événements pluvieux peut se faire avec plusieurs écoulements dans le cas de sorties multiples. Dans ce cas, ce sera l'arrêt du dernier écoulement, selon le critère b ci-dessus, qui marquera la fin de l'événement.

Enfin, une fois les événements identifiés, il est possible de ne conserver que ceux ayant une hauteur de pluie totale supérieure à une valeur choisie H_{tot} . Cette possibilité permet d'éliminer les événements trop faibles, sources d'incertitudes.

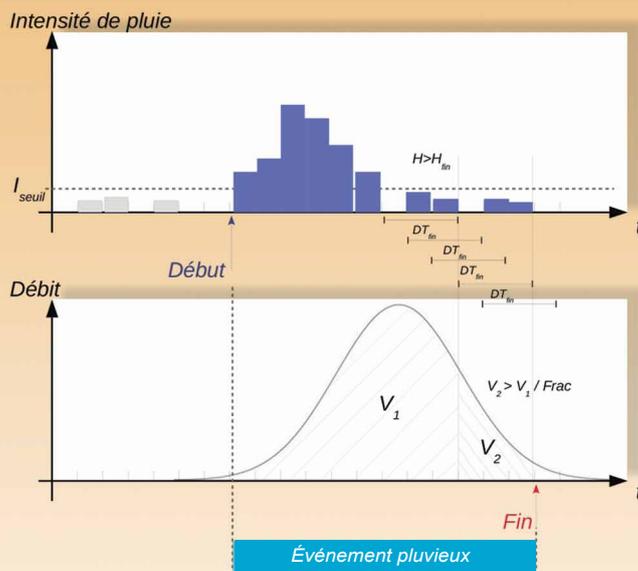


Figure 5. Schéma des étapes de la séparation des événements pluvieux.

Il est nécessaire de prendre en compte un point d'attention sur la détermination de la fin de l'événement. Si la détection du début de l'événement est en général réalisée de façon satisfaisante car basée sur la détection d'un seuil minimum d'intensité pluvieuse, la détection de la fin de l'événement, plutôt basée sur la décroissance du débit (voir ci-dessus paragraphe 2.b), est souvent un point délicat car la décroissance du débit est en général assez lente, d'autant plus lente pour des ouvrages de gestion à la source qui peuvent avoir été conçus pour restituer les flux d'eau pluviale de façon retardée et étalée dans le temps. Le critère de fin préconisé ci-dessus utilise une fraction du débit cumulé de l'événement, mais il est souvent nécessaire de faire une sensibilité à la valeur de cette fraction, pour un site donné, pour obtenir une séparation des événements satisfaisante. Une alternative peut consister à introduire un critère supplémentaire de détermination de fin de l'événement, basé sur l'analyse de la dérivée du débit instantané : lorsque le débit instantané se remet à augmenter en phase de décroissance (changement de signe de la dérivée), la fin de l'événement est déclarée.

8 POUR ALLER PLUS LOIN

Berthier, E. (1999). Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain : élaboration du modèle et première évaluation. Thèse INPG Grenoble.

Ramier, D. (2005). Bilan hydrique des voiries urbaines : observations et modélisation. Thèse Ecole Centrale de Nantes.

3.3.2 Indicateurs hydrologiques

Les indicateurs hydrologiques sont précisés dans le Tableau 3, en détaillant les avantages et les inconvénients de chaque indicateur.

Tableau 3 . Liste des indicateurs hydrologiques

Groupe d'indicateurs	Déclinaison de l'indicateur	Type d'indicateur	Échelle de temps
HQ Abattement de débit	HQ : abattement du débit de pointe (D ₁₀ , médiane, D ₉₀)	Relatif	Événement pluvieux
HV Abattement de volume	HVev : abattement de volume événementiel (D ₁₀ , médiane, D ₉₀)	Relatif	Événement pluvieux
	HVAn : abattement de volume annuel	Relatif	Annuelle, intégrée
HS Proportion surversée	HSev : proportion surversée événementielle (D ₁₀ , médiane, D ₉₀)	Descriptif, explicatif	Événement pluvieux
	HSan : proportion surversée annuelle	Relatif, descriptif, explicatif	Annuelle, intégrée
H Distribution des débits	HDQ : comparaison de la distribution des débits entre la référence et la sortie du système évalué	Descriptif, relatif	Série continue longue
	HQDF : relation débit-durée-fréquence en entrée et en sortie du système d'évaluation	Descriptif	Série continue longue
	HQf : fréquence de dépassement du débit de fuite	Normatif	Série continue longue
HT Fonctionnement hydraulique	HTr : temps de réaction	Descriptif, explicatif	Événement pluvieux
	HTv : durée de vidange	Descriptif, explicatif	Événement pluvieux
	HTs : temps de séjour	Explicatif	Événement pluvieux
	HTd : contrôle visuel des déchets	Descriptif, explicatif	-
	HTp : perméabilité de la couche de surface	Descriptif, explicatif	-

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ■ Relativement facile à estimer ■ Indicateurs de la pertinence de l'ouvrage vis-à-vis de la réglementation ■ Possibilité de comparaison inter-événementielle 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateur fortement influencé par les limites de l'instrument de mesure (les débits les plus forts peuvent ne pas être mesurés) ■ Variable selon le pas de temps de calcul - à calculer pour plusieurs pas de temps
<ul style="list-style-type: none"> ■ Relativement facile à estimer ■ Bon indicateur de la performance ■ Possibilité de comparaison inter-événementielle 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Variabilité importante possible entre les événements pluvieux ■ Sensible à la séparation des événements pluvieux
<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateur global et robuste prenant en compte le comportement au cours de l'année ■ Facile à communiquer 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Difficulté d'obtenir de longues chroniques continues. Peut nécessiter une méthode d'extrapolation pour combler les données manquantes ■ Indicateur intégré qui ne représente pas la variabilité inter-événementielle
<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateur explicatif des abattements de volumes et de masses ■ Possibilité de comparaison inter-événementielle 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessite une mesure du débit de surverse ■ Sensible à la séparation des événements pluvieux
<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateur du bon dimensionnement de l'ouvrage (de l'adéquation ouvrage-BV) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Difficulté d'obtenir de longues chroniques continues. Peut nécessiter une méthode d'extrapolation pour combler les données manquantes
<ul style="list-style-type: none"> ■ Évaluation de l'impact de l'ouvrage sur le régime hydrologique dans son ensemble ■ Comparaison possible avec un débit limité prescrit 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessite un pas de temps d'acquisition des données identique ou multiple l'un de l'autre en entrée et sortie
<ul style="list-style-type: none"> ■ Information très synthétique des performances de l'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessite de calculer les débits à différents pas de temps ■ Nécessite une chronique suffisamment longue pour avoir une gamme de fréquences intéressante
<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateurs de la pertinence de l'ouvrage vis-à-vis de la réglementation 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sensible au pas de temps de calcul – à calculer préférentiellement pour le pas de temps le plus petit
<ul style="list-style-type: none"> ■ Détection des dysfonctionnements (retard anormal du début d'écoulement) (secondaire : utile pour le déclenchement des campagnes de prélèvement) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Définition des événements pluvieux ■ Variabilité importante à prendre en compte (nécessité d'événements nombreux)
<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateur du fonctionnement de l'ouvrage entre deux pluies ■ Indicateur de dimensionnement (disponibilité de l'ouvrage) ■ Permet d'expliquer des surverses fréquentes 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessite de bien déterminer la fin de l'événement pluvieux ■ Nécessité de séparer la chronique de débits en événements pluvieux
<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateur explicatif des abattements de pollutions 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Peut être estimé uniquement sur les ouvrages qui font de la rétention ■ Nécessite d'estimer un débit moyen en sortie d'ouvrage
<ul style="list-style-type: none"> ■ Facile à réaliser selon la fréquence des visites ■ Premier indicateur à vérifier en cas de dysfonctionnement de l'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pouvoir explicatif limité
<ul style="list-style-type: none"> ■ Méthode de mesures simple à mettre en œuvre ■ Pouvoir explicatif avéré 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Variabilité importante au sein d'un ouvrage – de nombreux points de mesure nécessaires ■ Peut évoluer dans le temps ■ Chronophage

Indicateur HQ : abattement du débit

L'abattement du débit de pointe est un indicateur relatif permettant de caractériser la capacité d'un ouvrage à écrêter les débits observés pour chaque événement pluvieux.

HQ : abattement du débit de pointe

Type d'indicateur : normatif

Données nécessaires : débit d'entrée et de sortie de l'ouvrage, intensité pluvieuse

Échelle de temps : série continue longue

L'évaluation de cet indicateur nécessite de séparer les événements pluvieux à partir des chroniques de pluie et de débit (Encadré 2 - *La séparation de séries de pluie et de débit en événements pluvieux*). Ensuite, on détermine pour chaque événement le débit maximal observé à un pas de temps donné. L'abattement peut être estimé pour le système BV_t constitué du bassin versant et de l'ouvrage (Eq. 1) ou pour l'ouvrage seul OGA (Eq. 2).

$$e_{Q_{max},BV_t} = 1 - \frac{Q_{S,max}}{I_{pluie,max}S_{BV_t}} \quad \text{Eq. 1}$$

où e_{Q_{max},BV_t} est l'abattement du débit de pointe par le système bv+ouvrage, $Q_{S,max}$ le débit de pointe en sortie d'ouvrage, $I_{pluie,max}$ est l'intensité maximale de la pluie pendant l'événement et S_{BV_t} la surface du bassin versant de l'aménagement entier (surface du bassin versant d'apport et de l'ouvrage).

Pour ce calcul :

- le débit sortant de l'ouvrage Q_S peut concerner une ou plusieurs sorties selon le type d'ouvrage (surverse, exfiltration ou drain) ;
- l'intensité de pluie et le débit doivent être estimés au même pas de temps ;
- il peut être intéressant d'effectuer ce calcul pour plusieurs pas de temps différents (par exemple, 5, 15, 30 et 60 minutes).

$$e_{Q_{max},OGA} = 1 - \frac{Q_{S,max}}{Q_{E,max}} \quad \text{Eq. 2}$$

où $e_{Q_{max},OGA}$ est l'abattement du débit de pointe par l'ouvrage, $Q_{S,max}$ est le débit de pointe en sortie d'ouvrage, $Q_{E,max}$ est le débit de pointe en entrée, estimé comme la somme du débit entrant dans l'ouvrage et de la pluie sur l'ouvrage, et calculé selon l' Eq. 3 :

$$Q_{E,max} = (Q_{S,BV_a} + I_{pluie}S_{OGA})_{max} \quad \text{Eq. 3}$$

où Q_{S,BV_a} est le débit du ruissellement généré par le bassin versant d'apport alimentant l'ouvrage, I_{pluie} est l'intensité de la pluie et S_{OGA} est la surface de l'ouvrage à ciel ouvert.

S'il n'est pas possible de mesurer le débit entrant dans l'ouvrage Q_{S,BV_a} , on peut également se référer à un débit de référence $Q_{S,BV_{ref}}$, obtenu à l'exutoire du site de référence (par exemple parking perméable et parking imperméable traditionnel servant de référence), avec

$$Q_{S,BV_a} = Q_{S,BV_{ref}} S_{BV_a} / S_{BV_{ref}} \quad \text{Eq. 4}$$

Selon les utilisateurs, les abattements peuvent être exprimés en valeur décimale (0,75 ou 0,95) ou en pourcentage (75 ou 95 %). Dans les exemples suivants, ils seront exprimés en pourcentage et estimés selon la définition précédente (Eq. 1).

Exemple d'application

L'abattement du débit du pointe HQ a été évalué pour des places de parking lysimétriques à Broué en ECOMINERAL®, ECOVEGETAL® Mousses et ECOVEGETAL® Green entre septembre 2015 et décembre 2018. Le fond de forme de ces places est étanche empêchant toute infiltration de l'eau retenue dans les systèmes vers le sous-sol. La pluie est le seul paramètre d'entrée d'eau dans ces ouvrages, aucun ruissellement de surface provenant de l'extérieur des ouvrages n'étant observé.

Les parkings perméables permettent un abattement conséquent des débits de pointe de la pluie. Ainsi, pour 95 événements pluvieux communs entre la pluie et les 3 systèmes et pour un pas de temps de calcul de 60 min, les boîtes à moustaches tracées sur la Figure 6 illustrent les statistiques de cet abattement pour les trois dispositifs ; la médiane est de 100 % quel que soit le type de parking perméable considéré. Cela signifie que pour les pluies observées les dispositifs ont un fort pouvoir écrêteur mais aussi de rétention d'eau. Le 9^e décile Q90 est supérieur à 99,99 % pour les 3 parkings. On peut cependant voir une variabilité entre les dispositifs, puisque le 1^{er} décile Q10 a une valeur d'abattement de 66 % pour l'ECOMINERAL®, 80 % pour l'ECOVEGETAL® Mousses et 85 % pour l'ECOVEGETAL® Green.

Cet indicateur a aussi été calculé à des pas de temps de 10 et 30 min. Les valeurs sont équivalentes et légèrement supérieures par rapport au pas de temps de 60 min.

L'estimation des débits de pointe pour chaque événement et pour les différents pas de temps peut également servir pour le calcul d'autres indicateurs (courbes débit – durée – fréquence).

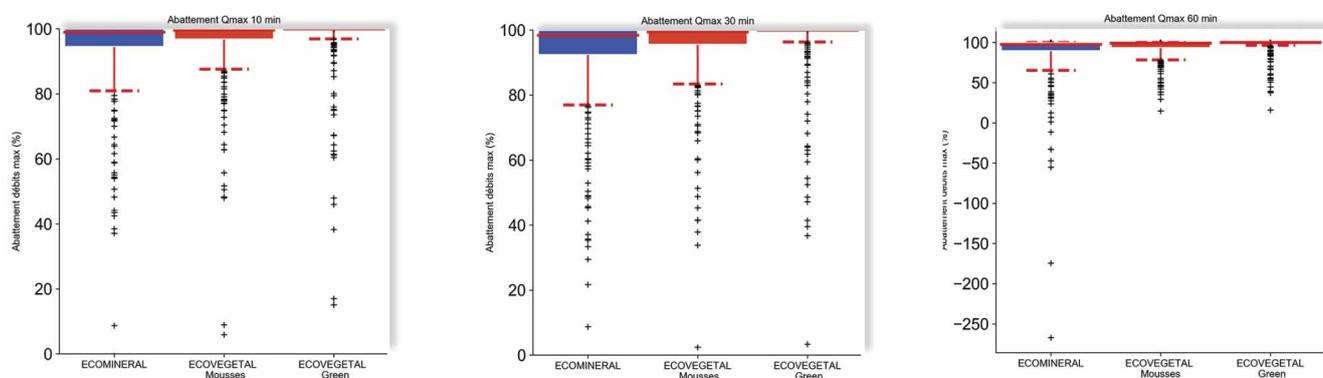


Figure 6. Abattement relatif des débits de pointe (boîte = 50 % des données entre Q25 et Q75).

— médiane
••• Q10 et Q90 → seuls les Q10 sont visibles sur ces figures).

Interprétation

L'indicateur permet de montrer la capacité des ouvrages de gestion des eaux pluviales à la source à réduire les débits de pointe qui peuvent potentiellement se retrouver dans les réseaux lors d'événements pluvieux. Cet indicateur montre l'intérêt d'installer de tels ouvrages quand la saturation des réseaux d'assainissement lors d'événements pluvieux pose problème.

Groupe d'indicateur HV : abattement de volume

L'évaluation de l'abattement de volume permet de caractériser la capacité d'un système de gestion à la source à limiter le volume de ruissellement produit, ainsi que sa capacité à maîtriser le flux polluant. On peut considérer l'abattement global du bassin versant total (« bassin versant d'apport + ouvrage ») ($E_{V,BVt}$), l'abattement sur le bassin versant d'apport ($E_{V,OGA}$) ou l'abattement lié à l'ouvrage ($E_{V,BVa}$). Selon le type d'ouvrage considéré, on peut être intéressé par un seul de ces indicateurs ou en utiliser plusieurs de façon complémentaire afin de caractériser la performance de l'ouvrage.

En termes de flux polluant, l'évaluation de l' $E_{V,OGA}$ est complémentaire de l'évaluation de l'abattement de masse du polluant (groupe d'indicateurs PE) car il permet de caractériser la contribution de la réduction du volume à l'abattement de masse (par rapport à l'abattement de concentration, groupe d'indicateurs PD).

L'abattement des volumes pourra être exprimé en relatif (% du volume entrant qui est abattu par le système étudié) ou en absolu (hauteur d'eau abattue, en équivalent sur le bassin versant, exprimée en mm).

Dans certains cas de figure (toitures végétalisées, parkings perméables), il n'y a pas de bassin versant d'apport en amont de l'ouvrage ($S_{BV=0}$) et seule la surface de l'ouvrage est considérée ($S_{BVt}=S_{OGA}$).

Exemple d'application

La Figure 7 donne les distributions des abattements de volume pour le système parking muni de la noue, de la tranchée, de la chaussée à structure réservoir ($E_{V,BVt}$), et du bassin de retenue ($E_{V,OGA}$) pour N événements (respectivement $N=106, 108, 49, 127$). Les 4 dispositifs sont étanchés. Les trois premiers le sont pour des raisons météorologiques, le bassin l'est dans sa conception. Sans surprise, le bassin de retenue n'abat pratiquement pas de volume. A l'opposé, et pour la gamme des événements suivis, la noue absorbe beaucoup d'eau.

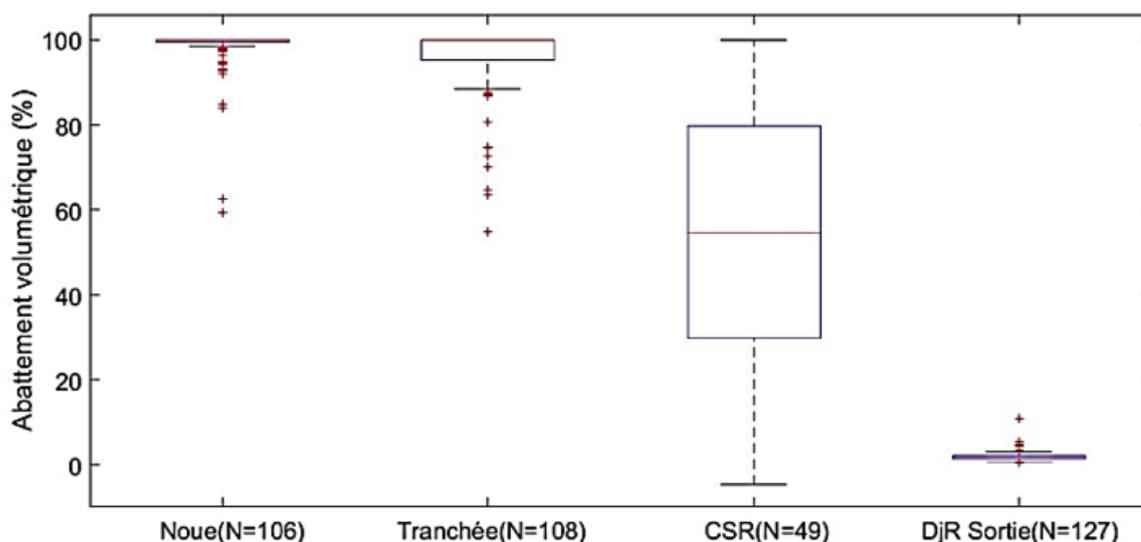


Figure 7. Distributions des abattements de volume pour le système parking muni de la noue, de la tranchée, de la chaussée à structure réservoir ($E_{V,BVt}$), et du bassin de retenue ($E_{V,OGA}$).

Déclinaison H_{Vev} : abattement du volume événementiel

Type d'indicateur : relatif ou absolu

Données nécessaires : pluie, volume d'entrée, volume de sortie

Échelle de temps : événement pluvieux

L'évaluation de cet indicateur nécessite de séparer les événements pluvieux à partir des chroniques de pluie et de débit (Encadré 2 - La séparation de séries de pluie et de débit en événements pluvieux). Les abattements de volume à l'échelle de l'événement pluvieux $E_{V,BVt,ev}$, $E_{V,OGA,ev}$ et $E_{V,BVa,ev}$ sont évalués respectivement selon les Eq. 5, Eq. 6 et Eq. 7. Sur de longues chroniques, ces indicateurs permettent de caractériser la variabilité inter-événementielle du fonctionnement du système en lien avec les conditions initiales d'état hydrique et les caractéristiques de la pluie.

$$E_{V,BVa,ev}(mm) = h_{pluie, ev} - \frac{V_{BVt,ev}}{S_{BVt}} \quad E_{V,BVt,ev}(\%) = 1 - \frac{V_{BVt,ev}}{h_{pluie, ev} S_{BVt}} \quad \text{Eq. 5}$$

où $E_{V,BVt,ev}$ est l'abattement de volume par le système « bassin versant + ouvrage » à l'échelle de l'événement pluvieux, $V_{BVt,ev}$ est le volume événementiel en sortie de l'ouvrage, $h_{pluie, ev}$ est le cumul de pluie de l'événement et S_{BVt} la surface du bassin versant total (« bassin versant d'apport + ouvrage »).

$$E_{V,OGA,ev}(mm) = \frac{V_{BVa,ev}}{S_{BVa}} - \frac{V_{BVt,ev}}{S_{BVt}} \quad \text{ou} \quad \frac{V_{BVa,ev} + h_{pluie, ev} S_{OGA}}{S_{BVt}} - \frac{V_{BVt,ev}}{S_{BVt}} \quad \text{Eq. 6}$$

$$E_{V,OGA,ev}(\%) = 1 - \frac{V_{BVt,ev}}{V_{BVa,ev} + h_{pluie, ev} S_{OGA}}$$

où $E_{V,OGA,ev}$ est l'abattement de volume par l'ouvrage à l'échelle de l'événement pluvieux, $V_{BVa,ev}$ est le volume événementiel de ruissellement sortant du bassin versant d'apport de l'ouvrage et S_{OGA} la surface de l'ouvrage .

$$E_{V,BVa,ev}(mm) = h_{pluie, ev} - \frac{V_{BVa,ev}}{S_{BVa}} \quad E_{V,BVa,ev}(\%) = 1 - \frac{V_{BVa,ev}}{h_{pluie, ev} S_{BVa}} \quad \text{Eq. 7}$$

où $E_{V,BVa,ev}$ est l'abattement de volume par le bassin versant d'apport de l'ouvrage à l'échelle de l'événement pluvieux et S_{BVa} la surface du bassin versant d'apport.

Notons que cet abattement est directement lié à la notion de coefficient d'écoulement C_e (ou coefficient de ruissellement volumétrique moyen) du bassin versant : $E_{V,BVa,ev} = 1 - C_e$. Cet indicateur n'est pas un indicateur de performance relatif à l'ouvrage : il donne cependant une information utile pour caractériser le fonctionnement du bassin versant.

Exemple d'application

L'abattement de volume a été évalué pour des places de parking lysimétriques à Broué en ECOMINERAL® (84 événements), ECOVEGETAL® Mousses (100 événements) et ECOVEGETAL® Green (127 événements) entre septembre 2015 et décembre 2018. Le fond de forme de ces places est étanche empêchant toute infiltration de l'eau retenue dans les systèmes vers le sous-sol. Comme il n'y a pas d'apport depuis un bassin versant extérieur et que la pluie est le seul intrant dans les parkings, on peut considérer sur ce site que $E_{V,bv+OGA,ev} = E_{V,OGA,ev}$. Le premier décile Q10 de l'abattement de volume événementiel est de 25 % pour l'ECOMINERAL®, 48 % pour l'ECOVEGETAL® Mousses et de seulement 80 % pour l'ECOVEGETAL® Green. Pour le neuvième décile Q90, le rendement de volume est de 100 % pour les 3 parkings. Les valeurs médianes d'abattement événementiel sont très élevées avec 99 % pour l'ECOMINERAL® et 100% pour l'ECOVEGETAL® Mousses et l'ECOVEGETAL® Green.

La Figure 8a montre que pour l'ECOMINERAL®, l'abattement ne dépasse jamais 20 mm, qu'importe la hauteur de pluie considérée. Selon nos mesures, le système ECOMINERAL® ne peut donc pas retenir plus de 20 mm de pluie. L'ECOVEGETAL® Mousses montre la même tendance, puisqu'il n'arrive pas à retenir toute l'eau d'une pluie supérieure à 20 mm (Figure 8b). Cependant, pour certains événements, ce parking a su retenir jusqu'à environ 40 mm, indiquant une variabilité de la rétention d'eau du système qui dépend de la durée de l'événement et/ou de l'état hydrique initial. Le parking ECOVEGETAL® Green (Figure 8c) peut retenir jusqu'à 60 mm d'eau sur certains événements. Pour les pluies supérieures à 60 mm, les valeurs d'abattement restent proches de la droite $y=x$ et près de 95 mm ont été abattus lors d'un événement pluvieux de 116 mm. L'ECOVEGETAL® Green retient la totalité de l'eau des pluies < 20 mm.

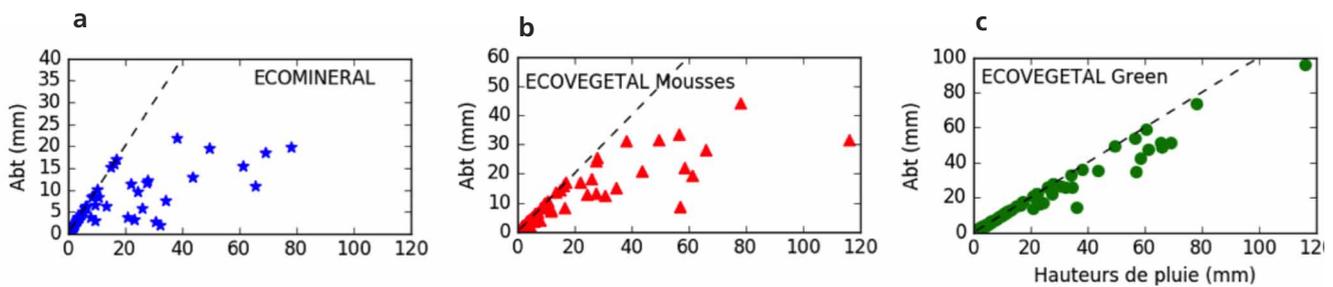


Figure 8. Abattements événementiels absolus en fonction de la pluie (droite pointillée : $y=x$) ; a) ECOMINERAL® ; b) ECOVEGETAL® Mousses ; c) ECOVEGETAL® Green.

Déclinaison H_{Van} : abattement de volume annuel

Type d'indicateur : relatif

Données nécessaires : pluie, volume d'entrée, volume de sortie

Échelle de temps : annuelle intégrée

Les abattements de volume à l'échelle annuelle $E_{v,bv+OGA,an}$, $E_{v,OGA,an}$ et $E_{v,BV,an}$ sont évalués respectivement selon les Eq. 8, Eq. 9 et Eq. 10. L'évaluation du rendement à l'échelle annuelle permet d'avoir un indicateur global du fonctionnement du système prenant en compte la variabilité pouvant être rencontrée au cours des saisons, et intégrant la variabilité des différents types d'événements pluvieux et leur poids relatif dans le volume annuel. Il nécessite des séries validées continues de pluie et de débit en entrée et en sortie de l'ouvrage ; si les séries de débit sont discontinues, on peut faire appel à des méthodes d'extrapolation des données manquantes, par exemple à l'aide d'un modèle hydrologique. Cependant, on note qu'une telle reconstruction est une source d'incertitude. Si l'on n'est pas en mesure de réaliser l'extrapolation nécessaire pour reconstituer les données manquantes dans une année, le calcul de l'indicateur peut être basé sur l'estimation d'un volume total constitué de la somme des volumes des événements pluvieux considérés, en lieu et place du volume annuel (aussi bien pour le volume lié au débit entrant ou sortant, que pour le volume de pluie).

$$E_{v,bv+OGA,an} = \frac{V_{BVt,an}}{h_{pluie,an} S_{BVt}} \quad \text{Eq. 8}$$

où $E_{v,bv+OGA,an}$ est l'abattement de volume par le système « bassin versant + ouvrage » à l'échelle annuelle, $V_{BVt,an}$ est le volume annuel en sortie de l'ouvrage, $h_{pluie,an}$ est le cumul annuel de pluie et S_{BVt} est la somme $S_{BVa} + S_{OGA}$, où S_{BVa} est la surface du bassin versant d'apport et S_{OGA} la surface de l'ouvrage.

$$E_{V,OGA,an} = \frac{V_{BVt,an}}{V_{Bva,an} + h_{pluie,an} S_{OGA}} \quad \text{Eq. 9}$$

où $E_{V,OGA,an}$ est l'abattement de volume par l'ouvrage à l'échelle annuelle, $V_{Bva,an}$ est le volume annuel de ruissellement sortant du bassin d'apport.

$$E_{V,BVt,an} = \frac{V_{Bva,an} + h_{pluie,an} S_{OGA}}{h_{pluie,an} S_{BVt}} \quad \text{Eq. 10}$$

où $E_{V,BVt,an}$ est l'abattement de volume par le bassin versant de l'ouvrage à l'échelle annuelle. Ce dernier indicateur n'est pas un indicateur de performance relatif à l'ouvrage ; il donne cependant une information utile pour caractériser le fonctionnement du bassin versant.

Exemple d'application

L'abattement de volume annuel a été évalué pour des places de parking lysimétriques à Broué en ECOMINERAL®, ECOVEGETAL® Mousses et ECOVEGETAL® Green pour les années 2016, 2017 et 2018 ; dans ce cas, l'indicateur est estimé à partir de la somme des volumes des événements pluvieux considérés (événements sur les 3 années). Le fond de forme de ces places est étanche empêchant toute infiltration de l'eau retenue dans les systèmes vers le sous-sol. Comme il n'y a pas d'apport depuis un bassin versant extérieur et que la pluie est le seul intrant dans les parkings, alors $E_{V,ouv,an} = E_{V,bv+ouv,an}$.

Les abattements de volume annuels ont été définis à partir des volumes entrant et sortant mesurés et validés sur la période totale de suivi des 3 places de parkings de Broué. Les abattements sont de 33 % pour le système ECOMINERAL®, 58 % pour l'ECOVEGETAL® Mousses et 88 % pour l'ECOVEGETAL® Green.

On peut également estimer un abattement annuel « absolu », en mm de pluie. Pour cela, on travaillera en hauteur de pluie à l'entrée et à la sortie de l'ouvrage (c'est-à-dire un volume d'eau rapporté à la surface active de la zone contributive). Les abattements annuels absolus ont été définis sur les périodes de pluie/rejets valides et ramenés à une année, tels que :

$$E_{V_{bv+ouv,an}^{abs}} = (h_{pluie,an} - V_{BVt,an}/S_{OGA}) * (365/n_{valide}),$$

où n_{valide} est le nombre de jours de données valides.

Cet abattement absolu est de 193 mm/an (pour 593 mm/an de pluie) pour l'ECOMINERAL®, 348 mm/an (pour 598 mm/an de pluie) pour l'ECOVEGETAL® Mousses et 554 mm/an (pour 632 mm/an de pluie) pour l'ECOVEGETAL® Green. Les hauteurs de pluie présentées sont spécifiques à chaque parking perméable pour correspondre à leurs propres périodes de données valides/invalides.

L'abattement de volume annuel a été calculé en 2016, 2017 et 2018. Le système ECOMINERAL® a un abattement annuel de 46 % en 2016, 58 % en 2017 et 43 % en 2018. Pour l'ECOVEGETAL® Mousses, l'abattement est du même ordre de grandeur entre les 3 années avec des valeurs comprises entre 61 et 64 %. Les valeurs d'abattement des volumes annuels sont aussi similaires pour l'ECOVEGETAL® Green, entre 88 et 90 %. En termes d'abattement absolu, l'ECOMINERAL® a retenu 168 mm d'eau en 2016 pour 362 mm de pluie pour les événements valides, 159 mm en 2017 pour 275 mm de pluie et 81 mm en 2018 pour 185 mm de pluie. L'ECOVEGETAL® Mousses a retenu 215 mm d'eau en 2016 pour 352 mm de pluie reçue pendant les événements sans codes d'erreur, 295 mm en 2017 pour 457 mm de pluie et 176 mm en 2018 pour 275 mm de pluie. Enfin, l'ECOVEGETAL® Green a retenu 388 mm d'eau en 2016 pour 441 mm de pluie, 468 mm en 2017 pour 528 mm de pluie et 526 mm en 2018 pour 583 mm de pluie. Les hauteurs de pluie présentées sont spécifiques à chaque parking perméable pour correspondre à leurs propres périodes de données valides/invalides.

Groupe d'indicateur HS - Proportion surversée

L'évaluation de la proportion du volume événementiel surversé ou avec traitement dégradé est un indicateur relatif permettant de caractériser la capacité d'un système à accueillir le ruissellement, ainsi qu'un indicateur explicatif permettant de mieux comprendre la performance en termes d'interception de la masse de polluants ou du volume de ruissellement évalués pour l'ouvrage complet. Du fait de la variabilité des flux d'eau ruisselée entrant dans l'ouvrage, la surverse occasionnelle fait partie du fonctionnement normal d'un ouvrage de gestion à la source. Cependant, puisque l'eau surversée n'est pas traitée de manière optimale, la surverse tend à diminuer la performance d'un ouvrage.

Déclinaison HSev : proportion du volume événementiel surversé ou avec traitement dégradé

Type d'indicateur : relatif, explicatif

Données nécessaires : pluie, volume d'entrée, volume de sortie

Échelle de temps : événement pluvieux

La caractérisation de cet indicateur à l'échelle de l'événement pluvieux permet de caractériser les conditions sous lesquelles une surverse se produit et l'effet de la surverse sur la performance globale de l'ouvrage. On peut évaluer cette fraction par rapport au volume total géré par le système « bassin versant + ouvrage » (Eq. 11) ou par rapport au volume arrivant dans l'ouvrage (Eq. 12) :

$$f_{SV,BVt,ev} = \frac{V_{SV,ev}}{h_{pluie,ev} S_{BVt}} \quad \text{Eq. 11}$$

où $f_{SV,BVt,ev}$ est la fraction événementielle du volume surversé par rapport au volume total reçu par le système « bassin versant + ouvrage », $V_{SV,ev}$ est le volume de surverse au cours de l'événement, $h_{pluie,ev}$ est le cumul de pluie de l'événement et S_{BVt} est la somme $S_{BVa} + S_{OGA}$, où S_{BVa} est la surface du bassin versant d'apport et S_{OGA} la surface de l'ouvrage.

$$f_{SV,OGA,ev} = \frac{V_{SV,ev}}{V_{BVa,ev} + h_{pluie,ev} S_{OGA}} \quad \text{Eq. 12}$$

où $f_{SV,OGA,ev}$ est la fraction événementielle du volume surversé par rapport au volume entrant dans l'ouvrage, $V_{SV,ev}$ est le volume de surverse de l'ouvrage à l'échelle de l'événement pluvieux et $V_{BVa,ev}$ est le volume événementiel de ruissellement sortant du bassin versant d'apport de l'ouvrage.

Déclinaison HSan : proportion du volume annuel surversé ou avec traitement dégradé

Type d'indicateur : relatif, explicatif

Données nécessaires : pluie, volume d'entrée, volume de sortie

Échelle de temps : annuelle intégrée

La caractérisation de cet indicateur à l'échelle annuelle permet d'identifier si la fréquence de surverse observée est compatible avec les objectifs initiaux de l'ouvrage. Elle permet également de mieux comprendre le rôle joué par la surverse dans l'abattement positif ou négatif du flux polluant et de volume de l'ouvrage complet à l'échelle de l'année (Eq. 13 et Eq. 14).

$$f_{SV,BVt,an} = \frac{V_{SV,an}}{h_{pluie,an} S_{BVt}} \quad \text{Eq. 13}$$

où $f_{SV,BVt,an}$ est la fraction annuelle du volume surversé par rapport au volume total reçu par le système « bassin versant + ouvrage », $V_{SV,an}$ est le volume annuel de surverse, $h_{pluie,an}$ est le cumul annuel de pluie et S_{BVt} est la somme $S_{BVa} + S_{OGA}$, où S_{BVa} est la surface du bassin versant d'apport et S_{OGA} la surface de l'ouvrage.

$$f_{SV,OGA,an} = \frac{V_{SV,an}}{V_{BVa,an} + h_{pluie,an} S_{OGA}} \quad \text{Eq. 14}$$

où $f_{SV,OGA,an}$ est la fraction annuelle du volume surversé par rapport au volume entrant dans l'ouvrage, $V_{SV,an}$ est le volume annuel de surverse de l'ouvrage, $V_{BVa,an}$ est le volume annuel de ruissellement sortant du bassin versant d'apport de l'ouvrage.

Exemple d'application

Au cours de la première année de fonctionnement de la noue filtrante à Compans, environ 35 % du volume d'eau entrant dans l'ouvrage a surversé ($f_{SV,OGA,an}=35\%$), ce qui correspond à 25 % du volume total géré par l'aménagement ($f_{SV,BVt,an}=25\%$). Cette proportion relativement élevée de surverse limite l'abattement du flux polluant par le système car le volume surversé n'est pas traité de façon optimale (par filtration à travers le substrat filtrant). Après quelques mois de fonctionnement, la noue a été divisée en biefs par des redans en béton afin d'augmenter l'espace de stockage utile. Après cet aménagement, la fraction annuelle du volume d'eau surversé ($f_{SV,OGA,an}$) se réduit à environ 10 %, ce qui correspond à 7 % du volume total géré par l'aménagement ($f_{SV,BVt,an}$), ce qui a permis d'améliorer la performance en termes d'abattement de masse. Le fait d'avoir évalué la proportion surversée permet de mieux comprendre les limites de performance du système et d'observer l'effet de l'installation des redans.

Groupe d'indicateur H - Distribution de débits et courbes QDF

Une distribution des débits est établie sur la base d'une longue série continue de données de débit à pas de temps fixe. Elle est établie en estimant la fraction du temps ou la fraction du volume cumulé durant laquelle un débit donné est dépassé. Plusieurs notions peuvent être utilisées :

- la fraction (du temps ou du volume), qui correspond au pourcentage du temps pendant lequel le débit considéré est dépassé, ou au pourcentage de volume pour lequel le débit considéré est dépassé ;
- pour le temps, cette fraction correspond à une fréquence, qui est alors une fréquence de non dépassement du débit considéré (le nombre de fois où la valeur n'est pas dépassée dans l'échantillon de données) ;
- si l'on considère l'échantillon d'un point de vue statistique, cette fréquence est équivalente à une probabilité de non dépassement de la valeur considérée ;
- la période de retour de l'événement peut être estimée à partir de la fréquence, selon l'équation : $T=1/(1-F)$ où T est le temps de retour, souvent exprimé en années, et F la fréquence de non dépassement adimensionnelle.

Plusieurs indicateurs sont proposés à partir de ces notions :

- HDQ : distribution des débits entre la référence (entrée d'ouvrage ou pluie) et la sortie du système évalué ;
- HQDF : relation « Débit-Durée-Fréquence » ;
- HQf : fréquence de dépassement du débit de fuite maximum autorisé.

HDQ : comparaison de la distribution des débits entre la référence et la sortie du système

Type d'indicateur : descriptif, relatif

Données nécessaires : débit de référence, débit de sortie

Échelle de temps : série continue longue

L'objectif de cet indicateur est de comparer les régimes hydrologiques entrée/sortie à partir des débits observés en entrée et en sortie du système considéré (l'ouvrage) en utilisant toute la gamme des débits observés. À partir d'une série de n valeurs de variables observées (pluie, débit en entrée ou en sortie de l'ouvrage), on peut trier toutes les valeurs en ordre croissant (zéros compris), puis on affecte un rang r compris entre 1 et n à chaque valeur. La fréquence de non dépassement ou la fraction de volume est évaluée selon l'équation Eq. 15 pour la distribution en temps, et selon l'équation Eq. 16 pour la distribution en volume.

$$f(r) = r/n \quad \text{Eq. 15}$$

$$f_v(r) = \frac{\sum_{i=1}^r Q_i dt}{\sum_{i=1}^n Q_i dt} \quad \text{Eq. 16}$$

où $f(r)$ est la fréquence de non dépassement en fonction du temps pour le rang r , et n le nombre total d'enregistrements ;

et $f_v(r)$ est la fraction de volume estimée pour le rang r , Q_i est le débit de l'enregistrement i , dt le pas de temps fixe de la série de données et n le nombre total d'enregistrements.

On peut noter le fait que pour la distribution des débits en temps, une grande partie de la distribution sera associée aux valeurs faibles ou nulles, alors que pour la distribution des débits en volume, le rôle des débits élevés sera plus important.

La superposition des débits classés selon ces fréquences permet de comparer les débits en entrée et en sortie du système ; typiquement, les débits en entrée et les débits en sortie de l'ouvrage, ou alors la pluie et le débit de sortie. L'avantage de cet indicateur réside dans le fait que les séries ne doivent pas être forcément concordantes pour analyser l'effet de l'ouvrage.

Exemple d'application

La distribution de débits de sortie a été évaluée pour des places de parking perméables de type ECOMINERAL®, ECOVEGETAL® Mousses et ECOVEGETAL® Green de septembre 2015 à décembre 2018 ([fiche de site Broué](#)). Le fond de forme de ces places est étanché pour des raisons expérimentales empêchant toute infiltration de l'eau retenue dans les systèmes vers le sous-sol. La pluie est la seule entrée d'eau dans ces ouvrages, aucun ruissellement de surface provenant de l'extérieur des ouvrages n'étant observé.

Les distributions de débit montrent que pour 99 % du temps (Figure 9), la pluie correspond à un débit spécifique inférieur à 3 L/s/ha. Pour 99 % du temps l'ECOMINERAL® a un débit

inférieur à 1,7 L/s/ha, l'ECOVEGETAL® Mousses un débit inférieur à 0,84 L/s/ha et l'ECOVEGETAL® Green un débit inférieur à 0,02 L/s/ha. Ces valeurs correspondent à des pluies de faible intensité. Cette représentation avec les courbes de débits classés en fonction du temps nécessite de zoomer pour voir apparaître la différence entre les courbes étant donné les faibles débits considérés. On peut ainsi observer que le débit de 2 L/s/ha (seuil de débit de fuite imposé dans certaines collectivités) est dépassé 1,5 % du temps pour la pluie (sur la période observée), 0,8 % du temps pour l'ECOMINERAL®, 0,2 % pour ECOVEGETAL® Mousses et 0,13 % pour l'ECOVEGETAL® Green.

Pour les distributions de débit en fonction du volume (Figure 10), la différence est plus nette entre la pluie et les 3 systèmes de parkings perméables. Par exemple pour la pluie, 99 % du volume cumulé sur toute la période d'étude est dû à des débits inférieurs à environ 309 L/s/ha. Cette intensité est bien inférieure pour les parkings perméables avec environ 10 L/s/ha en moyenne pour les 3 systèmes soit des débits 30 fois moins importants que la pluie. Aussi, les 3 systèmes semblent avoir un comportement presque similaire, les différences étant moins marquées qu'avec les courbes de débits classés en fonction du temps. Les volumes associés aux débits supérieurs à 2 L/s/ha représentent 75 % du volume total pour la pluie, 35 % pour l'ECOMINERAL®, 20 % pour l'ECOVEGETAL® Mousses et 50 % pour l'ECOVEGETAL® Green. L'écart entre l'ECOVEGETAL® Green et les 2 autres systèmes est dû à la part de données invalides pour l'ECOMINERAL® et l'ECOVEGETAL® Mousses qui sont très élevées par rapport au Green.

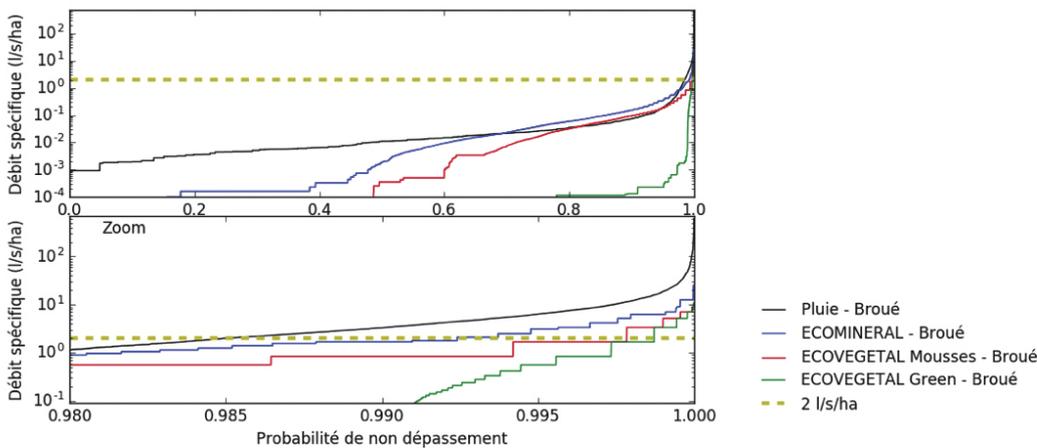


Figure 9. Distributions de débit des trois parkings en fonction du temps à Broué pour la gamme entière (en haut) et les probabilités de non dépassement supérieures à 0,85 (en bas).

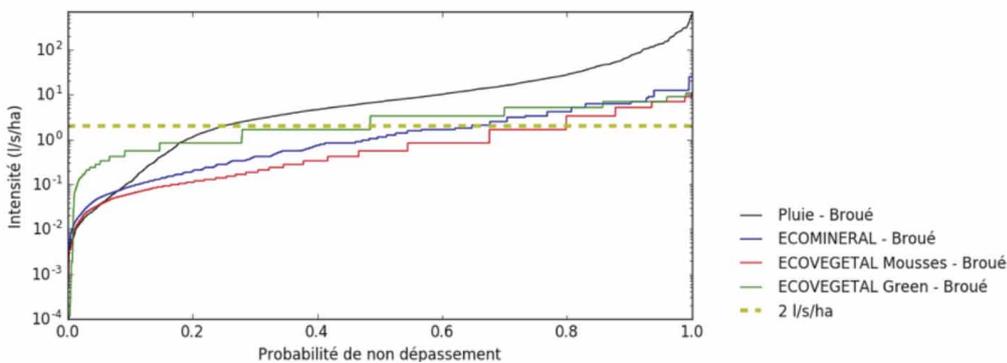


Figure 10. Distributions de débit des trois parkings en fonction du volume à Broué.

HQDF : relation « Débit-Durée-Fréquence »

Type d'indicateur : descriptif, relatif

Données nécessaires : débit d'entrée, débit de sortie

Échelle de temps : série longue d'événements pluvieux

L'objectif de cet indicateur est de relier les débits à des périodes de retour, afin de qualifier le comportement hydrologique de ces ouvrages et de connaître le temps de retour des débits restitués vers l'aval (si l'on établit cette relation pour les débits de sortie des ouvrages) (Eq. 17 et Eq. 18). La méthodologie est la suivante. Tout d'abord, on extrait de la série de données les débits maximum $Q_{max}d$ pour une durée donnée d , en général sur une base journalière ; pour cela, on utilise une durée d glissante avec laquelle on scrute la série. Ensuite, on classe cet échantillon de maximums dans l'ordre décroissant, et on estime la fréquence empirique de chaque $Q_{max}d$, à partir du rang r de chaque valeur.

$$f(r) = r/n \quad \text{Eq. 17}$$

Cette fréquence correspond à une probabilité de dépassement de la valeur de débit considérée.

La période de retour est ensuite estimée à partir de cette fréquence :

$$T = 1/(1-f(r)) \quad \text{Eq. 18}$$

Ainsi, on associe donc un débit à une période de retour, pour une durée d donnée.

Exemple d'application

La relation de débit-durée-fréquence a été évaluée pour des places de parking lysimétriques à Broué en ECOMINERAL®, ECOVEGETAL® Mousses et ECOVEGETAL® Green entre septembre 2015 et décembre 2018. Le fond de forme de ces places est étanché pour des raisons expérimentales et empêche toute infiltration de l'eau retenue dans les systèmes vers le sous-sol. La pluie est le seul paramètre d'entrée d'eau dans ces ouvrages, aucun ruissellement de surface provenant de l'extérieur des ouvrages n'étant observé.

Les courbes *QDF* (débit – durée – fréquence) ont été réalisées pour 3 pas de temps : 10 min (pas de temps d'enregistrement des données), 30 min et 60 min.

Sur la période observée, la majorité des intensités max de pluie ont une période de retour inférieure à 5 mois, correspondant à une intensité max de pluie de 82 L/s/ha pour 10 min, 46 L/s/ha pour 30 min et 28 L/s/ha pour 60 min. La Figure 11a montre l'importance des durées sur les courbes *QDF* en ce qui concerne la pluie, avec des écarts importants entre chaque courbe.

À l'inverse, pour les 3 types de parkings perméables, les courbes aux trois pas de temps différents sont presque confondues (Figure 11b, Figure 11c, Figure 11d). Ceci montre l'écrêtage des pics de pluie par les parkings perméables. On note cependant une légère différence entre les parkings puisque pour une période de retour de 5 mois, le débit de pointe de l'ECOMINERAL® est d'environ 9 L/s/ha, pour l'ECOVEGETAL® Mousses environ 8 L/s/ha et pour l'ECOVEGETAL® Green environ 6 L/s/ha. Récupérer les débits de pointe pour chaque événement et pour les différents pas de temps a aussi servi pour le calcul d'autres indicateurs (abattement des débits de pointe).

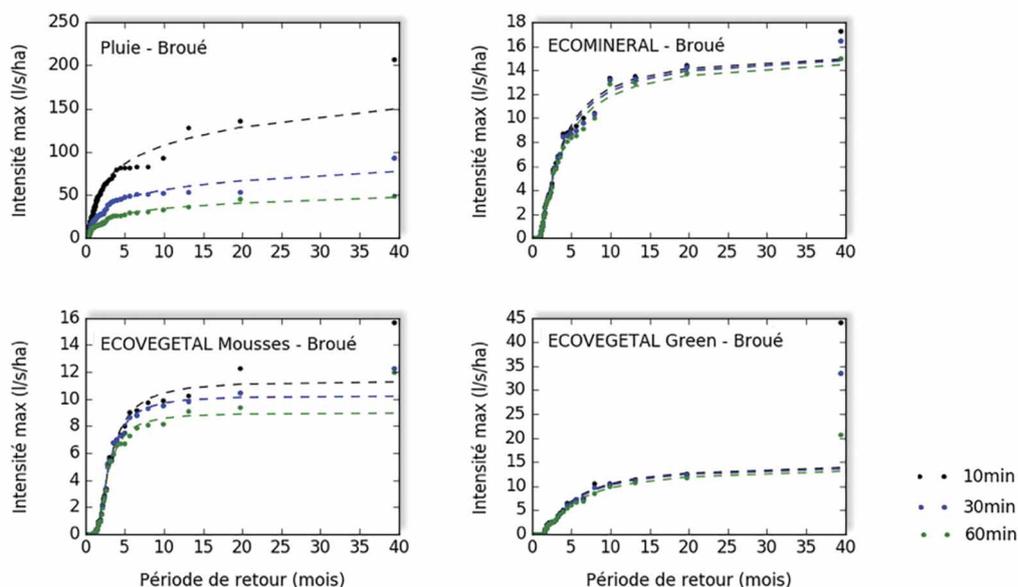


Figure 11. Courbes Intensité-Durée-Fréquence pour la pluie (a) et les eaux drainées depuis les places de parking perméables à Broué (b) ECOMINERAL®, c) ECOVEGETAL® Mousse®, d) ECOVEGETAL® Green®, pour les pas de temps de 10, 30 et 60 min.

NB En plus de montrer le potentiel d'abattement des débits de pointes les courbes QDF permettent de montrer pour les ouvrages de gestion des eaux pluviales à la source leur capacité à écrêter la pluie reçue.

Déclinaison HQf : fréquence de dépassement du débit de fuite maximum autorisé ou de conception

Type d'indicateur : normatif

Données nécessaires : débit de sortie

Échelle de temps : série continue longue

Les ouvrages de gestion à la source sont fréquemment conçus avec un objectif de limitation du débit de fuite, parfois pour remplir une obligation réglementaire. Un débit maximum est alors fixé. On peut évaluer la performance de l'ouvrage à satisfaire cet objectif en considérant l'indicateur normatif de la fréquence de dépassement du débit de fuite. Cette fréquence de dépassement peut être évaluée à partir la série complète des débits de sortie instantanés, utilisée pour établir la distribution de débits selon les modalités décrites pour l'indicateur *HDQ*.

L'indicateur *HQf* est représenté par la fréquence associée à la valeur du débit de fuite, soit la fréquence de dépassement du débit de fuite Q_{fuite} . On peut également choisir de travailler sur l'échantillon des événements pluvieux et considérer la proportion d'événements pluvieux dont le débit de pointe dépasse le débit de fuite visé (Eq. 19).

$$HQf = f_{d,ev,Q_{fuite}} = \frac{n_{ev}}{N_{ev}} \quad \text{Eq. 19}$$

où $f_{d,ev,Q_{fuite}}$ est la fréquence de dépassement du débit de fuite d'un événement pluvieux, n_{ev} est le nombre d'événements pluvieux pour lesquels le débit de pointe dépasse le débit de fuite visé et N_{ev} est le nombre total d'événements pluvieux.

Idéalement, il est conseillé d'utiliser un pas de temps le plus petit possible pour estimer cet indicateur ; sur de grands pas de temps, on risque de lisser les débits de pointe.

Groupe d'indicateur HT - Fonctionnement hydraulique

Lorsque l'on souhaite comprendre ou expliquer une performance d'un ouvrage de gestion à la source, il peut être intéressant d'évaluer des indicateurs explicatifs décrivant son fonctionnement hydraulique. Ces indicateurs se basent sur des mesures de volume, de débit ou sur d'autres caractéristiques de l'ouvrage décrivant l'écoulement de l'eau dans l'ouvrage.

Déclinaison HT_r : temps de réaction

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : pluie, débit de sortie

Échelle de temps : événement pluvieux

Le temps de réaction d'un ouvrage de gestion à la source (HT_r , Eq. 20) pour lequel on collecte des eaux drainées après leur infiltration peut être un indicateur explicatif des performances épuratoires ou hydrologiques. En effet, on peut observer des temps de réaction anormalement courts lorsqu'il existe des écoulements préférentiels dans le substrat. Ceux-ci peuvent se former lorsque le substrat est fissuré, ce qui peut favoriser l'écoulement de l'eau. Cela peut être aussi le cas de très fortes conductivités hydrauliques ou encore d'un substrat initialement très humide.

$$HT_r = H_{début, Q_{drain}} - H_{début, Q_{ref}} \quad \text{Eq. 20}$$

où HT_r est le temps de réaction de l'ouvrage, $H_{début, Q_{drain}}$ et $H_{début, Q_{ref}}$ sont respectivement les heures du début d'écoulement dans le drain et de référence (en entrée ou au bassin versant de référence).

NB

Pour certains ouvrages basés sur la rétention et pour lesquels la sortie de l'ouvrage est unique et simple à mesurer, on peut également estimer un autre indicateur pour un événement pluvieux donné, le temps de réponse (ou *lag-time*) calculé comme le décalage temporel entre le centre de gravité de l'hydrogramme d'entrée d'ouvrage et le centre de gravité de l'hydrogramme de sortie d'ouvrage. Dans le cas où aucun flux d'eau n'est sorti, le *lag-time* est infini.

Exemple d'application

Au niveau de la noue filtrante de Compans, le temps de réaction a été évalué pour tous les événements pluvieux caractérisés afin d'évaluer si l'hypothèse de concentrations anormalement élevées en sortie de drain (entre janvier et mars 2017) pouvaient être dues à des écoulements préférentiels à travers le filtre (Tableau 4). Les temps de réaction pour les événements du 27 février et du 1^{er} mars 2017 étaient comparables à ceux observés pour des teneurs en eau initiales similaires, ce qui indique qu'il n'y avait pas d'écoulements préférentiels exceptionnels pour ces événements, alors que le temps de réaction du 9 janvier était exceptionnellement court, ce qui serait compatible avec l'hypothèse d'écoulements préférentiels. On note qu'il y avait un temps de réaction encore plus court (< 6 min) le 27 juin 2017 alors que la teneur en eau était initialement faible, ce qui indiquerait l'occurrence d'écoulements préférentiels dus à la fissuration d'un sol sec, alors que les concentrations en sortie de noue étaient plus normales pour cet événement. Ainsi, même s'il semble exister des écoulements préférentiels le 9 janvier 2017, cela ne suffit pas pour expliquer la dégradation de performance observée.

Tableau 4. Temps de réaction du drain et teneur en eau initiale du substrat de la noue filtrante à Compans
Des concentrations élevées ont été observées en sortie de drain pour les événements *en gras*.

Événement	Temps de réaction (min)	Teneur en eau initiale (%)
9 mai 2016	204	-
10 mai 2016	104	-
18 mai 2016	151	-
30 mai 2016	148	-
14 juin 2016	286	-
24 octobre 2016	123	-
9 novembre 2016	280	19
9 janvier 2017	11	22
27 février 2017	115	19
1 ^{er} mars 2017	61	20
30 avril 2017	43	18
6 juin 2017	87	15
27 juin 2017	<6	13
28 juin 2017	83	21
24 juillet 2017	148	20
25 juillet 2017	31	22

Déclinaison HT_v : durée de vidange

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : pluie, débit de sortie

Échelle de temps : événement pluvieux

La durée de vidange (HT_v , Eq. 21) est un indicateur explicatif par rapport aux fonctions d'abattement de volume ou de masse ou de concentration des polluants. En effet, si un ouvrage se vide trop lentement après la fin d'un événement pluvieux, l'espace de stockage nécessaire pour accueillir le ruissellement ne sera pas disponible. Si le ruissellement ne peut pas entrer dans l'ouvrage ou surverse immédiatement, cela aura également un effet négatif par rapport à la capacité de l'ouvrage à limiter le flux polluant ou le volume ruisselé.

Si la durée de vidange excède régulièrement celle prévue lors de la conception de l'ouvrage, il est probable que cela aura pour effet une dégradation de la performance. On peut également considérer l'évolution de la durée de vidange au cours du temps : si elle augmente avec le temps, cela serait le signe d'un problème d'évacuation d'eau, lié par exemple au colmatage du substrat filtrant ou du dispositif de drainage.

$$HT_v = H_{fin,Q} - H_{fin,pluie} \quad \text{Eq. 21}$$

où HT_v est la durée de vidange de l'ouvrage, $H_{fin,Q}$ est l'horodate de la fin de débit en sortie d'ouvrage et $H_{fin,pluie}$ l'horodate de la fin de la pluie.

Comme précisé dans l'Encadré 2 - *La séparation de séries de pluie et de débit en événements pluvieux*, la « fin du débit » est souvent délicate à déterminer et cet indicateur HT_v est donc particulièrement sensible à la méthode de séparation des événements pluvieux ou aux paramètres utilisés pour cette séparation. Selon le fonctionnement hydrologique de certains ouvrages et selon la saison, on peut être amené à affiner la détection de la fin des événements pluvieux, à partir d'un seuil fixe de débit de fin ou à partir d'autres critères (retour au débit de base, remontée du débit...).

Déclinaison HTs : temps de séjour

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : volume de stockage moyen, débit moyen de sortie

Échelle de temps : événement pluvieux

Le temps de séjour (HT_s , Eq. 22) est un indicateur explicatif de l'abattement des polluants. En effet, certains processus de rétention des polluants, comme la décantation ou la biodégradation, sont cinétiques et seront d'autant plus efficaces que le temps de séjour de l'eau dans l'ouvrage est long.

Dans certains types d'ouvrages le volume de stockage V_{stock} est constant, ce qui permet d'évaluer HT_s avec seulement des données de débit. Dans des ouvrages jouant un rôle de stockage, $V_{stock, ev}$ peut évoluer au cours de l'événement pluvieux ; ainsi recommande-t-on d'évaluer $V_{stock, ev, moyen}$ pour chaque événement pluvieux. Pour un ouvrage sans milieu poreux (par exemple, un bassin de stockage), une mesure de hauteur d'eau permettrait de caractériser $V_{stock, ev, moyen}$. On ne recommande pas d'évaluer HT_s pour des ouvrages avec un milieu poreux partiellement saturé car le volume de stockage est difficilement évalué. Si on arrive à bien caractériser une relation entre HT_s et un abattement de concentration pour un ouvrage donné, on peut utiliser HT_s pour prévoir la performance de l'ouvrage pour des événements non-échantillonnés.

$$HT_s = \frac{V_{stock, ev, moyen}}{Q_{s, ev, moyen}} \quad \text{Eq. 22}$$

où HT_s est le temps de séjour en heures, $V_{stock, ev, moyen}$ est le volume moyen de l'eau stockée dans l'ouvrage au cours de l'événement et $Q_{s, ev, moyen}$ est le débit moyen en sortie du système évalué au cours de l'événement pluvieux.

Exemple d'application

Les dispositifs de traitement par décantation au fil de l'eau présentent un volume en eau permanent, qui varie de façon limitée avec les débits traversiers. Dans le cas du STOPPOL®, ce volume peut être estimé à partir du niveau d'eau dans la cuve cylindrique et varie entre approximativement 700 L (volume mort de temps sec) et 1 000 L (niveau de surverse). La mesure en continu du niveau d'eau dans le système et du débit sortant permet d'évaluer pour chaque épisode pluvieux un temps de séjour moyen (Eq. 22) mais aussi un temps de séjour minimal (calculé à partir du débit maximal et du niveau de remplissage maximal au cours de l'événement). Pour les 67 événements pluvieux où les mesures de hauteur et de débits étaient valides lors de la campagne de mesure réalisée à Paris, près de la moitié correspondent à des volumes ruisselés entrant dans le système, inférieurs au volume mort de l'ouvrage (volume ne donnant pas lieu à une surverse). Dans ce cas, le volume de l'événement ne permet pas le renouvellement complet de l'eau déjà présente dans la cuve et la notion de temps de séjour telle que définie précédemment ne s'applique pas. Pour les autres événements pluvieux, le temps de séjour moyen décroît avec l'intensité moyenne de la pluie, la valeur médiane étant de 1 h et le premier décile de 16 min. Le temps de séjour minimal au moment du pic de débit est inférieur à 50 mn, avec une médiane de 15 min et un premier décile de 7 min.

Déclinaison HTd : contrôle visuel de l'entrée

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : observation

Échelle de temps : -

Puisque le ruissellement apporte des débris accumulés sur le bassin versant d'apport, il arrive couramment que l'entrée d'un ouvrage de gestion à la source soit bloquée par des déchets, des feuilles ou des sédiments, ce qui réduit sa capacité à accueillir le ruissellement. Ainsi, le contrôle visuel de l'entrée de l'ouvrage est un indicateur explicatif par rapport à la capacité d'un ouvrage de gestion à la source à accueillir le ruissellement. Une observation par temps sec permettra de vérifier si l'entrée de l'ouvrage est obstruée. Dans d'autres cas, il peut être nécessaire d'observer l'écoulement par temps de pluie. En effet, dans le cas d'un ouvrage de gestion à la source avec une arrivée diffuse du ruissellement, l'arrivée d'eau peut même être bloquée par un faible monticule de sédiments.

Exemple d'application

Le contrôle visuel de l'entrée de l'accotement à Compans permet d'observer un cumul de sédiments et un rehaussement du niveau du sol de l'accotement qui dépasse le niveau de la route (Figure 12). Par temps de pluie, on voit que le ruissellement n'entre pas dans l'accotement mais s'écoule le long de la route avant d'arriver à un point bas où tout le ruissellement pénètre. Cette observation permet de comprendre pourquoi le ruissellement n'alimente plus de façon homogène l'accotement et de reconnaître un besoin de maintenance (dans ce cas, l'arasement de l'accotement).

© OPUR



© OPUR

Figure 12. Le cumul de sédiment sur l'accotement à Compans.

Déclinaison HTP: perméabilité de la couche de surface

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : conductivité hydraulique actuelle, conductivité hydraulique visée ou antécédent

Échelle de temps : -

Les ouvrages de gestion à la source dépendent souvent de l'infiltration pour renouveler l'espace de stockage à la surface. La vitesse d'infiltration dépend fortement de la conductivité hydraulique du sol ou du substrat filtrant, communément appelée « perméabilité ». Or, cette perméabilité de la couche de surface peut évoluer dans le temps du fait du colmatage des pores du sol ou du substrat filtrant, du développement racinaire, voire de l'activité biologique. L'évaluation de la perméabilité de la couche de surface peut aider à expliquer la performance hydrologique de l'ouvrage : elle peut aider à comprendre un mauvais fonctionnement d'un ouvrage si on possède des informations par rapport à la conductivité hydraulique visée ou supposée au moment du dimensionnement de l'ouvrage. En effet, si elle est plus faible que prévue, on peut s'attendre à une vidange plus lente de l'ouvrage, ce qui peut limiter sa capacité à accueillir le ruissellement et augmenter la fréquence de surverse. Par ailleurs, une baisse de perméabilité au cours du temps du fait du colmatage peut expliquer une baisse de la performance hydrologique. Cependant, on note que la perméabilité peut être très variable au sein d'un même ouvrage. Étudier son évolution nécessiterait non seulement des mesures de perméabilité avant et après le colmatage, mais aussi des mesures distribuées pour pouvoir discuter du caractère significatif ou non significatif de cette variabilité.

La perméabilité de la couche de surface peut être évaluée par des tests d'infiltration. Des tests non destructifs de mesure de perméabilité en surface comme la méthode du double anneau ou la méthode BEST peuvent être réalisés simplement. Ces tests peuvent également être couplés avec des mesures de perméabilité en profondeur (mais ces tests sont destructifs et nécessitent de faire des trous dans la surface) avec un Porchet ou un perméamètre Guelph.

Exemple d'application

Sur le site de Compans, le substrat filtrant a été sélectionné suite à des tests en laboratoire sur des mélanges de sol et de sables afin d'obtenir une perméabilité de $6 \cdot 10^{-6}$ m/s. Après installation, des mesures de la perméabilité *in situ* avec la méthode BEST montrent une perméabilité du substrat de surface entre $4,8 \cdot 10^{-7}$ et $2,6 \cdot 10^{-5}$ m/s avec une médiane (sur 9 mesures) de $2,9 \cdot 10^{-6}$ m/s. La perméabilité de surface tend donc à être légèrement plus faible que prévu. La perméabilité a également été mesurée en six points à une profondeur de 20 cm par la méthode Guelph ; ces mesures varient entre $1,5 \cdot 10^{-8}$ et $2,6 \cdot 10^{-6}$ m/s avec une médiane de $5,8 \cdot 10^{-8}$ m/s. Cette conductivité est nettement plus faible qu'initialement prévu et correspond également à un débit de traitement et de vidange de l'espace plus faible. Cette observation permet de comprendre, en combinaison avec le faible espace de stockage disponible à la surface, la proportion de surverse relativement élevée observée pour la noue de Compans au cours des premiers mois de fonctionnement.

Reynolds, W. D. et Elrick, D. E. (1985). In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science* 140(4), 292-302.

Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J. M., Cuenca, R., Braud, I. et Haverkamp, R. (2006). Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—BEST. *Soil Science Society of America Journal* 70(2), 521-532.

Kanso, T., Tedoldi, D., Gromaire, M. C., Ramier, D., Saad, M. et Chebbo, G. (2018). Horizontal and Vertical Variability of Soil Hydraulic Properties in Roadside Sustainable Drainage Systems (SuDS)—Nature and Implications for Hydrological Performance Evaluation. *Water* 10(8), 987.

3.3.3 Indicateurs relatifs aux polluants

Les indicateurs relatifs à la performance épuratoire des ouvrages sont précisés dans le Tableau 5, en détaillant les avantages et les inconvénients de chaque indicateur.

Tableau 5. Présentation des indicateurs relatifs aux polluants

⁽¹⁾CME : concentration moyenne événementielle, ⁽²⁾CMA : concentration moyenne annuelle

*Les indicateurs événementiels doivent être évalués pour une dizaine d'événements. On utilisera les variables statistiques pour caractériser l'échantillon de valeurs : premier décile (Q10), la médiane et neuvième décile (Q90).

Groupe d'indicateurs	Déclinaison de l'indicateur	Type d'indicateur	Échelle de temps
PC - Concentration de sortie	PCe1 : CME ¹ de sortie* (D ₁₀ , médiane, D ₉₀)	Descriptif	Événement pluvieux
	PCe2 : rapport de la CME de sortie à une norme* (D ₁₀ , médiane, D ₉₀)	Normatif	
	PCa1 : CMA ² de sortie	Descriptif	Annuelle, intégrée
	PCa2 : rapport de la CMA de sortie à une norme	Normatif	
PM - Masse rejetée	PMe : masse rejetée par événement pluvieux - par m ² imperméabilisé du bassin versant*(PMe1) - par m ² imperméabilisé du bassin versant et par mm de pluie*(PMe2) (D ₁₀ , médiane, D ₉₀)	Descriptif	Événement pluvieux
	PMa : masse annuelle rejetée - par m ² imperméabilisé du bassin versant (PMa1) - par m ² imperméabilisé du bassin versant et par mm de pluie (PMa2)	Descriptif	Annuelle, intégrée

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessite uniquement la mesure de concentration en sortie d'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Difficile à interpréter seul ■ Difficulté à mesurer la CME en sortie lorsque l'exutoire est diffus (par ex. ouvrage infiltrant) ■ Non prise en compte des quantités d'eau associées → pas représentatif de l'impact sur le milieu <ul style="list-style-type: none"> ■ Ne permet pas de qualifier la plus-value de l'ouvrage
<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessite uniquement la mesure de concentration en sortie d'ouvrage ■ Insensibilité au degré de pollution avant traitement ■ Possibilité de comparaison inter événementielle 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Difficulté à choisir une limite normative (NC) pertinente ■ Difficulté à mesurer la CME en sortie lorsque l'exutoire est diffus (par ex. ouvrage infiltrant) <ul style="list-style-type: none"> ■ Non prise en compte des quantités d'eau associées ■ Ne permet pas de qualifier la plus-value de l'ouvrage
<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateur global prenant en compte le comportement au cours de l'année ■ Représentativité par rapport à l'effet sur le milieu 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessite une grande quantité de données ■ Nécessite de la modélisation stochastique ■ Impossibilité de comparaison inter-événementielle ■ Non prise en compte des quantités d'eau associées
<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessite uniquement la mesure de concentration en sortie d'ouvrage ■ Insensibilité au degré de pollution avant traitement ■ Échelle temporelle cohérente avec celle des NQEMA ■ Indicateur global intégrant la variabilité du comportement au cours de l'année 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Idem PCe2 + ■ Difficulté à choisir une limite normative (NC) pertinente ■ Ne permet pas de qualifier la plus-value de l'ouvrage
<ul style="list-style-type: none"> ■ Évaluation globale de l'aménagement (bassin versant et ouvrage) ■ Possibilité de comparaison inter événementielle <ul style="list-style-type: none"> ■ Possibilité de comparaison inter-sites ■ Ne nécessite pas une caractérisation de l'eau arrivant dans l'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Impossibilité d'isoler l'effet de l'ouvrage
<ul style="list-style-type: none"> ■ Évaluation globale de l'aménagement (bassin versant et ouvrage) ■ Indicateurs global intégrant la variabilité du comportement au cours de l'année <ul style="list-style-type: none"> ■ Possibilité de comparaison inter-sites ■ Ne nécessite pas une caractérisation de l'eau arrivant dans l'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Idem Ce2 + ■ Impossibilité de comparaison inter-événementielle <ul style="list-style-type: none"> ■ Impossibilité d'isoler l'effet de l'ouvrage ■ Incertitude élevée associée à l'évaluation de la masse annuelle

Groupe d'indicateurs	Déclinaison de l'indicateur	Type d'indicateur	Échelle de temps
PG - Représentation graphique des concentrations	PG1 : comparaison de la relation des concentrations entrée-sortie avec la ligne première bissectrice	Descriptif, relatif	Plusieurs événements pluvieux
	PG2 : comparaison de la distribution des CME en entrée et en sortie du système d'évaluation	Descriptif, normatif, relatif	Plusieurs événements pluvieux
PCA - Abattement de concentration	PCA1 : abattement de la CME* (D ₁₀ , médiane, D ₉₀)	Relatif	Événement pluvieux
	PCA2 : abattement de la CME médiane	Relatif	Plusieurs événements pluvieux
HV - Abattement de volume (voir Indicateurs hydrologiques)	HV1 : abattement de volume événementiel* (D ₁₀ , médiane, D ₉₀) (voir Indicateurs hydrologiques)	Relatif	Événement pluvieux
	HV2 : abattement de volume annuel (voir Indicateurs hydrologiques)	Relatif	Annuelle, intégrée
PMA - Abattement de masse	PMAe : abattement événementiel de la masse d'un polluant* (D ₁₀ , médiane, D ₉₀)	Relatif	Événement pluvieux
	PMAa : abattement de la masse annuelle d'un polluant	Relatif	Annuelle, intégrée
PS - Contamination du sol	PS1 : rapport de la teneur en polluant dans le sol à celle d'une norme	Normatif	-
HE - Fonctionnement hydraulique	HE1 : temps de réponse (voir Indicateurs hydrologiques)	Explicatif	Événement pluvieux
	HE3 : temps de séjour	Explicatif	Événement pluvieux

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ■ Graphique facile à générer et à interpréter ■ Possibilité de visualiser la variabilité des performances en fonction du niveau de concentration ou du polluant 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Besoin de données appariées en entrée et en sortie ■ Information peu précise ■ Non prise en compte des quantités d'eau associées → pas représentatif de l'impact sur le milieu
<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessite uniquement des mesures de concentration en entrée et en sortie ■ Permet la valorisation de données non-appariées ■ Visualisation de la variabilité temporelle de performance ■ Permet différents types d'interprétation (descriptif, normatif, relatif), avec une analyse fréquentielle 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateur dont l'interprétation peut paraître complexe ■ Non prise en compte des quantités d'eau associées
<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessite uniquement des mesures de concentration en entrée et en sortie ■ Possibilité de comparaison inter événementielle 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessité de données appariées en entrée et en sortie ■ Tend à montrer une efficacité faible lorsque l'eau entrante est peu polluée ■ Non prise en compte des quantités d'eau associées (si forte concentration sur un volume faible ou fort impact très différent)
<ul style="list-style-type: none"> ■ Nécessite uniquement des mesures de concentration en entrée et en sortie ■ Possible d'évaluer avec des données non-appariées 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Impossibilité de comparaison inter-événementielle ■ Tend à montrer une efficacité faible lorsque l'eau entrante est peu polluée ■ Biais possible si les données en entrée et en sortie ne correspondent pas à des périodes homogènes ■ Ne prend pas en compte l'abattement du volume
<ul style="list-style-type: none"> ■ Ne nécessite pas d'échantillonnage de l'eau ■ Possibilité de comparaison inter événementielle 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Incertitude importante liée à l'hypothèse d'homogénéité des concentrations entre l'entrée et la sortie ■ Nécessite de séparer la chronique de débit en événements pluvieux
<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateur global prenant en compte le comportement au cours de l'année ■ Ne nécessite pas d'échantillonnage de l'eau ■ Séparation en événements pluvieux n'est pas nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Incertitude importante liée à l'hypothèse d'homogénéité des concentrations entre l'entrée et la sortie ■ Nécessite une chronique de débit couvrant toute une année
<ul style="list-style-type: none"> ■ Évaluation directe de l'interception du flux polluant (prise en compte du volume et de la concentration) ■ Possibilité de comparaison inter événementielle 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Besoin de données appariées de concentration et de volume ■ Nécessité de séparer la chronique de débit en événements pluvieux
<ul style="list-style-type: none"> ■ Évaluation directe de l'interception du flux polluant (prise en compte du volume et de la concentration) ■ Indicateur global prenant en compte le comportement au cours de l'année 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Besoin de données appariées de concentration et de volume ■ Incertitude élevée associée à l'évaluation de la masse annuelle
<ul style="list-style-type: none"> ■ Explication possible de l'abattement événementiel 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Difficile à calculer ■ Nécessité de séparer la chronique de débit en événements pluvieux

Groupe d'indicateur PC - Concentration de sortie

La **concentration de sortie** (C_S) est la concentration d'un polluant dans l'eau en sortie du système évalué. En tant qu'indicateur descriptif, la C_S permet d'évaluer la qualité de l'eau atteinte par rapport à celle issue d'autres aménagements/ouvrages (on note que si l'on souhaite comparer des concentrations entre ouvrages, il est important que la définition du système évalué soit homogène). Ce type d'interprétation nécessite l'existence d'une base de données de concentrations en sortie d'ouvrages pour un polluant donné.

Déclinaison PCe1 : concentration moyenne événementielle (CME) de sortie

Type d'indicateur : descriptif

Données nécessaires : CME en sortie du système évalué

Échelle de temps : événement pluvieux

La concentration moyenne événementielle rejetée (CME_S) est mesurée par analyse d'un échantillon de l'eau sortant du système évalué, collecté tout au long d'un événement pluvieux, de façon proportionnelle au volume écoulé ou au débit (voir Annexe, Encadré 4 - *Quelques généralités sur les mesures de qualité des eaux pluviales*).

Puisque la CME varie généralement entre les événements pluvieux, pour bien caractériser la performance d'un ouvrage, on recommande de l'estimer pour une dizaine d'événements pluvieux de caractéristiques variées et de calculer la médiane (CME_{50}), avec le premier décile (CME_{10}) et le neuvième décile (CME_{90}) pour évaluer la variabilité. Le calcul de la valeur médiane sera préféré à celui de la moyenne car moins sensible aux fluctuations d'échantillonnage et aux valeurs extrêmes. La comparaison inter-événementielle des CME permet également à faire le lien entre les concentrations atteintes et les conditions de fonctionnement au cours des événements caractérisés.

Exemple d'application

La médiane, le 1^{er} et le 9^e décile des concentrations de nonylphénol (NP) mesurées en sorties des différents ouvrages étudiés dans les projets MicroMegas et Roulépur sont synthétisés en Figure 13. Ce graphique permet de comparer les niveaux de concentration de sortie entre les différents aménagements étudiés, d'évaluer la variabilité temporelle de ces concentrations et de les situer par rapport à une concentration de référence (ici la Norme de qualité environnementale NQE). Deux groupes d'aménagements peuvent être distingués :

- chaussée à structure réservoir (CSR), tranchée, noue d'infiltration, filtre à sable : ces aménagements présentent des concentrations de sortie généralement faibles (inférieures à la NQE pour la majorité des événements), et une variabilité inter-événementielle des concentrations modérée ;

- accotement filtrant, noue filtrante, dépollueur compact, bassin de décantation : il s'agit ici de sites avec des concentrations importantes dans les eaux de ruissellement qui, malgré des abattements importants pour certains ouvrages, présentent des concentrations restant supérieures à la NQE pour plus de 50 % des événements pluvieux. Sur ces sites, le 9^e décile des concentrations de sortie atteint des valeurs pouvant être très fortes, ce qui dénote un dysfonctionnement pour certains événements pluvieux.

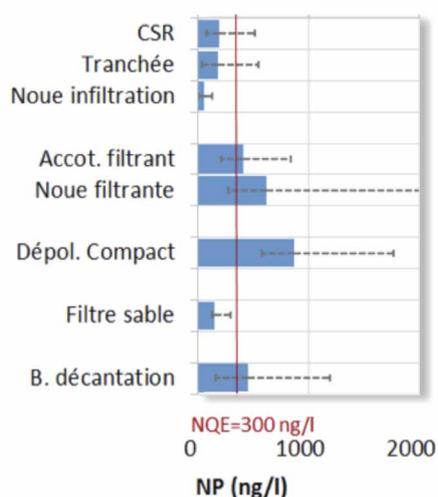


Figure 13. Concentrations en nonylphénol (médiane, premier et 9^e décile) mesurées en sortie de différents ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales - comparaison à la NQE.

Déclinaison PCe2 : rapport de la concentration moyenne événementielle de sortie (CME_S) à une norme

Type d'indicateur : normatif

Données nécessaires : CME en sortie d'ouvrage, norme ou niveau jugé comme acceptable

Échelle de temps : événement pluvieux

Le rapport ($R_{C,ev}$, Eq. 23) de la concentration moyenne événementielle en sortie du système évalué (CME_S) à une valeur seuil de référence (N_C) permet la vérification du respect d'une norme et la caractérisation du degré du dépassement éventuel. Lorsque $R_C \leq 1$, la norme est respectée. Lorsque $R_C > 1$, la norme n'est pas respectée et R_C peut être interprété comme le facteur de dilution nécessaire pour atteindre la norme. Comme pour la CME , on recommande d'évaluer R_C pour une dizaine d'événements pluvieux et de calculer une valeur médiane (R_{C50}), ainsi que les premier et neuvième déciles (R_{C10} et R_{C90}). La distribution de ces R_C permet par ailleurs de déterminer la fréquence de dépassement d'une valeur donnée.

$$R_{C,ev} = \frac{CME_S}{N_C} \quad \text{Eq. 23}$$

où R_C est le rapport de la concentration moyenne événementielle (CME) à une norme (N_C).

On définit N_C comme une concentration jugée comme acceptable en sortie d'ouvrage, par exemple, une concentration de rejet imposée par la Police de l'eau. En absence d'une telle norme, on peut sélectionner une valeur de N_C à partir d'une valeur limite dans le milieu, telle qu'une NQE ou à une concentration prévue sans effet ($PNEC$). Notons que les NQE fixent des objectifs de qualité pour les milieux aquatiques récepteurs, elles ne constituent en aucun cas des normes de rejet applicables aux CME des rejets par temps de pluie. Nous pouvons les utiliser ici pour permettre de qualifier des niveaux de pollution, l'idée étant que les rejets dont les CME sont inférieures aux NQE ne peuvent engendrer de dépassement de la NQE dans le milieu. Nous les utilisons donc qualitativement pour donner une idée des ordres de grandeur des polluants. Le même raisonnement peut être fait pour les $PNEC$. Lorsque nous choisissons de comparer les CME aux NQE , nous choisissons les NQE relatives aux eaux de surface. Fixer la N_C à une NQE ou une $PNEC$ revient indirectement à interpréter R_C comme un facteur de dilution nécessaire. On peut également estimer un

facteur de dilution (D) pour établir N_C (par exemple, $N_C = D \cdot NQE$). Lorsque le niveau de contamination du milieu est bien caractérisé, N_C peut être fixée à la concentration du milieu en amont de l'ouvrage ; cela revient à un objectif de ne pas dégrader la qualité du milieu.

Exemple d'application

À Compans, en sortie du drain de la noue filtrante, les concentrations en fluoranthène, une molécule HAP dont la NQE est de 6,3 ng/L, sont de 47 ng/L en médiane ($Q_{10}=24$ ng/L et $Q_{90}=137$ ng/L). Ainsi, le rapport à la NQE est en médiane de 7,5 ($Q_{10}=3,8$ et $Q_{90}=21,7$). Ces résultats montrent que la NQE est toujours dépassée, même pour l'eau traitée. Ils montrent également que si ce rejet se mélange à une eau non contaminée, une dilution de 7,5 suffirait pour atteindre la NQE dans 50 % des cas (une dilution de 21,7 permettrait d'atteindre la NQE dans 90 % des cas).

Déclinaison PCa1 : concentration moyenne annuelle (CMA) de sortie

Type d'indicateur : descriptif

Données nécessaires : CME et volume en sortie du système évalué

Échelle de temps : événement pluvieux

La concentration moyenne annuelle de sortie (CMA_s) correspond, pour un polluant, au rapport entre la masse annuelle et le volume annuel en sortie d'ouvrage (Eq. 24 et Eq. 25). Si l'on dispose de mesures en continu, au pas de temps dt , du débit Q_i et de la concentration C_i , elle sera donnée par :

$$CMA_s = \frac{\sum C_i Q_i dt}{\sum Q_i dt} \quad \text{Eq. 24}$$

Si les concentrations ont été mesurées en moyennes événementielles (CME), la CMA_s est calculée comme la moyenne pondérée des CME par rapport aux volumes écoulés par événement :

$$CMA_s = \frac{\sum V_{Si} CME_{Si}}{\sum V_{Si}} \quad \text{Eq. 25}$$

où CMA_s est la concentration moyenne annuelle rejetée du système, CME_{Si} est la concentration moyenne événementielle en sortie observée pour l'événement i et V_{Si} et le volume écoulé en sortie d'ouvrage au cours de l'événement i .

La CMA_s est un indicateur pertinent de la qualité de l'eau arrivant au milieu. Associée au volume total de ruissellement rejeté, elle permet d'avoir une vision de l'impact global de l'eau rejetée.

Le calcul exact de la CMA_s nécessite en théorie la connaissance de la concentration moyenne événementielle CME_{Si} et du volume V_{Si} pour tous les événements pluvieux i de l'année. Or, les campagnes de prélèvement et d'analyse ne couvrent en général qu'un nombre limité d'événements pluvieux, et les séries de mesures hydrologiques sont souvent discontinues. On pourra avoir recours à des approches stochastiques (par ex. ajustement d'une distribution statistique sur les CME mesurées, puis tirage dans cette loi des valeurs non mesurées) pour reconstituer les données manquantes. Une approche stochastique (Encadré 3 - Évaluation d'une masse annuelle d'un polluant) permet, en plus de l'estimation de la concentration moyenne annuelle, d'évaluer l'incertitude induite par cette reconstruction.

Lorsque l'échantillon des mesures disponibles est incomplet mais néanmoins suffisant pour décrire la variabilité annuelle, une estimation de la CMA_s pourra être faite en appliquant l'équation 25 (moyenne des CME pondérées par les volumes de ruissellement) aux seuls événements pluvieux mesurés (et non à l'ensemble des événements d'une année). Dans le cas où le nombre d'événements pluvieux analysés est faible (< 10), ce calcul peut induire une incertitude importante. La concentration médiane CME_{50} et la concentration dépassée par 20 % des événements CME_{80} constituent en général des estimateurs par le bas et par le haut, encadrant la concentration moyenne annuelle.

Exemple d'application

Les CME de cuivre ont été mesurées pour 14 événements pluvieux sur une période de 15 mois en sortie du drain de la noue de Compans (Figure 14) et les débits ont été mesurés en continu. Un ajustement statistique a montré que la distribution des CME suivait une loi log-normale de moyenne $\mu \ln = 3,65$ (ce qui correspond à une concentration de $38,5 \mu\text{g/l}$) et d'écart type $S \ln = 0,94$.

La CMA a été calculée pour une période de 1 an à partir de la finalisation de l'aménagement de la noue. 238 événements pluvieux ont pu être délimités sur cette période, en appliquant la méthode décrite dans l'encadré 2 - *La séparation de séries de pluie et de débit en événements pluvieux*. Les CME des événements non échantillonnés (219/238 événements) ont été reconstituées de façon stochastique par tirage aléatoire dans cette loi log-normale. La concentration moyenne annuelle (CMA) en cuivre ainsi calculée est de $64 \mu\text{g/L}$, avec un intervalle de confiance à 95 % de 54 à $78 \mu\text{g/L}$ (obtenu en répétant 10 000 fois le calcul de la concentration moyenne à partir d'une série de tirages).

L'estimation de la CMA par moyenne pondérée sur les seuls 14 événements pluvieux échantillonnés est de $63,3 \mu\text{g/L}$; la moyenne arithmétique est de $62,8 \mu\text{g/L}$. Ainsi, on voit que la CMA calculée avec une méthode stochastique à partir d'une distribution de concentrations pour un échantillon d'événements pluvieux est proche de la moyenne calculée à partir de l'échantillon ; l'avantage principal de la méthode stochastique est qu'elle permet de quantifier les incertitudes qui peuvent être importantes.

La CMA évaluée est supérieure à la médiane des concentrations moyennes événementielles (CME) de $35 \mu\text{g/L}$, puisque les concentrations observées dans le drain suivent une distribution log-normale où des concentrations très élevées sont observées rarement et la moyenne peut être très influencée par ces valeurs. De plus, certaines des valeurs élevées observées au cours de cette période sont associées à des événements avec des volumes importants ; elles pèsent donc beaucoup plus dans la moyenne annuelle. Elle reste inférieure à la CME_{80} qui est de $83 \mu\text{g/l}$.

Pour certains événements pluvieux, une partie des volumes est surversée en surface de noue sans traitement. La concentration sortante globale est alors estimée comme $CME_g = (CME_d * V_d + CME_s * V_s) / (V_d + V_s)$, où V_d est le volume sortant du drain, V_s le volume surversé, CME_d la CME en sortie de drain, CME_s la CME de la surverse. Lorsque l'on considère l'ensemble des sorties de la noue filtrante (drain et surverse), la CMA est plus élevée ($99 \mu\text{g/L}$ avec un intervalle de confiance à 95 % de 83 à $120 \mu\text{g/L}$), puisque les concentrations estimées dans la surverse ($312 \mu\text{g/L}$ avec un intervalle de confiance à 95 % de 255 à $425 \mu\text{g/L}$), sont plus élevées que celles dans le drain ; l'effet de la surverse sur la CMA dépend du volume surversé qui était environ 14 % pendant cette période.

L'évaluation de la *CMA* permet de combiner les concentrations observées avec des mesures de volume pour avoir une mesure globale de la qualité de l'eau en sortie d'ouvrage. À Compans, elle a permis d'observer que les concentrations élevées parfois observées impactent de façon significative le flux annuel (en supposant que les événements échantillonnés sont représentatifs du fonctionnement global). La comparaison de la *CMA* en sortie de drain avec celle combinant la sortie du drain et la surverse permet d'appréhender l'effet de la surverse sur la qualité de l'eau globale en sortie d'ouvrage.

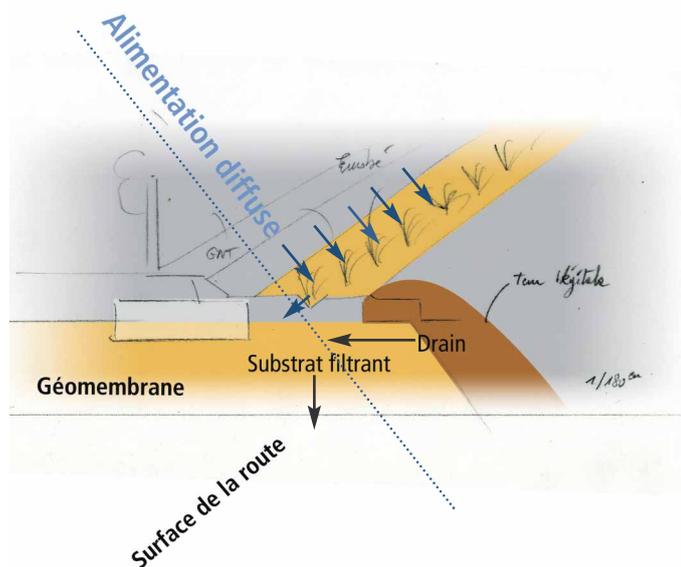


Figure 14. Schéma de fonctionnement de la noue filtrante de Compans.

Déclinaison *PCa2* : rapport de la concentration moyenne annuelle de sortie (*CMAS*) à une norme

Type d'indicateur : normatif

Données nécessaires : *CMA* en sortie d'ouvrage, norme ou niveau jugé comme acceptable

Échelle de temps : annuelle intégrée

On peut évaluer le rapport (RC_{an}) de la concentration moyenne annuelle en sortie du système (*CMAS*) à une valeur seuil de référence (N_c) afin de vérifier le respect d'une norme ou de caractériser son degré de dépassement éventuel. Cet indicateur s'applique selon les mêmes modalités décrites pour RC_{ev} (voir Déclinaison *PA3*). La RC_{an} permet d'avoir une vision de la conformité globale de l'eau sortant du système. À cette échelle de temps, si l'on se base sur une *NQE* pour le seuil de référence N_c , on recommande de choisir la *NQE-MA* qui correspond à la concentration moyenne annuelle admissible dans le milieu.

Exemple d'application

La *CMA* de l'octylphénol, un micropolluant organique identifié comme un polluant prioritaire dans la directive cadre sur l'eau et ayant une *NQE-MA* de 100 ng/L, dans la sortie globale (prenant en compte l'eau drainée et surversée) de la noue filtrante de Compans est de 321 ng/L ; le ratio de la *CMA* à la *NQE* est donc de 3,21. Cela indique que l'eau en sortie tend à dépasser la *NQE* et que si elle est mélangée à de l'eau non polluée dans le milieu naturel, il faudrait une dilution de 3,21 pour atteindre la *NQE*. L'évaluation du rapport de la *CMA* de sortie à la *NQE* permet donc de situer la qualité de l'eau globale en sortie d'ouvrage par rapport à la norme et d'anticiper l'effet qu'elle pourrait avoir sur la conformité réglementaire du milieu en fonction du taux de dilution.

Groupe d'indicateur PM - Masse sortante

La masse d'un polluant M_S sortant d'un ouvrage de gestion des eaux pluviales (Eq. 26) décrit l'impact potentiel du rejet sur la qualité du milieu naturel. Dans le cas où l'ouvrage présente plusieurs sorties (par exemple un drain et une surverse), il convient de sommer les masses associées à ces différentes sorties.

$$M_S = C_S V_S \quad \text{Eq. 26}$$

où M_S est la masse sortante, C_S et V_S sont respectivement la concentration et le volume en sortie du système évalué.

Cependant, puisque la masse M_S dépend du volume sortant V_S , elle dépend aussi de la surface du bassin versant d'apport et de l'importance de la précipitation. Afin de pouvoir comparer la performance de différents systèmes d'aménagement du point de vue de leur capacité à limiter le flux polluant, on peut décliner des indicateurs descriptifs de la masse sortante normalisés par rapport à la surface contributive et éventuellement par rapport à la hauteur de la pluie.

Ces indicateurs permettent de comparer la performance des systèmes d'aménagement, comprenant un ouvrage de traitement et son bassin versant d'apport, en termes de flux polluant émis. On note qu'ils ne permettent pas d'isoler l'effet de l'ouvrage (par exemple, une faible $M_{S,ev}$ peut indiquer que le bassin versant a produit une faible masse de polluant, ou que l'ouvrage a bien abattu la masse produite, ou une combinaison des deux effets).

Déclinaison PMe : masse sortante par événement pluvieux, rapportée à la surface contributive et éventuellement à la hauteur de précipitation

Type d'indicateur : descriptif

Données nécessaires : CME et volume en sortie(s) du système + données pour la normalisation : surface active ou imperméabilisée du bassin versant, surface de l'ouvrage, hauteur de précipitation par événement pluvieux

Échelle de temps : événement pluvieux

La masse rejetée par événement pluvieux $M_{S,ev}$ pourra être déclinée sous forme de deux indicateurs normalisés, de façon à permettre l'intercomparaison de différents aménagements. **PMe1** : indicateur basé sur la masse sortante événementielle normalisée par mètre carré de surface contributive $M_{S,ev/BV}$ (Eq. 27). La surface contributive pourra être assimilée à la surface imperméabilisée du bassin versant d'apport BVa à laquelle s'ajoute la surface de l'ouvrage OGA soumise à la précipitation directe. Notons que l'on pourrait aussi normaliser par rapport à la surface active moyenne (surface du bassin versant x coefficient de ruissellement volumétrique moyen + surface de l'ouvrage), mais cela demande de disposer de séries longues ou pour de nombreux événements pluvieux de la pluviométrie et de la débitmétrie correspondante en entrée d'ouvrage. Cet indicateur permet de s'affranchir des différences induites par les différences de taille des systèmes d'aménagement étudiés.

PMe2 : indicateur basé sur la masse sortante événementielle normalisée par mètre carré de surface contributive et par mm de pluie $M_{S,ev/BV/P}$ (Eq. 27). Cet indicateur permet de s'affranchir des différences induites par les différences de taille des systèmes d'aménagement étudiés mais aussi par les différences de pluviométrie entre les événements pluvieux et entre les sites.

$$M_{S,BV}^{ev} = \frac{CME_{S,ev}V_{S,ev}}{Sur_{imp,BV}} \quad \text{et} \quad M_{S,ev/BV/P} = \frac{CME_{S,ev}V_{S,ev}}{Sur_{imp,BV}h_{P,ev}} \quad \text{Eq. 27}$$

où $CME_{S,ev}$ et $V_{S,ev}$ sont respectivement la concentration moyenne événementielle et le volume événementiel en sortie du système, $Sur_{imp,BV}$ correspond à la somme de la surface imperméabilisée (ou la surface active) du bassin versant et de la surface de l'ouvrage et $h_{P,ev}$ est la hauteur de pluie en mm associée à l'événement pluvieux.

Comme $M_{S,ev/BV}$ et dans une moindre mesure $M_{S,ev/BV/P}$ peuvent varier fortement entre les événements pluvieux, il est recommandé de les évaluer pour une dizaine d'événements et de considérer pour les indicateurs la médiane, le premier décile et le neuvième décile.

Exemple d'application

Dans le cas des surfaces de parkings traditionnels, les masses événementielles mesurées sur les sites des projets MicroMegas et Roulépur étaient en médiane de l'ordre de $10 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{mm}$ ($D_{10} - D_{90}$: 2 - 50 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{mm}$) pour le cuivre et $30 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{mm}$ ($D_{10} - D_{90}$: 9 - 250 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{mm}$) pour le zinc. Pour les parkings perméables, les noues et les tranchées implantés sur les mêmes sites d'étude, ainsi ces masses événementielles de cuivre et de zinc variaient entre 1 à 5 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{mm}$ en médiane, le D_{90} atteignant au maximum 8 $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{mm}$.

Déclinaison PMA : masse annuelle sortante, rapportée à la surface contributive et éventuellement à la hauteur de précipitation

Type d'indicateur : descriptif

Données nécessaires : CME_s et volumes en sortie(s) de l'ouvrage + données pour la normalisation : surface imperméabilisée du bassin versant, surface de l'ouvrage, hauteur de précipitation annuelle

Échelle de temps : annuelle intégrée

Tout comme la masse sortante par événement pluvieux (voir **PMe**), la masse sortante annuelle $M_{S,an}$ (Eq. 28) peut être déclinée sous forme de deux indicateurs normalisés, de façon à permettre l'intercomparaison de différents aménagements.

PMA1 : indicateur basé sur la masse sortante annuelle normalisée par mètre carré de surface d'apport $M_{S,an/BV}$ (Eq. 28), la surface contributive étant assimilée à la surface imperméabilisée du bassin versant d'apport (ou éventuellement sa surface active moyenne) à laquelle s'ajoute la surface de l'ouvrage soumise à la précipitation directe. Cet indicateur permet de s'affranchir des différences induites par les différences de taille des systèmes d'aménagement étudiés.

PMA2 : indicateur basé sur la masse sortante événementielle normalisée par mètre carré de surface contributive et par mm de pluie $M_{S,an/BV/P}$ (Eq. 28). Cet indicateur permet de s'affranchir des différences induites par les différences de taille des systèmes d'aménagement étudiés mais aussi par les différences de pluviométrie entre les événements pluvieux et entre les sites.

$$M_{S,an} = CMA_s * V_{S,an} = \sum CME_{Si} V_{Si} ; M_{S,an/BV} = \frac{M_{S,an}}{Sur_{imp,BV}} \quad \text{Eq. 28}$$

$$\text{et } M_{S,an/BV/P} = \frac{M_{S,an}}{Sur_{imp,BV} * hp,an}$$

où CMA_s est la concentration moyenne annuelle en sortie, $V_{S,an}$ est le volume sortant annuel, CME_{Si} et V_{Si} sont respectivement la concentration moyenne événementielle et le volume événementiel en sortie du système de chaque événement i sur une année, $Su_{imp,BV}$ est la surface contributive du bassin versant total et hp,an est la hauteur de pluie en mm au cours de l'année.

$M_{S,an/BV}$ et $M_{S,an/BV/P}$ requièrent l'évaluation de la masse annuelle du polluant considéré, évaluation délicate, impliquant des incertitudes importantes d'extrapolation des données qui seront idéalement quantifiées avec une approche stochastique (Encadré 3 - *Évaluation d'une masse annuelle d'un polluant*). Tout comme dans le cas de la concentration moyenne annuelle CMA (voir indicateur PCa1), le recours à des estimateurs simplifiés de la masse annuelle est possible lorsque le jeu de données disponibles est suffisant pour décrire la variabilité des contextes au cours de l'année.

Exemple d'application

Dans le cas du cuivre, sur le site de Compans, l'indicateur PMa1 calculé en sortie de la noue filtrante vaut 0,0234 g/m²/an ou 234 g/ha/an. Ce flux, bien que nettement plus faible que celui associé aux eaux de ruissellement brutes du site (0,0839 g/m²/an ou 839 g/ha/an), reste comparable aux valeurs citées dans la littérature pour les eaux de ruissellement brutes d'autres routes. En effet, une synthèse des flux de cuivre associés aux ruissellements sur 27 axes routiers¹⁰ montre que ce flux de 234 g/ha/an est dépassé par 70 % des axes routiers étudiés et non atteint dans 30 % des cas.

L'indicateur PMa2, pour le cuivre en sortie de noue de Compans, est de $5,48 * 10^{-5}$ g/m²/mm, ce qui est supérieur aux valeurs calculées pour les eaux brutes de 40 % de 17 axes routiers. Ainsi, malgré un bon abattement de la masse polluante par la noue filtrante, la masse rejetée à l'aval de ce système d'aménagement reste élevée par rapport à d'autres sites routiers, ce qui s'explique par la charge polluante exceptionnellement élevée générée sur cet axe routier de Compans.

Près de la moitié du flux sortant de la noue de Compans (0,0101 g/m²/an) est associé aux volumes surversés, lorsque la capacité hydraulique du système est dépassée. On peut comparer ces flux annuels de cuivre rejetés en surface de la noue de Compans par surverse aux flux annuels de 0,0015-0,0130 g/m²/an rejetés en surface par 4 ouvrages de prétraitement des eaux de ruissellement issues d'axes routiers. Ce flux est dans la même gamme que ceux sortant de ces autres ouvrages.

L'évaluation des indicateurs PMa1 et PMa2 à Compans a permis de relativiser les flux sortant du système d'aménagement de Compans par rapport aux flux issus des eaux brutes d'autres axes routiers. La comparaison des flux de surface sortant de l'ouvrage par surverse permet de caractériser l'importance de cette partie du fonctionnement de l'ouvrage. On notera que les indicateurs PMa1 et PMa2 ne reflètent pas uniquement la performance de l'ouvrage, mais aussi la production en polluants du bassin versant et les débits devant être traités par l'ouvrage.

Les indicateurs intégrés évalués à l'échelle de l'année et basés sur l'évaluation d'une masse annuelle de polluant (CMA , masse annuelle rejetée par m^2 imperméabilisé, masse annuelle rejetée par m^2 imperméabilisé et par mm de pluie, abattement annuel de masse de polluant rejeté), présentent un intérêt particulier en termes de représentativité de l'effet global de l'ouvrage sur le milieu aquatique.

Cependant, l'évaluation d'une masse annuelle de polluant (Eq. A) nécessite des données de volume et de concentration au cours d'une année complète, ce qui rend leur évaluation délicate. En effet, si le débit et la pluie sont généralement enregistrés en continu, dans les conditions de terrain, les pannes ou les dysfonctionnements sont fréquents. Ainsi, après validation de ces séries de données (une étape essentielle avant leur utilisation), il est rare d'avoir une série annuelle complète. Les données manquantes doivent être reconstruites, généralement à l'aide d'un modèle hydrologique. De plus, le nombre d'événements pluvieux prélevés pour analyses étant limité, on est également amené à reconstituer les concentrations moyennes événementielles (CME) pour les événements non échantillonnés. Ces deux types de reconstruction sont des sources d'incertitudes importantes qui peuvent biaiser les conclusions si elles ne sont pas prises en compte.

$$M_{S,an} = CMA_s * V_{a,s} = \sum CME_{Si} * V_{Si} \quad \text{Eq. A}$$

où $M_{S,an}$ est la masse annuelle rejetée et CME_{Si} et V_{Si} sont, respectivement, la concentration moyenne événementielle et le volume événementiel en sortie du système de l'événement i .

On peut quantifier ces incertitudes par une approche stochastique où l'on évalue la masse annuelle un grand nombre (~10 000) de fois, en choisissant à chaque répétition les variables incertaines (par exemple, les paramètres du modèle hydrologique ou les CME des événements non échantillonnés) selon les distributions possibles ou observées pour les événements caractérisés. Mener ce type d'évaluation est lourd, mais nécessaire si l'on souhaite tirer des conclusions fortes d'une évaluation de la masse annuelle. Si l'on ne quantifie pas les incertitudes de ce type de calcul, le résultat doit être considéré comme un ordre de grandeur.

Dans le cas où l'on n'est pas en mesure de mettre en œuvre une telle approche stochastique de reconstitution des données manquantes, mais que l'on dispose néanmoins d'un échantillon représentatif des CME (une dizaine d'événements pluvieux de caractéristiques variées et couvrant toutes les saisons) d'une part, et d'un échantillon représentatif des volumes événementiels d'autre part, une estimation grossière de la masse annuelle pourra être réalisée (Eq. B). Il conviendra de rester prudent dans l'interprétation de cette donnée, compte tenu des incertitudes de l'extrapolation.

$$M_{s,an} = CMA * V_{s,an}$$

$$\text{avec } CMA = \sum(CME_{Si}V_{Si}) / \sum V_{S,ev_i} \text{ et } V_{s,an} = \sum V_{S,ev_i} * h_{p,an} / \sum h_{p,ev_i} \quad \text{Eq. B}$$

où la concentration moyenne annuelle CMA est estimée à partir de la moyenne pondérée par les volumes des concentrations événementielles, et le volume sortant annuel $V_{s,an}$ est estimé à partir de la somme des volumes événementiels mesurés pondérée par la fraction de la hauteur de pluie annuelle correspondante. Avec : CME_{S,ev_i} concentration moyenne de l'événement i , V_{S,ev_i} volume associé à l'événement i , h_{p,ev_i} hauteur de pluie associée à l'événement i , $h_{p,an}$ hauteur de pluie annuelle.

10 POUR ALLER PLUS LOIN

Gamme des flux de micropolluants sur des axes routiers

Huber, M. et Helmreich, B. (2016). Stormwater management: calculation of traffic area runoff loads and traffic related emissions. *Water* 8(7), 294.

Exemples de l'évaluation de flux polluants dans des ouvrages de gestion à la source

Flanagan, K. (2018). Evaluation de la rétention et du devenir d'un panel diversifié de micropolluants dans un ouvrage de biofiltration des eaux de ruissellement de voirie. Thèse Université Paris-Est.

Groupe d'indicateur PG - Représentation graphique de concentrations

Des représentations graphiques des concentrations en entrée et en sortie du système évalué permettent la visualisation des gammes de concentrations observées, la comparaison à une valeur seuil de référence (une norme), ainsi que la visualisation de l'écart entre l'entrée et la sortie. Bien que plus complexes à mettre en œuvre, elles permettent de mettre en avant la variabilité des concentrations et d'identifier des périodes où les performances sont inhabituelles. Ces types de graphique peuvent ainsi servir à la fois d'indicateurs descriptifs, normatifs et relatifs de la performance du système en termes de la qualité de l'eau atteinte.

Déclinaison PG1 : visualisation de la relation entre les concentrations entrée-sortie et comparaison avec la ligne de première bissectrice

Type d'indicateur : descriptif, normatif, relatif

Données nécessaires : CME en entrée d'ouvrage, CME en sortie d'ouvrage

Échelle de temps : plusieurs événements pluvieux

La représentation graphique des concentrations en sortie en fonction des concentrations en entrée, pour des échantillons entrée-sortie appariés (c'est-à-dire CME en entrée et en sortie correspondant au même événement pluvieux), et la comparaison de cette relation avec la première bissectrice permet de visualiser l'évolution de la qualité de l'eau dans le système étudié. Chaque point représente une paire de valeurs mesurées en entrée et en sortie du système d'évaluation au cours d'un même événement pluvieux, avec en abscisse la valeur en entrée et en ordonnée la valeur en sortie. Des valeurs sous la première bissectrice indiquent un abattement des concentrations dans l'ouvrage alors que les valeurs au-dessus de la première bissectrice correspondent à une émission. On peut ainsi analyser rapidement l'impact de l'ouvrage sur une variété de polluants.

Ce type de graphique peut également être construit pour d'autres caractéristiques de la qualité de l'eau, comme la température (pour laquelle on pourrait observer un effet éventuel de tampon si la pente de la relation entrée-sortie est plus faible que la première bissectrice), ou la conductivité, ou encore la proportion d'un contaminant présent en phase dissoute (pour visualiser l'effet d'un ouvrage sur la spéciation dissous/particulaire).

Exemple d'application

La Figure 15 montre, pour les éléments trace métalliques (ETM), la comparaison de la répartition de la fraction dissoute (rapport concentration en phase dissoute / concentration en phase totale) entre les effluents issus des sites références à l'entrée du bassin de rétention Django Reinhardt (DjR Entrée) et du parking traditionnel (noté ASP) par rapport respectivement à la sortie du bassin et aux systèmes à la source (Chaussée à structure réservoir = CSR, système muni de la tranchée et de la noue). Les points au-dessus de cette 1^{re} bissectrice montrent par exemple que les micropolluants en sortie sont davantage sous forme dissoute qu'en « entrée ».

Pour les ETM, les concentrations en sortie des ouvrages de gestion à la source sont plutôt plus dissoutes que celles à l'exutoire de la référence ASP. Les points sont en effet majoritairement au-dessus de la 1^{re} bissectrice. C'est un peu moins vrai pour le bassin de retenue (graphe de droite) dont les points restent en majorité dans le quart inférieur gauche du graphe avec des points également plus proches de la 1^{re} bissectrice indiquant des entrées et sorties majoritairement particulaires sauf pour le strontium et le molybdène, deux ETM connus pour être hydrophiles, et le cadmium qui présente une grande variété de comportements (tantôt particulaire, tantôt dissous).

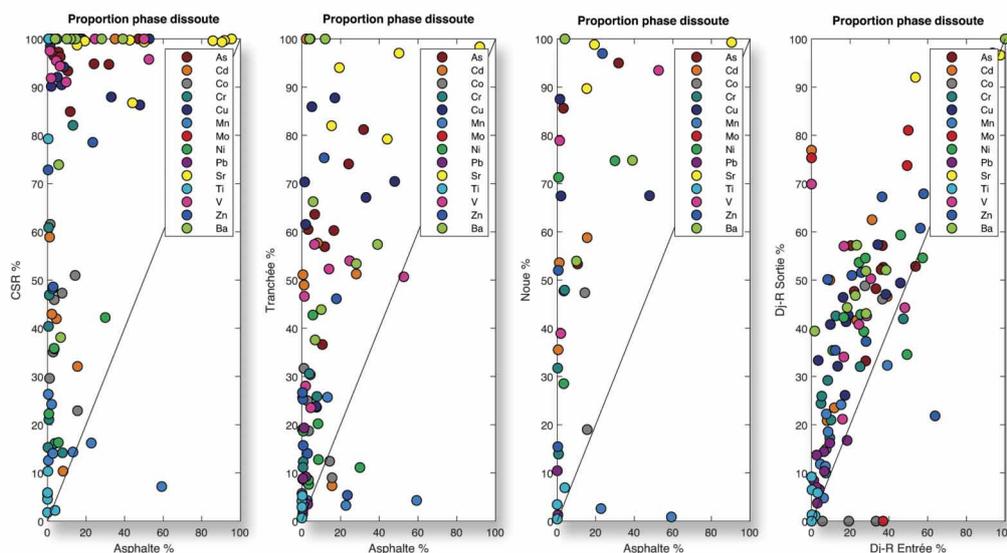


Figure 15. Fraction dissoute (en %) pour les métaux sur les 3 sites de gestion à la source (Chaussée à structure réservoir, tranchée, noüe) et le site de gestion centralisée (Bassin de retenue Django Reinhardt).

Déclinaison PG2 : visualisation et comparaison des distributions statistiques des concentrations moyennes événementielles (CME) en entrée et en sortie du système

Type d'indicateur : descriptif, normatif, relatif

Données nécessaires : CME en entrée d'ouvrage, CME en sortie d'ouvrage

Échelle de temps : plusieurs événements pluvieux

La comparaison de la distribution de concentrations moyennes événementielles en entrée (CME_E) et en sortie du système évalué (CME_S) est un indicateur graphique permettant d'évaluer et de communiquer plusieurs aspects d'une série de données. Elle a l'avantage de pouvoir être construite avec des données non appariées. Pour construire ce type de graphique, il est nécessaire de disposer d'au moins une dizaine d'observations pour chaque point de mesure. On évalue d'abord la probabilité de non-dépassement empirique associée à chaque concentration observée. Pour ce faire, on ordonne les concentrations observées de façon croissante, attribuant à chaque valeur un indice (*i*) égal à son rang dans la liste, puis on évalue la probabilité de non-dépassement selon l'Eq. 29 :

$$f_i = \frac{i}{n} \quad \text{Eq. 29}$$

où *f_i* est la probabilité de non-dépassement empirique, *i* est l'indice de la valeur et *n* est le nombre de valeurs dans la série de données.

Ensuite, on trace un graphique avec en abscisse la concentration observée et en ordonnée la fréquence de non-dépassement associée. Puisque les concentrations de polluants dans les eaux urbaines suivent généralement une loi log-normale, il peut être pertinent de tracer l'axe des concentrations en échelle logarithmique.

11 POUR ALLER PLUS LOIN

Hannouche, A., Joannis, C. et Chebbo, G. (2017). Assessment of total suspended solids (TSS) event load and its uncertainties in combined sewer system from continuous turbidity measurements. *Urban Water Journal* 14(8), 789-796.

Flanagan, K., Branchu, P., Boudahmane, L., Caupos, E., Demare, D., Deshayes, S., Dubois, P., Meffray, L., Partibane, C., Saad, M. et Gromaire, M.-C. (2018). Field performance of two biofiltration systems treating micro-pollutants from road runoff, *Water Research* 145, 562–578.

Exemple d'application

À Compans, les distributions de CME observées sur le bassin versant de référence et dans le drain de la noue filtrante ont été comparées dans la Figure 16. Certains échantillons collectés n'étaient pas appariés entre ces deux points ; ce type d'exploitation permet d'exploiter la totalité des données.

On observe des concentrations en sortie de drain nettement plus faibles que celles des eaux issues du bassin versant de référence. Cela indique une bonne performance en termes d'abattement de concentration. Les deux concentrations tendent à suivre une distribution log-normale (la distribution est quasi linéaire sur une échelle logarithmique). Cependant, les trois CME les plus élevées observées en sortie du drain de la noue filtrante sont décalées par rapport aux autres points de la distribution. Ainsi, ce graphique a permis de mettre en avant des événements avec une performance dégradée par rapport au fonctionnement normal. Une analyse plus approfondie de ces événements (tous ayant eu lieu en hiver) a montré que la filtration était moins efficace du fait d'une abondance anormale de particules de taille très faibles et non facilement filtrées à cette période.

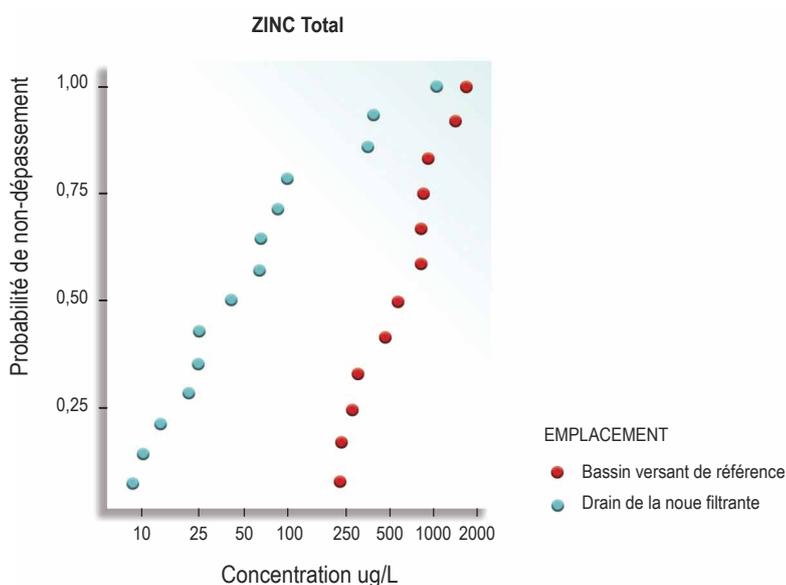


Figure 16. Distribution de concentrations en zinc total sur le bassin versant de référence et dans le drain de la noue filtrante. Les lignes verticales représentent l'incertitude analytique.

Groupe d'indicateur PCA - Abattement de concentration

L'abattement de la concentration (EC) est un indicateur permettant d'évaluer la performance épuratoire d'un ouvrage en comparant la qualité de l'eau en sortie du système évalué à celle d'une référence (l'eau en entrée de l'ouvrage ou issue d'un bassin versant de référence). Cet indicateur peut être assimilé à un abattement du flux polluant uniquement si l'ouvrage est conservatif en termes de volume.

L'abattement de concentration est connu pour être sensible à la qualité des eaux traitées : l'abattement sera d'autant meilleur que les eaux brutes sont très chargées. Ainsi, les abattements de concentration seront souvent faibles lorsque les eaux brutes sont peu chargées et l'indicateur CME_s sera plus pertinent dans ce cas.

Déclinaison PCAe : abattement de la concentration moyenne événementielle

Type d'indicateur : relatif

Données nécessaires : CME en entrée d'ouvrage, CME en sortie d'ouvrage

Échelle de temps : événement pluvieux

On peut évaluer $E_{C,ev}$ (Eq. 30) à l'échelle de l'événement pluvieux en considérant des concentrations moyennes événementielles appariées. Tout comme pour l'indicateur CME , il est indispensable du fait de la variabilité inter-événementielle de calculer cet indicateur pour un échantillon d'événements pluvieux suffisamment important (au moins 8 événements) et varié. La performance globale pourra être décrite à travers la valeur médiane (EC_{50}), le premier décile (EC_{10}) et le neuvième décile (EC_{90}), ce qui permet de décrire la tendance centrale, ainsi que la variabilité de la performance observée.

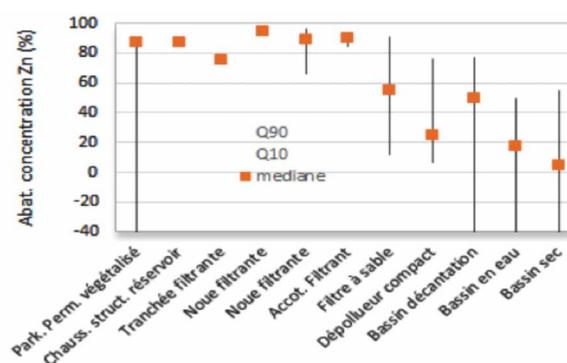
$$E_{C,ev} = 1 - \frac{CME_s}{CME_{ref}} \quad \text{Eq. 30}$$

où $E_{C,ev}$ est l'abattement de concentration à l'échelle événementielle, CME_s est la concentration moyenne événementielle à la sortie de l'ouvrage et CME_{ref} est la concentration moyenne événementielle de référence.

Exemple d'application

L'indicateur PCAe a été calculé et comparé pour les 11 ouvrages étudiés dans les trois projets Matriochkas, MicroMegas et Roulépur (Figure 17). Les abattements les plus élevés et également les plus stables d'un événement pluvieux à un autre sont obtenus pour les ouvrages basés sur la filtration au travers d'un matériau poreux ; ceci est vérifié sur le zinc et en grande partie sur les autres polluants. Des abattements de concentration plus faibles en médiane, mais aussi beaucoup plus variables d'un événement à un autre sont observés dans le cas où la décantation est le processus dominant, et notamment lorsque les concentrations particulières en entrée sont très faibles.

Figure 17. Médiane, 1^{er} et 9^e décile de l'abattement en concentrations pour le zinc pour les différents sites d'observations des projets Roulépur, MicroMegas et Matriochkas.



Déclinaison PCAm : abattement de la médiane des concentrations moyennes événementielles

Type d'indicateur : relatif

Données nécessaires : CME en entrée d'ouvrage, CME en sortie d'ouvrage

Échelle de temps : plusieurs événements pluvieux

Dans le cas où l'on possède des données non appariées (c'est-à-dire que les concentrations n'ont pas été mesurées pour les mêmes événements pluvieux en entrée et en sortie), on peut évaluer l'abattement de la médiane des concentrations moyennes événementielles ($E_{c,médiane}$, Eq. 31). $E_{c,médiane}$ est une mesure du décalage entre la tendance centrale des concentrations obtenues en sortie d'ouvrage par rapport à celle de référence. Cet indicateur ne permet pas d'évaluer la variabilité de la performance ou de comparer la performance entre événements pluvieux.

$$E_{c,médiane} = 1 - \frac{CME_{S,médiane}}{CME_{ref,médiane}} \quad \text{Eq. 31}$$

où $E_{c,médiane}$ est l'abattement de la concentration médiane, $CME_{S,médiane}$ est la médiane des concentrations moyennes événementielles à la sortie de l'ouvrage et $CME_{ref,médiane}$ est la médiane des concentrations moyennes événementielles de référence.

Groupe d'indicateur PMA - Abattement de masse

L'abattement de la masse d'un polluant (E_M) est un indicateur relatif permettant de caractériser la capacité d'un ouvrage à intercepter le flux polluant. Cet indicateur a un intérêt clair mais son estimation nécessite des données de concentration et de volume, en entrée et en sortie. Son interprétation peut être limitée en cas de mesures manquantes ou invalidées. Puisqu'il intègre l'abattement de la concentration et l'abattement du volume, il peut être intéressant d'évaluer également ces indicateurs afin de mieux comprendre le processus principal de réduction de flux.

Déclinaison PMAe : abattement de la masse événementielle d'un polluant

Type d'indicateur : relatif

Données nécessaires : CME en entrée d'ouvrage, CME en sortie d'ouvrage

Échelle de temps : plusieurs événements pluvieux

À l'échelle de l'événement pluvieux, l'évaluation de l'abattement de masse ($E_{M,ev}$, Eq. 32) nécessite des mesures appariées des concentrations moyennes événementielles et des volumes événementiels, pour la référence et en sortie d'ouvrage. Il est indispensable du fait de la variabilité inter-événementielle de calculer cet indicateur pour un échantillon d'événements pluvieux suffisamment important (au moins 8 événements) et varié. La performance globale pourra être décrite par la valeur médiane (e_{f50}), le premier décile (e_{f10}) et le neuvième décile (e_{f90}), ce qui permet de décrire la tendance centrale, ainsi que la variabilité de la performance observée.

$$E_{M,ev} = 1 - \frac{CME_S V_{S,ev}}{CME_{ref} V_{ref,ev}} \quad \text{Eq. 32}$$

où $E_{M,ev}$ est l'abattement événementiel de la masse d'un polluant, CME_S et CME_{ref} sont respectivement les concentrations moyennes événementielles en sortie et de référence et $V_{S,ev}$ et $V_{ref,ev}$ sont respectivement les volumes événementiels en sortie et de référence.

Exemple d'application

L'indicateur PMA_e a été calculé dans le cas du cuivre pour les 11 ouvrages étudiés dans les trois projets Matriochkas, MicroMegas et Roulépur. La Figure 18 présente sa valeur médiane, et la compare aux valeurs médianes des indicateurs PCA_1 (abattement de la concentration événementielle) et HV_{ev} (abattement du volume événementiel). La performance d'un ouvrage en termes d'abattement de la masse d'un polluant apparaît clairement conditionnée à la fois par sa performance épuratoire (traduite par l'abattement des concentrations) mais aussi par sa performance hydrologique.

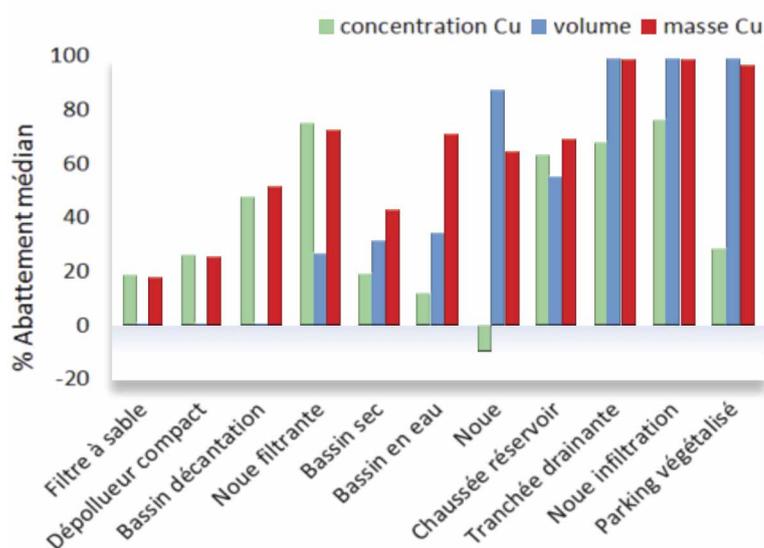


Figure 18. Abattement volumétrique, en concentrations et en masse dans le cas du cuivre pour les 11 ouvrages étudiés dans les trois projets Matriochkas, MicroMegas et Roulépur.

Déclinaison PMAa : abattement de la masse annuelle d'un polluant

Type d'indicateur : relatif

Données nécessaires : CME en entrée d'ouvrage, CME en sortie d'ouvrage

Échelle de temps : annuelle

L'abattement annuel de la masse d'un polluant ($E_{M,an}$, Eq. 33) est un indicateur relatif permettant de caractériser la capacité d'un ouvrage à intercepter le flux polluant qui intègre le fonctionnement de l'ouvrage tout au long de l'année. Évaluer $E_{M,an}$ nécessite un calcul de la masse annuelle du polluant considéré en entrée ($M_{ref,an}$) et en sortie ($M_{s,an}$) de l'ouvrage. Ce type d'évaluation est délicat, impliquant généralement une étape d'extrapolation des données disponibles ou de reconstitution des données manquantes (Encadré 3 - Évaluation d'une masse annuelle d'un polluant). L'évaluation de $E_{M,an}$ est donc sujette à des incertitudes importantes qui seront idéalement quantifiées avec une approche stochastique.

$$E_{M,an} = 1 - \frac{M_{s,an}}{M_{ref,an}} = 1 - \frac{\sum CME_{S,ev_i} V_{S,ev_i}}{\sum CME_{ref,ev_i} V_{ref,ev_i}} \quad \text{Eq. 33}$$

où $E_{M,an}$ est l'abattement annuel de la masse d'un polluant, CME_{S,ev_i} et CME_{ref,ev_i} sont respectivement les concentrations moyennes événementielles en sortie et de référence pour l'événement i et V_{S,ev_i} et V_{ref,ev_i} sont respectivement les volumes événementiels en sortie et de référence pour l'événement i . La somme considère tous les événements de l'année.

Exemple d'application

L'abattement de la masse annuelle de cuivre par la noue filtrante à Compans dans sa forme stabilisée, établi en couplant les mesures expérimentales avec une approche stochastique, est de 72 % (avec un intervalle de confiance à 95 % de 65 à 77 %). Cet abattement est plus faible que l'abattement médian de concentration observé dans l'eau drainée de la noue filtrante (76 %) malgré un abattement de volume de 25 % par la noue filtrante. Cela s'explique essentiellement par une surverse qui comptabilise environ 12 % (avec un intervalle de confiance à 95 % de 10 à 16 %) du cuivre entrant. L'abattement de la masse annuelle permet d'évaluer l'efficacité de l'ouvrage en termes de gestion de la masse de polluant, intégrée à l'échelle de l'année. L'évaluation à l'échelle annuelle permet de relativiser les tendances observées pour certains événements par rapport à l'année complète.

Groupe d'indicateur PS - Contamination du sol

Si l'on souhaite évaluer la performance d'un ouvrage par rapport aux fonctions de contrainte « maintien du potentiel de biodiversité du sol » ou « limiter l'exposition humaine à la pollution », on peut caractériser les teneurs en polluants accumulés dans le sol ou dans la couche de sédiments. Afin de caractériser la pire contamination, on recommande d'échantillonner le sol de surface à proximité de l'arrivée d'eau, où les teneurs en polluants provenant du ruissellement sont généralement les plus élevées. Par la suite, on parlera de sol, ou parfois de sédiment, car ces indicateurs peuvent être également appliqués aux sédiments présents à la surface des ouvrages.

Déclinaison PS1 : rapport de la teneur en polluant dans le sol à celle d'une norme

Type d'indicateur : normatif

Données nécessaires : teneur dans le sol, norme

Échelle de temps : -

Le rapport (R_S , Eq. 34) de la teneur en polluant du sol ou des sédiments à une valeur seuil de référence (N_S) permet de situer le niveau de contamination de ce sol ou sédiment par rapport à des valeurs guides, de mettre en évidence une surcontamination par rapport à ces valeurs guides et de caractériser le degré du dépassement éventuel. Lorsque $R_S \leq 1$, la valeur guide est respectée.

$$R_S = \frac{S}{N_S} \quad \text{Eq. 34}$$

où R_S est le rapport de la teneur en polluant dans le sol (S) à un référentiel (N_S).

Il n'existe pas de normes de qualité du sol en France sur lesquelles s'appuyer pour sélectionner un N_S pertinent. En revanche, il existe dans plusieurs autres pays des normes fixant des seuils d'intervention (teneur maximale admissible d'un polluant dans le sol), pour différents usages du sol ou par rapport au risque écotoxicologique. On pourra s'inspirer par exemple des seuils d'intervention existant aux Pays-Bas ou en Suède. On peut également choisir comme valeur de référence une teneur d'un polluant dans le sol prévue sans effet ($PNEC$).

Dans le cas des sédiments, on pourra également prendre comme référence le niveau S_1 fixé par l'arrêté du 09/08/2006 du ministère de l'Écologie et du Développement durable pour apprécier la qualité des sédiments extraits de cours d'eau ou des canaux.

Exemples d'application

À Nantes, dans les sédiments présents en surface, à la sortie de la noue Dumont (Bottière Chenaie), la teneur en zinc était en 2017 de 205 mg kg⁻¹ pour une valeur de référence (Arrêté du 09/08/2006 du ministère de l'Écologie et du Développement durable (sédiments cours d'eau ou des canaux – Niveau de référence S_1) de 300 mg kg⁻¹; soit $R_S = 0,68$. On n'observe donc pas de dépassement de la valeur de référence. En 2018, $R_S = 0,40$ mais il est peu probable que cette valeur plus faible traduise une réelle diminution de la teneur. En effet, ces sédiments sont hétérogènes et les 2 prélèvements n'ont vraisemblablement pas été effectués exactement au même endroit. On peut donc conclure, sur la base de cet indicateur, à une probable absence de contamination par le zinc en sortie de l'ouvrage.

De la même manière, l'indicateur a été calculé (3 années de suivi) pour le bassin en eau de la Ville au Blanc, en prenant le cas de l'arsenic dans les sédiments en sortie d'ouvrage. La valeur de référence pour l'arsenic est de 30 mg kg⁻¹; les teneurs dans les sédiments sont de 254, 220 et 292 mg kg⁻¹ pour 2016, 2017 et 2018 respectivement. La valeur de référence est largement dépassée et on obtient des rapports R_S de 8,47, 7,33 et 9,73 pour ces trois années, ce qui témoigne dans ce cas d'une probable contamination à l'arsenic, souvent observée sur la région nantaise du fait de la présence « naturelle » d'arsenic dans les sols.

12 POUR ALLER PLUS LOIN

Recommandations sur le lieu de prélèvement de sol dans un ouvrage

Tedoldi, D. (2017) - Mesure et modélisation de la contamination du sol dans les ouvrages de gestion à la source du ruissellement urbain. 2017. Thèse Université Paris Est, <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01703864>.

Tedoldi, D., Chebbo, G. et Gromaire, M.C. (2020). Infiltrer les eaux pluviales, c'est aussi maîtriser les flux polluants - État des connaissances et recommandations techniques. Guide technique, OPUR, AESN.

Normes

(hollandaise) NMHSPE, (2000). Circular on target values and intervention values for soil remediation. The Hague: The Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. <http://www.vrom.nl/>

(suédoise) Swedish EPA, (1997). Development of generic guidelines values. Model and data used for generic guidelines values for contaminated soils in Sweden. Report 4639. Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm.

3.4 Indicateurs socio-techniques

La réflexion des équipes de sciences humaines et sociales au sein des projets Roulépur et MicroMegas permet de proposer un certain nombre de critères et d'indicateurs dont la finalité est d'attirer l'attention des maîtres d'ouvrages et des maîtres d'œuvre ayant en charge la conception et la gestion d'un parc d'ouvrages, des organismes « prescripteurs » de suivi comme les polices de l'eau, ainsi que des organismes finançant et mettant en œuvre des études de suivi d'ouvrages (agences de l'eau, bureaux d'études et organismes de recherche).

En effet, les études menées font apparaître que nombre de dispositifs de contrôle à la source des eaux pluviales sont pensés comme des « objets de nature urbaine » remplissant des fonctions de services hydrologiques ou de dépollution (lutte contre les inondations générées par le ruissellement, abatement des polluants générés par la circulation automobile...) et des fonctions de service sociales (paysage urbain, parking automobile, circulation piétonne, déambulation, réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain...). Ces fonctions sont multiples et parfois contradictoires. De plus, le contrôle des flux de micropolluants vers les milieux récepteurs ne sont que très rarement une fonction technique recherchée dès la conception.

Ce déficit de prise en compte de la question des micropolluants est d'ailleurs renforcé par l'incertitude réglementaire qui existe autour des performances attendues des dispositifs de contrôle à la source. La question de la qualité est inscrite dans le cadre légal de tout projet d'aménagement porté par les collectivités. Cette obligation se traduit par la nécessité de constituer un dossier « loi sur l'eau » exigeant de prendre en compte des éléments quantitatifs et qualitatifs avant tout rejet au milieu naturel. Cependant, les services de l'État imposent généralement peu fréquemment des contraintes en matière de qualité des rejets (hors contraintes locales fortes, rejet en milieu sensible notamment). Si la règle est opérationnelle en ce qui concerne la maîtrise quantitative (volume, fréquence ou débit) de ces rejets, car elle est énoncée dans la réglementation et donc retranscrite dans les documents de planification, il en va tout autrement en matière de qualité des rejets. La règle est ici un principe plutôt qu'une norme.

Dans le cadre des territoires étudiés, on constate que les recommandations en ce qui concerne les ouvrages de maîtrise à la source des eaux pluviales tiennent en trois idées :

- privilégier une gestion à la parcelle ;
- infiltrer là où cela est possible et/ou déconnecter les eaux des réseaux ;
- avoir de préférence recours à des dispositifs superficiels et multifonctionnels. C'est plutôt au cours des interactions entre le maître d'ouvrage et les services de police de l'eau qui précèdent le dépôt du dossier « loi sur l'eau » que les agents de l'administration peuvent manifester certaines préférences pour certains types de solutions techniques.

À Paris et à Lyon, l'objectif est de chercher à diminuer les volumes notamment pour les pluies courantes de faibles périodes de retour de manière à jouer sur les flux d'eau donc sur les masses rejetées. Nous avons vu que dans le cadre des suivis réalisés dans les trois projets, ce pari pourrait s'avérer concluant. Si cette stratégie peut être développée par une collectivité de grande taille comme une métropole pour la gestion des espaces publics, la gestion ou la prise en compte des micropolluants et plus largement des polluants à l'échelle d'un projet restent beaucoup plus aléatoire en l'absence de recommandations concrètes et d'éléments faciles à intégrer dans les études. Par exemple, le dossier « loi sur l'eau » sur le campus Lyon Tech La Doua, dont le maître d'ouvrage est l'université de Lyon, est succinct sur la question de la pollution. Les chiffres de niveau de pollution sont ceux d'études datant des années 90 et issus de systèmes qui ne sont pas liés à des *OGA*.

Dès lors, les acteurs qui prennent en charge l'entretien et la maintenance de ces dispositifs et les usagers sont peu, voire pas du tout, concernés par cette problématique. Par ailleurs, au-delà de la question des micropolluants, les retours d'expériences sur les techniques alternatives font très souvent état d'appropriations de ces objets de nature urbaine par des gestionnaires et des publics. Ces appropriations sont souvent décalées par rapport aux fonctions techniques ou sociales imaginées par leurs concepteurs.

Dans ce contexte d'incertitude quant aux fonctions et aux performances attendues des dispositifs de contrôle à la source, on peut, en complément des indicateurs hydrologiques et pollutions, proposer **des indicateurs socio-techniques qui prennent en compte des fonctions urbaines et sociales tout en préservant les fonctions hydrologiques et lutte contre la pollution**. Ces indicateurs ne sont pas forcément tous pertinents pour les maîtres d'ouvrages qui ne recherchent peut-être pas les fonctions urbaines visées par ces indicateurs. Il convient donc de les sélectionner si besoin est.

Des systèmes de points sont proposés pour l'évaluation des performances. Ces systèmes ne sont pas à visée quantitative mais ont plutôt l'objectif de marquer qualitativement des performances permettant de faire des comparaisons entre situations et non d'évaluer de manière rigoureuse. Ils ne sont absolument pas cumulables entre eux pour rendre un score global sur les aspects socio-techniques.

13 POUR ALLER PLUS LOIN

Objet de nature urbaine

Ah-Leung, S. (2017). Les objets de nature : quelles places dans la ville? Conditions d'appropriation des dispositifs de gestion des eaux pluviales de la métropole lyonnaise. Thèse Université de Lyon.

3.4.1 Délimitation du système évalué et données à acquérir

Les indicateurs socio-techniques sont appliqués ici à un système plus large qu'un ouvrage, par exemple l'ouvrage ou un ensemble d'ouvrages « pris » dans leurs différents « environnements » technique et professionnel, juridique et politique, social et urbain, ce qu'on appellera un dispositif de contrôle à la source des eaux pluviales. Certains indicateurs pourraient s'appliquer au projet d'aménagement, ce qui désigne un élément du projet urbain dans lequel doit être intégré un dispositif de gestion à la source des eaux pluviales : une voirie, un équipement public, un ensemble de logements, ou au projet urbain, le projet de développement urbain dans lequel s'inscrit le projet d'aménagement. On note que les projets d'aménagements et leur(s) dispositif(s) de gestion à la source des eaux pluviales correspondent à un espace « affecté » - au sens de la planification urbaine - mais peuvent être amenés à remplir différentes fonctions dans le projet urbain.

Ces indicateurs sont élaborés à partir de différents types de données (récits, observations, propos recueillis dans le cadre d'entretiens) construites à travers différentes techniques d'investigation comme les enquêtes par exemple. Ces enquêtes qui doivent être établies au travers de protocoles solides, peuvent prendre plusieurs formes. Toutefois, trois grands types sont utilisables :

- **l'entretien**, qui est une méthode qui engage au moins deux personnes en vis-à-vis. Le but est d'obtenir des données sur un groupe ou une catégorie sociale. Il existe plusieurs types d'entretien (directif, semi-directif, libre) qui vise différents objectifs comme la recherche d'informations précises, ou encore la vérification d'hypothèses ;

■ **le questionnaire**, qui est une méthode consistant à poser un ensemble de questions qui s'enchaînent de manière structurée et réfléchie. Ce type d'enquête vise la production de chiffres et s'applique presque exclusivement à un échantillon de la population. De plus, ce type d'enquête nécessite un grand nombre de répondants pour être représentative ;

■ **l'observation**, qui consiste à observer les comportements sociaux d'un individu seul ou d'un groupe dans les lieux mêmes de leurs activités, sans en modifier le déroulement ordinaire. Le but est d'enregistrer les comportements des individus ou les traces de leurs comportements sur une période plus ou moins longue. Une des difficultés est que l'observateur ne doit pas interférer avec l'environnement observé.

Quel que soit le type d'investigation, les traitements qui y sont associés peuvent être qualitatifs ou quantitatifs. Par exemple, un entretien peut être traité par analyse thématique manuelle en y extrayant les verbatim (bribes de paroles) ou à travers la production de figures lexicométriques permettant de déterminer à travers des modèles, les mots les plus associés entre eux.

Les indicateurs proposés (Tableau 6) s'appliquent à la gestion des ouvrages ainsi qu'à leur conception. La conception de tels ouvrages passe par la mise en place d'un réseau d'acteurs qui permette de penser la réversibilité (ou l'adaptabilité) des dispositifs. Les indicateurs que nous proposons visent non seulement à associer le plus largement possible concepteurs et gestionnaires, à inciter à une plus grande concertation avec les usagers et les différents publics amenés à s'approprier les espaces publics qui composent un dispositif, à prendre en compte la spécificité de chacun des contextes, mais également à penser un processus qui permette d'emprunter plusieurs « chemins socio-techniques ».

3.4.2 Présentation des indicateurs socio-techniques

Tableau 6. Indicateurs socio-techniques

Groupe d'indicateurs	Déclinaison de l'indicateur	Type d'indicateur	Échelle de temps
SA - Gestion	SA ₁ : faciliter l'entretien et la maintenance	Explicatif	Conception de l'ouvrage
	SA ₂ : prise en compte des coûts d'entretien et de maintenance	Explicatif	Conception/suivi de l'ouvrage
	SA ₃ : aptitude à être un démonstrateur	Explicatif	Vie de l'ouvrage
	SA ₄ : gestion des interfaces entre espaces publics et privés	Explicatif	Conception et vie de l'ouvrage
SB - Qualité de l'environnement urbain	SB ₁ : accueil de la biodiversité	Explicatif	Conception et vie de l'ouvrage
	SB ₂ : gestion des risques de nuisances liées à la faune et la flore	Explicatif	Conception et vie de l'ouvrage
	SB ₃ : prévention des mésusages et des pratiques « déqualifiantes »	Explicatif	Conception et vie de l'ouvrage
	SB ₄ : intégration dans le projet urbain	Explicatif	Conception de l'ouvrage

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ■ Anticiper les conflits organisationnels (inter et intra-services) induits par une absence ou un manque d'identification des responsabilités et des compétences nécessaires à l'entretien et la maintenance des dispositifs <ul style="list-style-type: none"> ■ Permet de vérifier les conditions qui pourraient faciliter l'entretien et la maintenance ■ Facile à renseigner 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ne permet pas de quantifier la réelle facilité d'entretien ou de maintenance ou le ressenti des personnels qui en sont en charge réellement
<ul style="list-style-type: none"> ■ Permettrait de chiffrer les conditions financière permettant d'assurer l'efficacité (hydrologique et lutte contre les polluants) et la pérennité de l'ouvrage 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Difficile à renseigner en raison du caractère subjectif de l'évaluation de ce qui a été anticipé en matière d'entretien et de maintenance. Difficile d'estimer <i>a priori</i> ces coûts aussi bien au moment de la conception que du suivi. Risque par ailleurs d'évolution des prix dans le temps des prestations d'entretien et de maintenance
<ul style="list-style-type: none"> ■ Permet de s'assurer de l'effectivité de la communication autour du contrôle à la source (en vue de convaincre les acteurs des projets urbains) <ul style="list-style-type: none"> ■ Facile à renseigner 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Les conditions d'un bon démonstrateur ne le sont pas autant (mesure, suivi...)
<ul style="list-style-type: none"> ■ Permet de mettre en évidence les faiblesses potentielles de dispositifs en chaîne appartenant ou étant gérés par des personnes ou organismes différents ■ Permet d'anticiper des défaillances possibles dans l'entretien et la maintenance d'ouvrages 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Comme cela concerne des projets urbains d'envergure, dont la conception et la mise en œuvre peuvent prendre des années, voire des décennies, il y a des difficultés à disposer d'informations qui évoluent et à garder trace des démarches et décisions
<ul style="list-style-type: none"> ■ Seul indicateur permettant de prendre en compte l'enjeu d'intégration de la nature en ville 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Demande de faire appel à des compétences que les équipes techniques n'ont pas
<ul style="list-style-type: none"> ■ Permet d'apporter des éléments tangibles pour gérer d'éventuels conflits avec usagers et riverains 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Demande de faire appel à des compétences que les équipes techniques n'ont pas
<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateur apportant des informations pouvant servir à plusieurs services techniques/gestion et à la bonne appropriation par les usagers 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Évaluation subjective des items proposés : une réunion de consultation peut revêtir des formes variées et des interactions diverses entre services et usagers qui conduisent à des degrés différents de coproduction de l'espace concerné par le dispositif
<ul style="list-style-type: none"> ■ Indicateur permettant de qualifier et de comparer l'ouvrage en tant qu'espace multifonctionnel au regard du projet urbain 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Évaluation pouvant varier suivant les individus qui la conduisent

Groupe d'indicateur SA - Gestion

Au-delà de l'adéquation technique d'un ouvrage de gestion à la source à répondre aux enjeux environnementaux associés, une gestion efficace des processus de planification, de conception et d'exploitation est essentielle. Différents aspects sont à prendre en compte notamment pour : assurer la pérennité du fonctionnement de l'ouvrage, optimiser des coûts associés, valoriser des retours d'expériences à des fins pédagogiques ou de communication.

Déclinaison SA₁ : facilité d'entretien et de maintenance

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : enquêtes auprès des services techniques

Échelle de temps : conception de l'ouvrage

La performance est mesurée sur une échelle de 0 à 7 points (indicateur pouvant également être exprimé en %) :

- 0** = aucune disposition spécifique n'a été prise pour anticiper l'entretien et la maintenance du dispositif ;
- 1** = aucune disposition spécifique n'a été prise pour anticiper l'entretien et la maintenance du dispositif mais un service a été identifié pour assurer l'entretien ;
- 2** = un cahier des charges a été élaboré par le concepteur du dispositif sans qu'un service ait été identifié (et donc informé, consulté ou concerté) pour l'entretien et de la maintenance du dispositif ;
- 3** = un cahier des charges + un service identifié (ou des services) ;
- 4** = un cahier des charges + un service identifié + informé (ou des services) ;
- 5** = un cahier des charges + un service identifié + consulté (échange entre les prescriptions d'entretien par le concepteur et les besoins exprimés par le service chargé de l'entretien et de la maintenance) (ou des services) ;
- 6** = un cahier des charges + un service identifié + concerté (réflexion concertée dès la conception avec au besoin l'intégration dans le design des contraintes d'entretien et de maintenance) (ou des services) ;
- 7** = un cahier des charges + un service identifié + concertation des différents niveaux hiérarchiques (réflexion concertée dès la conception avec au besoin l'intégration dans le design des contraintes d'entretien et de maintenance) (ou des services).

Exemple d'application

Typiquement, le site Lyon Tech La Doua est dans la situation 1 et le site Django Reinhardt est en situation 4, des règles d'entretien pour les bassins de retenue ayant été formalisées par le service exploitation.

L'absence initiale de concertation autour des modalités d'entretien de l'ouvrage pèse encore aujourd'hui dans la carence d'entretien et dans le flou qui persiste autour de la répartition des tâches de maintenance du dispositif. Les agents de la Direction de l'eau et de l'assainissement (DEA) sont aujourd'hui persuadés que les services espaces verts de la Ville de Rosny-sous-Bois sont au courant de la finalité de l'ouvrage et des contraintes d'entretien inhérentes à la mesure des performances de l'ouvrage. Pourtant, à la base détenue par le service espaces verts, l'information concernant les fonctions de l'ouvrage et les conditions de son entretien n'a pas été communiquée aux autres services. Cependant un cahier d'entretien a été rédigé. La performance pourrait être évaluée ici à 3.

Comme le montre le Tableau 7 qui représente un extrait du carnet d'entretien, l'absence d'identification dès la phase conception-réalisation des gestionnaires responsables de l'entretien et de la maintenance de chacun des éléments du dispositif et la non-prise en compte de la composante végétale du filtre planté conduit à d'importantes défaillances dans l'entretien et dans la maintenance.

14 POUR ALLER PLUS LOIN

Entretien des dispositifs d'infiltration

Moura, P. (2008). Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain. Thèse Institut national des Sciences appliquées de Lyon.

Tableau 7. Extrait du carnet d'entretien du filtre planté de Rosny-sous-Bois, édité par Composante Urbaine

Domaine : assainissement placette	Descriptif de l'entretien	Fréquence
Collecte des eaux pluviales	<ul style="list-style-type: none"> ■ Regards avaloirs à grille avec décantation Curage des décantations des regards avaloirs ■ Regards de visite sans décantation Pas d'entretien ■ Caniveau à fente Curage par hydrocreuse via l'avaloir ■ Caniveau à grille Curage après enlèvement de la grille 	3 fois par an
		3 fois par an
		3 fois par an
Transport des eaux pluviales	<p>Canalisations de transport et de liaison interbassins Ø 200 à Ø600 Curage par hydrocreuse</p>	1 fois par an
Stockage et dépollution des eaux pluviales	<p>Bassin de dépollution des eaux pluviales</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Curage par décantation des regards d'alimentation et d'évacuation des bassins de dépollution Les sables et boues décantés seront traités et éliminés selon les filières conformes la réglementation selon les degrés de pollution ■ Curage par hydrocreuse du système de drains ■ Remplacement des substrats (gravillons, sables) ■ Dépose de la couche superficielle de la bande plantée jusqu'au géotextile anticontaminant : <ul style="list-style-type: none"> - mise en jauge des plantes - dépose et stockage de la terre végétale ■ Dépose et stockage des substrats ■ Remplacement des substrats 	3 fois par an
		1 fois par an
		Tous les 15 ans. À ajuster en fonction du trafic

Déclinaison SA₂ : prise en compte des coûts d'entretien et de maintenance

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : données de coûts actualisées

Échelle de temps : conception de l'ouvrage

Les coûts d'entretien ou de maintenance sont difficiles à évaluer. Les bases de données spécifiques et rigoureuses à chaque ouvrage ou même relatives à une opération sont peu, voire jamais, présentes, ce qui complexifie l'appréhension des coûts. Les raisons sont multiples. Par exemple, lorsque des curages de bassins de retenue sont planifiés, les

entreprises de curage se déplacent souvent pour différentes opérations (curage de tronçons de réseau ou d'autres bassins) ce qui fait que l'attribution d'un coût spécifique à un ouvrage ou une opération n'est pas aisée. Les coûts de personnels sont également compliqués à évaluer dans le cas de personnels permanents. Les coûts sont par ailleurs très sites dépendants (frais de déplacement par exemple pour intervention d'une entreprise extérieure) et évoluent dans le temps. Il existe néanmoins des fourchettes de coûts très qualitatives qui donnent des ordres de grandeurs, mais qui sont peu fiables.

Par ailleurs, les coûts d'entretien et de maintenance devraient intégrer des coûts induits (liés par exemple à des dégradations ou des mésusages) là encore difficilement prévisibles. La prise en compte des coûts induits, indépendamment de la possibilité de les évaluer avec plus ou moins de précision, peut soulever des débats sur l'opportunité même de développer des systèmes de contrôle à la source car les hypothèses de gestion peuvent varier du tout au rien. Selon le périmètre de l'évaluation des coûts induits, la prise en compte des coûts d'entretien et de maintenance peut conduire à l'autojustification ou au contraire à l'invalidation d'un projet de gestion alternative.

Nous n'apporterons donc ici que peu d'éléments chiffrés qui pourraient régir la performance économique. Par conséquent, dans le cadre de cet indicateur nous n'avons pas cherché à l'appliquer aux projets étudiés.

Il serait cependant important que les coûts directs ou indirects soient répertoriés dès la conception pour examiner leur suivi avec plusieurs niveaux d'appréhension.

- Pour les systèmes *ad hoc* (développé en interne pour un territoire en particulier), y-a-t-il eu une estimation des coûts d'entretien et de maintenance ? Si oui, sur quelle base ?
- Pour les systèmes dits « industriels », y-a-t-il eu une estimation des surcoûts associés à l'entretien prescrit par l'industriel ? O/N/partiellement ?
- Les calculs de coûts d'entretien et de maintenance sont-ils fondés sur des hypothèses de fonctionnement ?
- Les calculs de coûts d'entretien et de maintenance sont-ils fondés sur des hypothèses de fonctionnement bas, moyen ou extrême ? (par ex. en matière hydrologique, différents niveaux de service et différentes hypothèses de régimes hydrologiques intégrant un possible impact du changement climatique ; en matière de fréquentation des usagers...).

Déclinaison SA₃ : aptitude à être un démonstrateur

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : interviews auprès des services techniques

Échelle de temps : vie de l'ouvrage

Comme l'on distingue le démonstrateur technique et le démonstrateur pédagogique, on identifie deux cas de figure de la performance d'un ouvrage ou dispositif.

A. L'ouvrage sert de démonstrateur technique : échelle de 0 à 4 points (indicateur pouvant également être exprimé en %).

Y-a-t'il eu une évaluation des performances ? Oui : 1 à 4 points / Non : 0 point (indicateur pouvant également être exprimé en %).

L'indicateur se décompose comme suit (les points se cumulent) :

- l'évaluation des performances quantitatives et qualitatives du dispositif a été réalisée *a priori* (sur projet) 1 point ;
- l'évaluation des performances quantitatives et qualitatives du dispositif a été réalisée *a posteriori*, sur la base d'une instrumentation du dispositif 1 point ;

- les performances quantitatives et qualitatives affichées sont contextualisées (en fonction de spécificités physiques, géographiques ou sociales) 1 point ;
- les performances qualitatives et quantitatives contextualisées sont menées sur le long terme 1 point.

B. L'ouvrage sert de démonstrateur pédagogique : échelle de 0 à 4 points (indicateur pouvant également être exprimé en %).

L'indicateur se décompose comme suit (les points se cumulent) (indicateur pouvant également être exprimé en %) :

Des moyens sont-ils mis en œuvre ? Oui : 1 à 4 points / Non : 0 point

- panneaux d'information ou autre système d'information permanent 0,5 point ;
- supports pédagogiques dédiés et visites (éducation nationale et populaire) 0,5 point ;
- consultations publiques (interaction avec le public, visites, réunions, ...) 0,5 point ;
- support d'expérimentation pédagogique vis à vis des étudiants ou de scolaires 0,5 point ;
- support d'information / formation pour les gestionnaires 1 point.

Quelle intégration des enjeux est opérée dans les différents supports de communication ? Aucune : 0 ou sinon 1 point si un ou plusieurs supports de communication évoque(nt) à la fois le fonctionnement hydrologique du dispositif et les services écosystémiques associés (biodiversité, cadre de vie, bien être en ville, paysage, santé publique, éducation à l'environnement...).

Exemple d'application

À travers les données produites au sein du programme MicroMegs, nous avons pu tester cet indicateur sur le campus LyonTech-La Doua.

En termes de démonstrateur technique, le site pourrait obtenir une note de 3,5/4 (87,5 %). Les données pour l'analyse des performances en termes de gestions qualitatives et quantitatives ont bien été produites *a priori* au moment de l'étude mais de manière très sommaire au moment de l'adoption des techniques si l'on en juge l'étude et le dossier de déclaration au titre de la loi sur l'eau, mais cela a été fait (1 point). Ce site est expérimental et a mobilisé des moyens techniques importants liés à de la recherche. Des suivis fins tant quantitatifs que qualitatifs contextualisés ont donc été menés (2 points). Le site est intégré à un observatoire (OTHU) qui devrait assurer à terme un suivi sur le long terme mais... seulement à terme. Les données de long terme ne sont donc pas disponibles à ce jour (d'où le 0,5 point sur le 4^e item).

En termes de démonstrateur pédagogique, le site pourrait obtenir également la note de 2,5/4 (62,5 %). Malgré l'absence de panneaux (0 point sur le 1^{er} item), des supports pédagogiques (cartes, dépliants et jeux de piste) sont présents à l'attention du grand public (visiteurs du site) (0,5 sur le 2^e item). Des visites sont également proposées lors d'événements comme la conférence internationale Novatech ou la fête de la science chaque année (0,5 sur le 3^e item). Toutefois, il convient de signaler que ces actions sont davantage tournées vers un public extérieur au site. En effet, les enquêtes menées montrent que peu d'utilisateurs du site connaissent les techniques alternatives présentes et leurs fonctions même si les sites servent ponctuellement à la pédagogie d'un des départements de l'INSA (0,5 point). Il convient donc, lors de l'exploitation de cet indicateur, de prendre en compte les différents types de publics existants (sachants, non-sachants, usagers réguliers, occasionnels, et personnels techniques...). L'enquête sociale sur le campus montre également que la cible formation/information des personnels techniques a été manquée (0 point). En revanche, l'ensemble des enjeux sont partiellement abordés et intégrés pour le grand public (0,5 point / 1 pt pour le dernier item).

Le score en absolu (qui n'a pas beaucoup d'intérêt en soi) montre cependant la marge de progression pour faire du campus un démonstrateur plus complet encore.

Déclinaison SA₄ : gestion des interfaces entre espaces publics et privés

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : analyse des organisations

Échelle de temps : conception et vie de l'ouvrage

Pour mesurer le fonctionnement des dispositifs résultant d'une mutualisation de la gestion des eaux pluviales dans les espaces publics et dans les espaces privés, l'indicateur ci-dessous est proposé. Il se décompose comme suit (indicateur pouvant également être exprimé en %). Les points sont cumulables et varient entre 0 et 2,5.

- Dans la conception des ouvrages, les conditions (temps de retour, hauteurs de pluie à intercepter, limite de débit...) prises en compte pour les parcelles privées d'une part et, pour les espaces publics mutualisant leurs éventuels rejets d'autre part, ont-elles été clairement définies ? 0,5 point.
- Dans la conception des ouvrages, les conditions techniques prises en compte (temps de retour, hauteurs de pluie à intercepter, limite de débit...) pour les parcelles privées d'une part et, pour les espaces publics mutualisant leurs éventuels rejets d'autre part, ont-elles été clairement définies sur la base d'une étude globale (étude diagnostic à une échelle globale) ? 0,5 point.
- À la livraison des ouvrages sur les parcelles privées, a-t-on contrôlé les plans de récolement des ouvrages privés et des ouvrages publics ? 0,5 point.
- Les choix techniques pour la gestion de l'eau dans les parcelles privées et dans les espaces publics sont-ils cohérents ? 1 point qui se décline comme suit :
 - a-t-on anticipé le risque de défaillance dans la maintenance d'un ouvrage dans l'ensemble des ouvrages (en cascade) ? 0,5 point ;
 - a-t-on prévu les servitudes qui garantissent la pérennité du dispositif lorsque ce sont des propriétaires privés ou une maîtrise d'usage (concessionnaire/déléguataire) ? 0,5 point.

Exemple d'application

Située en zone inondable, la zone d'aménagement concerté (ZAC) du Trapèze à Boulogne-Billancourt est organisée autour d'un parc inondable de 7 hectares intégrant un bassin en eau permanent. Sa topographie permet le stockage des eaux pluviales « peu polluées » et en fait un bassin d'écroulement en cas de crue de la Seine. Couplé aux sous-sols des parkings publics et privés rendus inondables, un tel aménagement permet de compenser l'urbanisation de la zone d'expansion de crue. La contrainte du respect de la « transparence hydraulique » des constructions, inscrite dans le plan de prévention des risques d'inondation, devient pour les aménageurs une double opportunité : elle permet tout à la fois de mutualiser (entre domaine public et espaces privatifs) les coûts induits par la gestion des eaux pluviales et de penser un urbanisme autorisant des surfaces de plancher importantes et des espaces publics ou des espaces extérieurs privatifs de tailles considérables. Deux principes structurent la gestion des eaux pluviales au sein de cette ZAC. Les eaux pluviales « chargées », issues des voiries, empruntent un réseau enterré jusqu'à un ouvrage de traitement, puis sont rejetées en Seine suivant un débit et une qualité réglementés. Les eaux de pluie « claires », ayant ruisselé sur les toitures et les surfaces non circulées par les voitures, sont récupérées et infiltrées dans les jardins en cœur d'îlots ou acheminées vers les noues paysagères dans les espaces publics piétonniers. Les eaux claires résiduelles qui ne sont pas infiltrées sont acheminées vers le parc de Billancourt et stockées dans un bassin à des fins d'arrosage. Ce double système d'assainissement des eaux pluviales est complété par un ensemble de toitures végétalisées et de surfaces minimales de pleine terre imposées en cœur d'îlot.

Le territoire à aménager a été divisé en macro-lots et chacun d'entre eux confié à un architecte coordonnateur (associé à un paysagiste) chargé de déterminer les hauteurs et les densités des constructions prescrites par un plan d'ensemble, de concevoir les fiches de lots et d'organiser avec les promoteurs les consultations de maîtrise d'œuvre pour leur attribution. Chaque macro-lot a ainsi fait l'objet d'un partenariat public-privé, c'est-à-dire d'une collaboration entre la SAEM Val-de-Seine Aménagement, société d'économie mixte – aidée d'un architecte-urbaniste et d'un paysagiste qui fixent les règles d'ensemble et contrôlent leur application à l'échelle de la ZAC – et un consortium de sociétés de promotion immobilière auquel a été vendu le foncier des macro-lots. Les macro-lots (certains pouvant atteindre 80 000 m²) ont ensuite été subdivisés en lots et droits à construire, répartis entre les promoteurs selon la nature des constructions. Les contraintes de développement et les prescriptions des projets privés ont été élaborées, négociées puis inscrites dans le cahier des charges de cession de terrains. Les possibilités de subventions accordées par le Conseil général des Hauts-de-Seine et l'Agence de l'eau Seine-Normandie participent également de la faisabilité économique de cet ambitieux modèle de gestion alternative des eaux pluviales. La mutualisation de certains aménagements pose cependant question. Ainsi, la ville de Boulogne-Billancourt a imposé que la moitié de la surface des terrains soit dévolue à l'espace public des rues, promenades, jardins et parcs, l'autre moitié aux îlots de construction. Cette partition des surfaces a pour conséquence une forte densité construite à l'intérieur des îlots eux-mêmes tandis qu'une grande partie des espaces publics est mutualisée entre les macro-lots. Le système de gestion des eaux pluviales est lui-même structuré par cette partition entre ces deux espaces et ces deux dynamiques. Dans chaque macro-lot, le réseau d'eaux pluviales est organisé en plusieurs niveaux, avant même le rejet dans l'espace public. Ainsi, dans le macro-lot B3, par exemple, on dénombre quatre étapes : la collecte au niveau des toitures des bâtiments ; le rejet vers les jardins ; le passage par des bassins, au niveau du sol ; la descente vers des cuves ou réservoir enterrés, d'où l'eau est envoyée vers l'espace public et un système de noues par des pompes de relevage. Dans ce macro-lot, le dernier niveau pose de réels soucis car il déroge à la règle générale de gestion gravitaire des eaux pluviales. Face à l'importance des pluies à gérer et des surfaces imperméabilisées, le promoteur a préféré renoncer à une gestion gravitaire et aérienne car le juste dimensionnement des bassins extérieurs aurait nécessité de sacrifier de la surface constructible. Il a donc fallu ajouter des cuves souterraines pour stocker les flux d'eau prévus et éviter que les bassins ne débordent trop fréquemment. Cette solution ne va pas sans occasionner aujourd'hui d'importants problèmes en termes de gestion et d'entretien. Face à un système si sophistiqué, il faudrait un entretien et une maintenance irréprochables à tous les niveaux. À la direction des parcs de la communauté d'agglomération Grand Paris Seine-Ouest (gestionnaire des espaces verts et du parc), on regrette de ne pas avoir été écouté, ni d'ailleurs même impliqué, lors de la conception de la ZAC. Désormais, un véritable apprentissage est nécessaire et de nouveaux problèmes apparaissent régulièrement. Dans chaque macro-lot, un syndic de copropriété ou une association foncière urbaine libre pour chaque bâtiment, avec chacun son prestataire extérieur de gestion, sont responsables de l'entretien et de la maintenance. Mais dans un système de macro-lots, à qui revient la responsabilité de gérer des réservoirs enterrés ou des bassins qui ne sont affiliés à aucun bâtiment spécifique ? Est-ce du ressort de la municipalité alors que ces espaces, dont la destination originelle est « mi-publique, mi-privée », tendent à devenir de plus en plus privés ? L'accès au public initialement prévu à certaines heures de la journée s'est en effet progressivement transformé en une fermeture permanente de ces espaces interdisant de fait l'accès aux bassins et aux cuves. Par ailleurs, les cuves enterrées et les pompes de relevage, sont largement invisibles et les parkings souterrains sous lesquels elles sont positionnées, deviennent difficilement franchissables. Sans une attention particulière, il y a fort à parier

que ces objets techniques qui constituent l'interface entre le macro-lot et l'espace public, deviendront rapidement un obstacle dans tout le cycle de l'eau imaginé à l'échelle de la ZAC. Enfin, certains habitants ont tendance à penser que ces espaces au statut incertain ne sont pas entretenus ou alors s'approprient les lieux et n'hésitent pas à faire des plantations personnelles, notamment dans les noues, en pensant que ces espaces leur appartiennent. À la lumière de ce retour d'expérience sur l'aménagement de la ZAC du Trapèze, on peut procéder comme suit à la notation des critères.

■ Dans la conception des ouvrages, les conditions de mutualisation des rejets (temps de retour, hauteurs de pluie à intercepter, limites de débits...) entre parcelles privées et espaces publics ont été clairement définies 0,5 point.

■ Ces conditions calculées pour les parcelles privées d'une part et, pour les espaces publics mutualisant leurs éventuels rejets d'autre part, ont été clairement définies sur la base d'une étude globale 0,5 point.

■ Au fil des travaux et à la livraison des ouvrages sur les parcelles privées, maîtrise d'œuvre et maîtrise d'ouvrage ont bien contrôlé les plans de récolement des ouvrages privés et des ouvrages publics 0,5 point.

Cependant, on constate que le contrôle n'exclut pas la malfaçon. Ainsi, pour assurer une bonne cohérence du système hydraulique, le maître d'œuvre devait effectuer des visites quasi quotidiennes, maîtriser le planning, s'assurer de la justesse des plans de recollement, et porter une attention particulière à la réception des pieds d'immeubles. La recherche d'une diversité architecturale imposait un calcul très précis du « calage du point de sortie en bas des bâtiments », tous différents. Pour s'assurer du respect des calculs et de l'arrêt de la police de l'eau, la SAEM a dû avoir recours à un bureau d'études, chargé également de contrôler la quantité et la qualité des eaux rejetées au milieu. Malgré tous ces efforts et bien que nombre d'acteurs aient été impliqués dans les procédures de contrôle de conformité, tous les points de raccordement ne sont pas exactement à l'endroit exigé, posant des problèmes pour le bon écoulement des eaux.

■ Les choix techniques pour la gestion de l'eau dans les parcelles privées et dans les espaces publics ne sont pas complètement cohérents : 0 point.

Le risque de défaillance dans la maintenance d'un ouvrage dans l'ensemble des ouvrages (en cascade) n'a pas été anticipé. Les servitudes qui garantissent la pérennité du dispositif lorsque ce sont des propriétaires privés ou une maîtrise d'usage déléguée (concessionnaire/délégataire) n'ont pas été clairement prévues.

L'opération aurait alors un indicateur global de 1,5 sur 2,5 (60 %) et l'évaluation met en évidence une fois de plus les marges de progrès et la complexité de cette opération.

Groupe d'indicateur SB - Qualité de l'environnement urbain

Déclinaison SB₁ : accueil de la biodiversité

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : étude faunistique et floristique

Échelle de temps : conception et vie de l'ouvrage

Cet indicateur suppose que dans la conception et la gestion de l'ouvrage, des compétences en matière de prise en compte du vivant aient été mobilisées. Il se décline en trois items qui se décomposent comme suit (échelle de 0 à 3 points, les points sont cumulables, pouvant également être exprimé en %).

- Le potentiel de biodiversité a-t-il été pensé dès la conception de l'ouvrage (objectifs en termes d'habitats bénéfiques à la faune ou la flore ou de bénéfiques faunistiques ou floristiques : maintien, nouvelles espèces, nombre, diversité, espèces protégées ou pas ? Oui : 1 point.
- Des objets augmentant la biodiversité ont-ils été intégrés dans le dispositif ? (hôtel à insectes, mares secondaires d'accueil pour les batraciens...) ? Si oui 1 point.
- Des consignes spécifiques pour l'entretien de la biodiversité sont-elles appliquées (au-delà du seul zéro-phyto) ? Si oui 1 point.

Exemple d'application

Pour cet indicateur, l'estimation n'a pas pu être réalisée sur les sites des trois projets, mais nous proposons son estimation sur un autre cas d'application. À travers les données obtenues au cours des enquêtes menées sur les bassins de Porte des Alpes à Saint-Priest et des études de la métropole, nous avons pu tester cet indicateur sur cet espace. Ce site est composé d'une série de bassins en eau en cascade associés en aval à des bassins secs d'infiltration.

Bien qu'accueillant des espèces protégées, les bassins en eau de Porte des Alpes n'étaient pas conçus spécifiquement pour accueillir la biodiversité qu'elle accueille aujourd'hui. Cependant, l'introduction du vivant avait bien été identifiée comme primordiale dès le départ. Il a été constaté *a posteriori* l'introduction d'espèces remarquables (orchidées, tritons...). La faune (plus précisément l'avifaune) a également profité des conditions d'habitats offertes par ces dispositifs pour s'y installer.

Si le potentiel de biodiversité n'a pas été pensé dès la conception, en revanche, au vu des retours d'expériences vis-à-vis de l'entretien des aménagements paysagers et des suivis biologiques, la métropole de Lyon a fait le choix de faire vivre des paysages rustiques nécessitant peu d'entretien et formant un véritable refuge pour la biodiversité. Le développement de cette biodiversité dans le secteur des lacs a été souligné par des associations de protection de la nature. Les modes de gestion ont été adaptés afin de préserver cette diversité exceptionnelle. Les lacs font l'objet d'un suivi écologique presque tous les 5 ans.

Des objets ont par la suite également été installés pour accueillir les insectes pendant l'hiver (hôtel à insectes) et pour sensibiliser le public à la biodiversité présente sur le site (panneaux). De plus, des consignes ont été données aux agents d'entretien afin d'éviter de déranger l'avifaune (fréquence et zone de fauchage des roseaux limités). Au regard de ces différents éléments, les bassins de porte des Alpes présente un indicateur d'accueil de biodiversité qui pourrait être de l'ordre de à 2,5/3, voire de 3/3 (soit 88 à 100 %) et ce principalement par le fait que la biodiversité est suivie et entretenue en continu.

15 POUR ALLER PLUS LOIN

Suivi de la biodiversité sur un observatoire

GRAIE, Fiche observatoire des TA du GRAIE (http://www.graie.org/graie/BaseDonneesTA/Graie_EauxPluviales-TechniquesAlternatives_Observatoire.pdf).

Déclinaison SB₂ : gestion des risques de nuisances liées à la faune et la flore

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : étude faunistique et floristique

Échelle de temps : conception et vie de l'ouvrage

Cet indicateur est formulé sur un total de 4 points (pouvant également être exprimé en %).

Les points sont cumulables et se décomposent comme suit.

- A-t-on anticipé les bénéfices ou les contraintes résultant de la mise en valeur (sociale et politique) de la biodiversité ? 1 point¹.
- Y-a-t-il eu une étude d'acceptabilité sociale (enquête avant et après travaux pour caractériser la perception de l'objet technique et du terrain/territoire impacté par l'aménagement) ? 0,5 point.
- Y-a-t-il eu une étude en santé publique pour évaluer une éventuelle aggravation des allergies ou des pathologies pour lesquelles la faune est un vecteur ? 0,5 point.
- Y-a-t-il eu une constatation de problèmes particuliers non résolus liés à la faune et à la flore aussi bien pour les activités humaines que pour les milieux (-2 points) ? Si résolu ou sans problèmes constatés (+2 points).

Exemple d'application

Si l'on reprend l'exemple des lacs de la Porte des Alpes, nous avons montré le fort potentiel de valorisation de la biodiversité. Cependant, nous pouvons également faire état tout au long de la vie de ce site de différents problèmes liés à l'attractivité de la faune ou au développement de la végétation. La forte attractivité des lacs et habitats possibles pour les oiseaux a conduit à une concentration importante de l'avifaune dans les premiers temps de fonctionnement du site posant des problèmes de sécurité civile pour l'aéroport Saint-Exupéry à proximité des lacs. Des dispositifs de dispersion des concentrations d'oiseaux ont été mis en place (jet d'eau déclenchés aléatoirement par exemple).

Dans le même ordre d'idée lors des premiers suivis écologiques, il avait été mis en évidence le développement de *Myriophyllum* du Brésil, espèce invasive, présentant un risque de dissémination non négligeable et étouffant les peuplements végétaux naturels implantés. Son éradication (arrachage manuel) a donc dû être opérée.

L'évaluation serait donc :

- a-t-on anticipé les bénéfices ou les contraintes résultant de la mise en valeur (sociale et politique) de la biodiversité ? Oui : + 1 point ;
- y-a-t-il eu une étude d'acceptabilité sociale (enquête avant et après travaux pour caractériser la perception de l'objet technique et du terrain/territoire impacté par l'aménagement) ? Non : 0 point ;
- y-a-t-il eu une étude en santé publique pour évaluer une éventuelle aggravation des allergies ou pathologies pour lesquelles la faune est un vecteur ? Non : 0 point ;
- y-a-t-il eu une constatation de problèmes particuliers non résolus liés à la faune et la flore aussi bien pour les activités humaines que pour les milieux (-2 point) ? Si résolu ou sans problèmes constatés (+2 points). Oui constatation de problèmes mais résolu : 2 points.

Le score serait donc de 3 points sur 4 soit (75 %).

1- Les bénéfices sont relatifs au capital faunistique et floristique (sa diversité, son nombre), en revanche les contraintes désignent par exemple les questions de proliférations de certains insectes qui peuvent socialement et politiquement poser problème.

Déclinaison SB₃ : prévention des mésusages et des pratiques « déqualifiantes »

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : observations, enquêtes, consultation des plaintes

Échelle de temps : conception et vie de l'ouvrage

Cette fonction renvoie à trois items qui se décomposent comme suit (les points se cumulent) de -1 à 3 points.

- Connaissance des usages et des pratiques : y-a-t-il eu une étude préalable des usages et des pratiques / une étude après réalisation du dispositif ou un suivi dans le temps ? 0,5 point.
- Co-production avec les habitants et les usagers : une consultation (recueil d'avis) ou une concertation (négociation) ont-elles été entreprises avant / pendant / après ? 0,5 point.
- Y-a-t-il constatation de problèmes particuliers de mésusages et des pratiques « déqualifiantes » ? (-1 point).
- Si oui, est-ce que les modifications opérées ont été efficaces (+ 2 points) ?

Exemple d'application

Pour cet indicateur, l'estimation n'a pas pu être réalisée sur les sites des trois projets, mais nous proposons son estimation sur un autre cas d'application. Nous renseignons cet indicateur sur la base d'une étude de cas issue de la thèse de Sébastien Ah Leung (2017) : le Parc Bourlione à Corbas.

À sa livraison en 2000, le parc Bourlione constituait, conformément aux choix des gestionnaires, un dispositif pouvant accueillir à la fois du public (bancs, cheminements, poubelles...) et des fonctions hydrauliques associées à la gestion des eaux pluviales (noues, bassins, canalisations...). Toutefois, quelques mois après son ouverture, cet équipement n'a pas semblé faire l'unanimité auprès des habitants. Ces derniers utilisaient le parc pour jeter leurs déchets. De nombreuses plaintes ont également été déposées à la mairie au sujet de la présence d'eau. Du fait de ses fonctions hydrauliques, le parc a tendance à créer des zones humides temporaires, les noues étaient alors ressenties comme dangereuses par les visiteurs. Les usagers ont même demandé à ce qu'elles soient remblayées. Par ailleurs, l'entretien de l'espace était jugé insuffisant : la mairie ayant appliqué une gestion différenciée sur cet espace, les pelouses et les haies n'étaient pas tondues et taillées comme sur le reste des espaces verts de la commune. Le parc avait l'aspect « naturel » d'une friche.

Ces différentes réactions quant à la réception de cet espace par les publics s'expliquent en partie par une absence de connaissance des usages réels des habitants bien que le parc ait été voulu multifonctionnel et le fait que l'espace n'ait pas été coproduit par les gestionnaires et les habitants. Suite à cela, les gestionnaires ont décidé de rendre le parc plus conforme aux attentes et aux représentations du public par l'intermédiaire de plusieurs actions. Une campagne de sensibilisation a d'abord été menée auprès des riverains dans le but d'expliquer au mieux les fonctions du parc. Ensuite, certains aménagements ont été modifiés afin de favoriser des comportements plus conformes aux usages « classiques » des parcs urbains (par ex. installation de chemins), de sécuriser les zones en eau (mise en place de haies les délimitant) et de limiter certaines pratiques (installation de panneaux d'informations). Les gestionnaires ont ainsi pu rétablir un équilibre entre fonctions projetées et usages des publics.

Eu égard à l'historique de ce dispositif, nous pouvons évaluer cet indicateur à 1,5/3. En effet, il n'y a pas eu d'étude préalable permettant de connaître les usages des publics, cependant la plurifonctionnalité a bien été envisagée dès le début (entre 0 et 0,5 point). Peu

de concertation ou co-construction semble avoir été menée avec le public au cours du projet (0 point). Toutefois, les gestionnaires ont pu prendre en compte l'avis des publics pour modifier le parc et limiter les pratiques déqualifiantes (présence de pratiques déqualifiantes mais prise en compte dans la recherche d'une solution qui fonctionne -1+2).

16 POUR ALLER PLUS LOIN

Étude du parc de Bourlione

D'Arco, S. (2012). Les objets de nature dans la ville : fabrication et mobilisation. Étude de deux parcs publics de l'agglomération lyonnaise intégrant des techniques de gestion alternative des eaux pluviales. Rapport de Master 2 « Villes et sociétés », INSA de Lyon.

Déclinaison SB₄ : intégration dans le projet urbain

Type d'indicateur : explicatif

Données nécessaires : analyse des usages (maîtrise d'usage)

Échelle de temps : conception de l'ouvrage

Cet indicateur est évalué sur la base de 5 points (pouvant également être exprimé en %). Les points sont cumulables et se décomposent comme suit.

- « Fonctions additionnelles » : y-a-t-il eu dans l'avant-projet des réflexions sur l'intégration d'usages autres que la fonction d'assainissement ? 1 point .
- « Objets additionnels » : des objets favorisant les activités additionnelles (sport, détente...) ont-ils été intégrés au dispositif technique ? 1 point .
- « Intégration dans le projet urbain » : y-a-t-il eu des réflexions sur l'évolution future de l'espace urbain dans lequel le dispositif technique s'insère ? 1 point .
- « Réunions publiques » : y-a-t-il eu des réunions avec les habitants pour connaître leurs habitudes en termes d'activité (autre que l'enquête publique réglementaire) ? 1 point .
- Lorsque des appropriations non planifiées mais n'engendrant pas de dysfonctionnement de ou des ouvrages(s) ont été constatées, a-t-on cherché à les caractériser ou à les favoriser par des aménagements complémentaires ? 1 point. Si ce point est sans objet : 0 point.

Exemple d'application

Pour cet indicateur, l'estimation n'a pas pu être réalisée sur les sites des trois projets, mais nous proposons son estimation sur un autre cas d'application, la requalification de la rue Sœur Valérie à Asnières.

Le projet de requalification de cette rue visait initialement à déconnecter les eaux de ruissellement du réseau d'assainissement, végétaliser la rue dans une perspective bio-climatique, réduire l'espace dédié à l'automobile et favoriser les circulations douces. Les eaux pluviales acheminées vers les zones végétalisées sont dépolluées via un système de filtre planté puis infiltrées.

Le parti-pris paysager choisi par l'Agence Thierry Maytraud a consisté à dessiner des bosquets disposés en quinconce, afin d'amener une épaisseur végétale malgré une très forte contrainte de largeur (8,5 m) et le choix de conserver les stationnements, à valoriser les matériaux existants (murs en meulière, pavés et bordures en grès). Le cahier des charges municipal prévoyait un maintien des places de parking notamment pour les besoins de stationnement des camions les jours de marché.

Ce projet a fait l'objet d'une collaboration étroite avec la ville en particulier en ce qui concerne la palette végétale et des méthodes d'entretien des espaces verts.

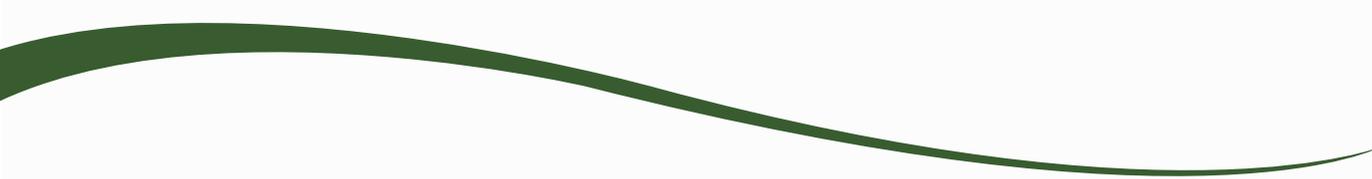
À l'aune de l'indicateur « intégration dans le projet urbain », le projet de la rue Sœur Valérie totalise 3 points :

- des réflexions sur l'intégration d'usages autres que la fonction d'assainissement ont bien été conduites 1 point ;
- des objets favorisant les activités additionnelles (circulations douces, flânerie) ont été intégrés au dispositif technique 1 point ;
- l'évolution future de l'espace urbain dans lequel le dispositif technique s'insère a été prise en compte (la requalification de la rue s'insère dans un projet plus global de rénovation et de densification urbaine) 1 point ;
- il n'y a pas eu de réunions avec les habitants pour connaître leurs habitudes en termes d'activité (autre que l'enquête publique réglementaire) 0 point ;
- lorsque des appropriations non planifiées mais n'engendrant pas de dysfonctionnement de ou des ouvrages(s) ont été constatées, a-t-on cherché à les caractériser ou à les favoriser par des aménagements complémentaires ? Ce point est ici sans objet car pas d'appropriation non planifiée 0 point.

L'indicateur présenterait donc un score de 100 % au moment de l'évaluation.



4. Bibliographie



- Ah-Leung, S. (2017). Les objets de nature : quelles places dans la ville? Conditions d'appropriation des dispositifs de gestion des eaux pluviales de la métropole lyonnaise. Thèse Université de Lyon.
- Azzout, Y., Barraud, S., Cres, F.N. et Alfakih, E. (1994). Techniques alternatives en assainissement pluvial. Choix, conception, réalisation et entretien, Lavoisier-Tec. et Doc. ed., Paris, 372 p.
- Berthier, E. (1999). Contribution à une modélisation hydrologique à base physique en milieu urbain : élaboration du modèle et première évaluation. Thèse INPG Grenoble.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M. et Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and urban planning* 97(3), 147-155.
- D'Arco, S. (2012). Les objets de nature dans la ville : fabrication et mobilisation. Etude de deux parcs publics de l'agglomération lyonnaise intégrant des techniques de gestion alternative des eaux pluviales. Rapport de Master 2 « Villes et sociétés », INSA de Lyon.
- De Munck, C. (2013). Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville. Thèse École Doctorale Sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace (Toulouse) ; 159341302).
- Dechesne, M. (2002). Mesure et modélisation des flux d'eau et de polluants dans les systèmes d'infiltration. Thèse INSA de Lyon.
- Flanagan, K., Branchu, P., Boudahmane, L., Caupos, E., Demare, D., Deshayes, S., Dubois, P., Meffray, L., Partibane, C., Saad, M. et Gromaire, M.-C. (2018). Field performance of two biofiltration systems treating micropollutants from road runoff, *Water Research* 145, 562–578.
- Flanagan, K., 2018. Evaluation de la rétention et du devenir d'un panel diversifié de micropolluants dans un ouvrage de biofiltration des eaux de ruissellement de voirie. Thèse Université Paris-Est.
- Goutaland, D., Roux, G. et Winiarski, T. Les ouvrages d'infiltration : la fonction filtration. Recommandations à l'usage des gestionnaires - Projet FAFF GESOL <http://www.gessol.fr/sites/default/files/Gessol-ouvrages-infiltration-web.pdf> (consulté le 20/12/2019).
- Goutaland, D., Winiarski, T., Lassabatere, L., Dubé, J. S. et Angulo-Jaramillo, R. (2013). Sedimentary and hydraulic characterization of a heterogeneous glaciofluvial deposit: Application to the modeling of unsaturated flow. *Engineering geology* 166, 127-139.

- GRAIE, Fiche observatoire des TA du GRAIE http://www.graie.org/graie/BaseDonneesTA/Graie_EauxPluvialesTechniquesAlternatives_Observatoire.pdf.
- Hannouche, A. et Joannis, C. et Chebbo, G. (2017). Assessment of total suspended solids (TSS) event load and its uncertainties in combined sewer system from continuous turbidity measurements. *Urban Water Journal* 14(8), 789-796.
- Huber, M. et Helmreich, B. (2016). Stormwater management: calculation of traffic area runoff loads and traffic related emissions. *Water* 8(7), 294.
- Kanso, T., Tedoldi, D., Gromaire, M. C., Ramier, D., Saad, M. et Chebbo, G. (2018). Horizontal and Vertical Variability of Soil Hydraulic Properties in Roadside Sustainable Drainage Systems (SuDS)—Nature and Implications for Hydrological Performance Evaluation. *Water* 10(8), 987.
- Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J. M., Cuenca, R., Braud, I. et Haverkamp, R. (2006). Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—BEST. *Soil Science Society of America Journal* 70(2), 521-532.
- Lerey, S. (2019), Livrables 4.a, b,c et d Roulépur – Rapports d’ACV.
- Lipeme Kouyi, G., Barraud, S., Becouze-Lareure, C., Blaha, D., Perrodin, Y., Wiest, L. et Bernardin-Souibgui, C. (2018). Caractérisation des sédiments d’un bassin de retenue-décantation des eaux pluviales et éléments pour la gestion. *Techniques Sciences Méthodes* (9), 65-75.
- Moura, P. (2008). Méthode d’évaluation des performances des systèmes d’infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain. Thèse Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- NMHSPE, (2000). Circular on target values and intervention values for soil remediation. The Hague: The Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment. <http://www.vrom.nl/> - (norme hollandaise).
- Petavy, F. (2007). Traitement des sédiments issus de l’assainissement pluvial. Thèse Ecole centrale de Nantes.
- Petrucci, G. (2012). La diffusion du contrôle à la source des eaux pluviales urbaines. Confrontation des pratiques à la rationalité hydrologique. Thèse de doctorat, Université Paris Est.
- Ramier, D. (2005). Bilan hydrique des voiries urbaines : observations et modélisation. Thèse Ecole Centrale de Nantes.
- Reynolds, W. D. et Elrick, D. E. (1985). In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph permeameter. *Soil Science* 140(4), 292-302.
- Sage, J. (2016). Concevoir et optimiser la gestion hydrologique du ruissellement pour une maîtrise à la source de la contamination des eaux pluviales urbaines. Thèse de doctorat, Université Paris Est.
- Saulais, M. (2011). Colonisation végétale des bassins d’infiltration et de rétention : caractérisation de la flore et évolution des caractéristiques physico-chimiques de l’horizon de surface végétalisé. Thèse INSA de Lyon. HAL Id : tel-00715802.



- Seidl, M. (dir.), (2019). Aménager la ville avec l'eau, pour une meilleure résilience face aux changements globaux, Presses des Ponts, décembre 2019, 300 pages. (a) Maytraud, T., La gestion des eaux pluviales en milieu urbain, des années 1990 à aujourd'hui. Les enjeux de demain, pp. 17-36, (b) Piel, C., Réactiver la nature en ville. L'eau, une clé d'entrée technique, juridique et financière, pp. 37-54. (b) Deroubaix, J-F., La fabrique de la ville rattrapée par les eaux pluviales ? Analyse rétrospective de deux grands projets urbains en région parisienne, pp. 55- 79.
- Shafique, M., Kim, R. et Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 90, 757-773.
- Swedish EPA, (1997). Development of generic guidelines values. Model and data used for generic guidelines values for contaminated soils in Sweden. Report 4639. Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm – (norme suédoise).
- Tedoldi, D., Chebbo, G. et Gromaire, M.C. (2020). Infiltrer les eaux pluviales, c'est aussi maîtriser les flux polluants - État des connaissances et recommandations techniques. Guide technique, OPUR, AESN.
- Tedoldi, D. (2017) - Mesure et modélisation de la contamination du sol dans les ouvrages de gestion à la source du ruissellement urbain. Thèse Université Paris Est, <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01703864>.
- Valdelfener, M., Sibeud, E., Bacot, L., Besnard, G., Rozier, Y., Barraud, S. et Marmonier, P. (2018). Développement de peuplements de moustiques (Diptera, Culicidae) dans des ouvrages de techniques alternatives de gestion des eaux pluviales-Exemple de la Métropole de Lyon. *Techniques Sciences Méthodes* 4, 55-71.

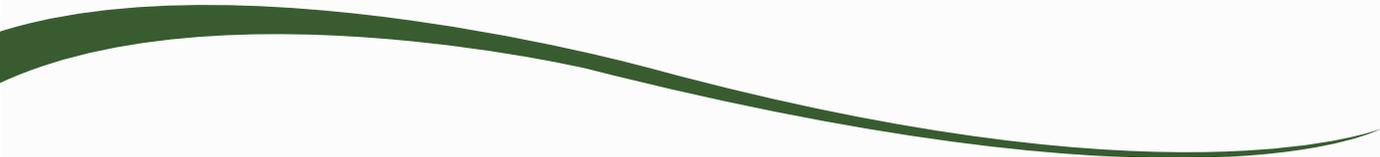
Liste des Figures

- 7 Figure 1. Démarche d'utilisation de ce guide.
- 10 Figure 2. Marguerite des enjeux et fonctions.
- 25 Figure 3. Logigramme pour le choix d'indicateurs.
- 27 Figure 4. Présentation schématique des systèmes évalués – Cas général.
- 29 Figure 5. Schéma des étapes de la séparation des événements pluvieux.
- 33 Figure 6. Abattement relatif des débits de pointe (boîte = 50 % des données entre Q_{25} et Q_{75} ; ligne rouge pleine = médiane ; lignes rouges pointillées horizontales = Q_{10} et Q_{90} → seuls les Q_{10} sont visibles sur ces figures).
- 34 Figure 7. Distributions des abattements de volume pour le système parking muni de la noue, de la tranchée, de la chaussée à structure réservoir ($E_{V,BVt}$) et du bassin de retenue ($E_{V,OGA}$).
- 36 Figure 8. Abattements événementiels absolus en fonction de la pluie (droite pointillée : $y=x$) ; a) ECOMINERAL® ; b) ECOVEGETAL® Mousses ; c) ECOVEGETAL® Green.
- 41 Figure 9. Distributions de débit des trois parkings en fonction du temps à Broué pour la gamme entière (en haut) et les probabilités de non-dépassement supérieurs à 0,85 (en bas).
- 41 Figure 10. Distributions de débit des trois parkings en fonction du volume à Broué.
- 43 Figure 11. Courbes Intensité-Durée-Fréquence pour la pluie (a) et les eaux drainées depuis les places de parking perméables à Broué (b) ECOMINERAL®, c) ECOVEGETAL®, Mousses, d) ECOVEGETAL®, Green), pour les pas de temps de 10, 30 et 60 min.
- 47 Figure 12. Cumul de sédiment sur l'accotement à Compans.
- 55 Figure 13. Concentrations en nonylphénol (médiane, premier et 9^e décile) mesurées en sortie de différents ouvrages de gestion alternative des eaux pluviales - comparaison à la *NQE*.
- 58 Figure 14. Schéma de fonctionnement de la noue filtrante de Compans.
- 64 Figure 15. Fraction dissoute (en %) pour les métaux sur les 3 sites de gestion à la source (chaussée à structure réservoir, tranchée, noue) et le site de gestion centralisée (bassin de retenue Django Reinhardt).
- 65 Figure 16. Distribution des concentrations en zinc total sur le bassin versant de référence et dans le drain de la noue filtrante. Les lignes verticales représentent l'incertitude analytique.
- 66 Figure 17. Médiane, 1^{er} et 9^e décile de l'abattement en concentrations pour le zinc pour les différents sites d'observations des projets Roulépur, MicroMegas et Matriochkas.
- 68 Figure 18. Abattement volumétrique, en concentrations et en masse dans le cas du cuivre pour les 11 ouvrages étudiés dans les trois projets Matriochkas, MicroMegas et Roulépur.



Liste des Tableaux

- 9 Tableau 1. Synthèse des enjeux et des fonctions associées
- 26 Tableau 2. Synthèse des indicateurs par fonction et par enjeu
- 30 Tableau 3. Liste des indicateurs hydrologiques
- 45 Tableau 4. Temps de réaction du drain et teneur en eau initiale du substrat de la noue filtrante à Compans
- 51 Tableau 5. Présentation des indicateurs relatifs aux polluants
- 74 Tableau 6. Indicateurs socio-techniques
- 77 Tableau 7. Extrait du carnet d'entretien du filtre planté de Rosny-sous-Bois, édité par Composante Urbaine



5. Annexes

5.1 Recommandations métrologiques pour caractériser les flux météorologiques, concentrés et diffus

Une fois le système évalué défini, il est nécessaire de mettre en place des mesures pour caractériser les flux entrant et sortant du système, et éventuellement les stocks. Dans la section qui suit, on distinguera les flux météorologiques et les flux de ruissellement (parmi lesquels on distingue les flux concentrés et les flux diffus). Pour des exemples concrets d'instrumentation, on pourra se référer aux fiches des sites étudiés dans le cadre des projets Matriochkas, MicroMegas et Roulépur présentées en Annexe 5.2.

5.1.1 Flux météorologiques

Mesures quantitatives

La précipitation peut être mesurée par un pluviomètre, idéalement situé à proximité immédiate de l'ouvrage. Lorsqu'il n'est pas possible d'installer et d'exploiter un pluviomètre sur place, on peut avoir recours à l'utilisation de données pluviométriques acquises sur un autre site (par exemple, un pluviomètre de Météo-France) ; cependant, du fait de la variabilité spatiale de la pluie, cette pratique est une source d'incertitude importante. Les données pluviométriques doivent toujours être validées afin de vérifier que la mesure est fiable avant d'être utilisées. Ce type de validation peut être fait en comparant la pluie enregistrée à celle d'un autre pluviomètre à proximité ou en comparant la pluie avec des mesures de débit sur site.

L'évapotranspiration à l'échelle d'un ouvrage est très difficile à mesurer directement. Ainsi, ce flux est généralement évalué par différence, lorsque les autres flux ont pu être caractérisés. Une évaluation par différence peut être faite uniquement si tous les autres flux sont caractérisés et implique de grandes incertitudes, surtout lorsque le volume d'évapotranspiration est faible par rapport aux autres volumes mesurés. L'évapotranspiration peut être évaluée de façon théorique, sur la base de l'évapotranspiration potentielle (ETP), ou sur la base de données météorologiques mesurées localement (vent, rayonnement, température...) ou que l'on obtient auprès de Météo-France.

Mesures de qualité

La qualité de la pluie peut être estimée en collectant le dépôt atmosphérique humide, ce qui se fait à l'aide d'un entonnoir qui alimente un flacon d'échantillonnage de taille suffisante pour qu'il ne déborde pas au cours de l'événement pluvieux ou à l'aide d'un pluviomètre découvrant.

5.1.2 Flux concentrés

Mesures quantitatives

Ici, les « flux concentrés » désignent les flux qui sont véhiculés par un tuyau, un caniveau ou toute autre forme de chenal.

Différentes techniques existent pour la mesure ou l'estimation des débits canalisés : mesure des volumes par auget basculant, mesure de la vitesse sur conduite en charge par débitmètre électromagnétique ou à ultrasons, mesure de la hauteur d'eau au niveau d'un seuil ou d'un canal jaugeur, mesure couplée de la hauteur d'eau et de la vitesse. Parmi ces options, seul l'auget basculant permet de mesurer directement le débit ; les autres méthodes visent le calcul du débit à partir d'une autre grandeur mesurée. Lorsqu'une méthode est choisie pour mesurer le débit d'un flux concentré, il est nécessaire de considérer la configuration de la conduite (les conditions nécessaires à la fiabilité de la mesure telles que la longueur de section droite avant le débitmètre sont-elles réunies ? Le débitmètre ne risque-t-il pas de modifier les conditions d'écoulement et donc de modifier le fonctionnement de l'ouvrage ? L'accès pour l'entretien est-il possible ?), mais aussi la gamme des débits attendus. Une difficulté majeure rencontrée dans la mesure des débits alimentant les ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales est la grande étendue de la gamme de débits à mesurer (facteur supérieur à 100 entre les débits minimum et maximum à couvrir). Il est de ce fait souvent nécessaire de combiner deux techniques de mesure de débit couvrant des gammes complémentaires. En entrée d'ouvrage, on peut estimer les débits à observer en considérant l'intensité de la pluie et la surface active du bassin versant. En sortie d'ouvrage, il est nécessaire de considérer les caractéristiques de l'ouvrage pouvant limiter le débit (limiteur du débit de fuite, conductivité hydraulique du substrat filtrant).

Par exemple, sur plusieurs sites étudiés par les projets du GLIP, un auget basculant est utilisé pour mesurer les débits faibles, alors qu'un débitmètre électromagnétique est employé pour mesurer les débits plus importants.

4
ENCADRÉ

QUELQUES GÉNÉRALITÉS SUR LES MESURES DE QUALITÉ DES EAUX PLUVIALES

La mesure de la qualité de l'eau pluviale passe généralement par la collecte d'échantillons, suivi par leur analyse en laboratoire pour les polluants choisis.

Échantillon moyen événementiel

La qualité de l'eau de ruissellement urbain varie au cours des événements pluvieux en fonction de l'évolution du stock de polluants sur les surfaces urbaines et l'intensité de la pluie. Cette variabilité, qui pourrait aussi se propager en sortie d'ouvrage, est une source d'incertitude importante dans la comparaison de la qualité de l'eau entre l'entrée et la sortie de l'ouvrage. Afin de minimiser cette incertitude, on collecte de l'eau tout au long de l'événement pluvieux, de manière proportionnelle au débit, afin de constituer un échantillon moyen événementiel. Tous les indicateurs utilisant des concentrations sont conçus pour des concentrations moyennes événementielles (CME), mesurées sur ce type d'échantillon.

Pourquoi pas un pollutogramme ?

Dans certaines études en hydrologie urbaine, on collecte plusieurs échantillons au cours de l'événement pluvieux afin de caractériser le pollutogramme, graphique représentant la concentration d'un polluant en fonction du temps écoulé. Bien que ce type d'échantillonnage puisse être intéressant pour comprendre les dynamiques de transport de polluants, on ne recommande pas de le faire pour évaluer la performance des

ouvrages de gestion à la source car l'analyse de plusieurs échantillons est coûteuse et chronophage et la comparaison de pollutogrammes est relativement compliquée, puisque la dynamique de la pollution peut être différente en entrée et en sortie.

Adéquation des matériaux d'échantillonnage

Il est important d'employer des matériaux qui ne sont pas susceptibles de modifier la qualité de l'eau vis-à-vis des paramètres choisis. Il est déconseillé d'employer des matériaux en verre, en céramique ou en métal si l'on analyse les éléments traces métalliques (ETM). Par ailleurs, il est déconseillé d'employer la plupart des matériaux en plastique (PVC, PE) si l'on souhaite analyser des micropolluants organiques. Le PTFE (Teflon®) est un matériau pouvant être utilisé pour les ETM et les micropolluants organiques. Si l'on analyse les deux familles de polluants, il est souvent nécessaire de prévoir deux systèmes d'échantillonnage en parallèle.

Conservation des échantillons

Certains paramètres de qualité d'eau peuvent évoluer rapidement dans l'échantillon. C'est notamment le cas pour les concentrations en micropolluants organiques, et certaines formes d'éléments nutritifs comme l'ammoniac et le nitrite qui peuvent se dégrader rapidement, ainsi que la répartition de contaminants entre la phase dissoute et la phase particulaire. Il est important de considérer le temps de conservation acceptable pour les paramètres étudiés et de collecter et d'analyser les échantillons dans ce temps. Une bonne règle de pratique est de collecter les échantillons sous 24 heures après la fin de la pluie. Pour des paramètres très instables, il peut être nécessaire de prévoir une réfrigération des échantillons sur place.

Mesures de qualité

Afin d'obtenir un échantillon moyen événementiel dans un flux concentré, un échantillonneur automatique asservi à la mesure de débit est en général utilisé sur le point d'échantillonnage concerné. L'échantillonneur est programmé pour collecter une fraction du volume écoulé dans un seul flacon d'échantillonnage. Ce mode de prélèvement permet de minimiser les étapes de conditionnement et de vaisselle tout en maximisant le volume d'échantillon.

Lorsque l'étude de micropolluants organiques est visée, compte tenu du volume d'échantillon minimal nécessaire aux analyses (souvent 2 à 3 litres pour réaliser l'ensemble des analyses) et de la variabilité des volumes collectés en fonction de la hauteur de pluie (l'échantillonnage de pluies de 2 à 15 mm est souvent visé), un flacon d'un volume de 10 à 20 litres est recommandé. Le matériau des flacons et de l'ensemble de la chaîne de prélèvement devra être compatible avec les polluants étudiés (verre ou métal pour les polluants organiques, PEHD pour les métaux). La réfrigération des préleveurs est recommandée, mais se heurte parfois à la disponibilité d'une alimentation électrique adaptée. En l'absence de 220 V, une alimentation par panneaux solaires peut être mise en œuvre (voir la fiche de site Compans). La mise en place de deux préleveurs par point de mesure est vivement conseillée afin de permettre le prélèvement simultané dans deux types de flaconnages différents. Le choix de la fraction (f) à collecter est important lorsqu'on conçoit un système d'échantillonnage. Dans le cas idéal, pour chaque événement pluvieux, on souhaite obtenir un volume d'échantillon ($V_{\text{échantillon}} = f V_{\text{écoulé, événement}}$) suffisant pour effectuer toutes les analyses prévues ($V_{\text{min, analyses}}$) sans que le volume du flacon (V_{flacon}) soit rempli avant la fin de l'événement pluvieux. Ainsi, il faut choisir une fraction

pour que le Critère 1 soit valide pour un maximum d'événements pluvieux. Lorsque des mesures de débit au point d'échantillonnage en question existent déjà, on peut se baser sur les $V_{écoulé, événement}$ observés pour choisir f . Quand ce n'est pas le cas, $V_{écoulé, événement}$ peut être évalué à partir de données de pluie typiques de la région et de la surface active du bassin versant. Si le point d'échantillonnage se situe en sortie d'ouvrage :

$$V_{min, analyses} \leq f V_{écoulé, événement} \leq V_{flacon} \quad (\text{Critère 1})$$

Lorsque la fraction f est élevée (>1 %), ce qui peut être le cas pour de petits ouvrages, on peut parfois s'affranchir de l'échantillonneur automatique en utilisant un système passif de fractionnement comme un tuyau ouvert situé sous un auget basculant (voir l'exemple des sorties de la noue et de l'accotement filtrant à Compans). Ce type d'équipement ne nécessite pas de commande électronique ; il est donc moins susceptible de tomber en panne qu'un échantillonneur automatique.

Il peut également être intéressant de mesurer la qualité de l'eau (turbidité, conductivité, température) en continu avec une sonde multi-paramètres, ce qui permet une caractérisation de sa variabilité au cours des événements et au cours de l'année. Ce type de mesure nécessite une configuration où la sonde est en permanence sous l'eau lorsque les mesures sont effectuées.

5.1.3 Flux diffus

Mesures quantitatives

Les « flux diffus » désignent les flux non canalisés tels que le ruissellement direct depuis une surface, l'infiltration ou la percolation au travers d'un sol.

De manière générale, les flux diffus ne peuvent pas être mesurés directement ; ainsi, on a recours à des mesures indirectes pour les estimer. On peut distinguer les approches utilisées pour estimer le débit d'une alimentation diffuse, une sortie superficielle diffuse et une sortie diffuse dans le sol.

Lorsqu'un ouvrage est alimenté par un flux diffus en surface, on a souvent recours à un bassin versant de référence, similaire au bassin versant de l'ouvrage mais sur lequel les eaux de ruissellement sont concentrées et canalisées pour que les techniques de mesure de débit de flux concentrées puissent être utilisées. Pour estimer le débit entrant dans l'ouvrage, on suppose que la production de ruissellement sur ce bassin versant de référence par unité de surface est équivalente à celle du bassin versant de l'ouvrage. L'utilisation d'un bassin versant de référence implique des incertitudes, voire des biais, notamment si certaines caractéristiques du bassin versant (degré d'imperméabilisation, conductivité hydraulique du sol, pente, exposition à la pluie, au soleil et au vent) ne sont pas identiques ou si la délimitation des bassins versants est mal connue ou facilement perturbée (cas lorsque la délimitation se fait selon des lignes de niveau en zone peu pentue).

Un flux diffus superficiel en sortie d'ouvrage (par exemple, le flux sortant en surface d'une bande enherbée) peut être canalisé sans perturber le fonctionnement de l'ouvrage en amont (par exemple, par une gouttière). On pourra alors avoir recours aux techniques de mesure de débit citées précédemment pour les flux concentrés. À noter que cette canalisation modifie fortement le fonctionnement en aval de l'ouvrage, ce qui peut être problématique dans certains cas. Les flux diffus ne sont jamais parfaitement uniformes du fait de faibles variations de topographie et peuvent présenter des zones d'écoulement préférentiel assez nettes. Aussi, le débit ne peut pas être évalué de façon fiable à partir de la collecte d'une portion de l'écoulement, la collecte de l'eau doit se faire sur tout le linéaire de l'ouvrage, ce qui peut être difficilement faisable pour de grands ouvrages.

Les flux diffus dans le sol sont très difficiles à mesurer. Une approche consiste à installer des capteurs de potentiel matriciel ou de teneur en eau du sol. Ces capteurs ne permettent pas de mesurer directement le débit mais peuvent servir à calibrer un modèle d'écoulement en zone non saturée. Cependant, la construction d'un tel modèle n'est pas simple et ce type de simulation comporte de nombreuses incertitudes. Une autre approche consiste à installer des plaques poreuses sur lesquelles on applique une succion égale au potentiel matriciel du sol, mesurée par des capteurs. Si la conductivité de la plaque est au moins égale à celle du sol, le débit sortant de la plaque devrait être égal au débit de l'eau dans le sol sur la surface considérée. Cependant, ce type d'aménagement est compliqué à installer (l'installation perturbe souvent l'écoulement). De plus, en raison de leur surface limitée (quelques centaines de cm²), ces dispositifs fournissent une mesure ponctuelle d'un flux dont on sait qu'il est susceptible de présenter une grande variabilité spatiale, du fait de l'hétérogénéité des sols et de l'existence de chemins d'écoulement préférentiels. Ces difficultés expliquent pourquoi la grande majorité d'études sur les flux dans le sol des ouvrages de gestion à la source se font sur des ouvrages drainés et étanches, sur lesquels on n'a pas à quantifier une sortie diffuse dans le sol. Le fait d'étancher et de drainer l'ouvrage modifie cependant son fonctionnement hydraulique et peut également impacter le transfert des polluants.

Mesures de qualité

Tout comme les mesures de débit, l'échantillonnage des flux diffus pour des mesures de qualité est particulièrement difficile et on peut distinguer les approches employées pour caractériser une alimentation diffuse, une sortie superficielle diffuse et une sortie diffuse dans le sol.

Comme pour le débit, on représente souvent la qualité d'un flux d'alimentation diffus par celle de l'eau échantillonnée sur un bassin versant de référence. Dans ce cas, il n'est pas seulement important que les caractéristiques ayant un effet sur le ruissellement soient similaires à celles du bassin versant de l'ouvrage, mais aussi les caractéristiques pouvant avoir un effet sur la contamination de l'eau (matériaux en contact avec l'eau, circulation automobile ou piétonne). De plus, il est probable que les dynamiques de lessivage de polluants soient différentes sur un bassin versant avec un écoulement concentré que sur un bassin versant avec flux diffus, ce qui est une source d'incertitude, surtout à l'échelle événementielle.

L'échantillonnage d'un flux superficiel en sortie d'un ouvrage de gestion à la source repose sur la canalisation de ce flux, comme pour les mesures de débit. Une fois ce flux canalisé, on peut appliquer les techniques d'échantillonnage d'un flux concentré. La variabilité des débits, du fait d'une topographie non uniforme, influence les processus de décantation et de remise en suspension des polluants dans l'eau et auront également un effet sur la qualité de l'eau. Il n'est donc pas possible de considérer comme représentatif de tout l'ensemble d'un ouvrage un échantillon collecté sur un petit linéaire.

En ce qui concerne les flux de percolation dans le sol, il existe une variété de techniques pour extraire les eaux interstitielles du sol, étape nécessaire pour caractériser la qualité des flux diffus d'infiltration : des bougies poreuses, des plaques poreuses, des lysimètres à mèches et des lysimètres sans tension. Ces techniques tendent à obtenir de faibles volumes d'échantillon, ce qui peut être problématique si l'on souhaite analyser un grand nombre de paramètres. Il est par ailleurs très difficile d'obtenir des échantillons représentatifs des eaux interstitielles – en effet, ces différentes techniques tendent à déstructurer le milieu lors de leur installation, modifier l'écoulement lors du fonctionnement et peuvent également modifier la qualité de l'eau en excluant les particules. Pour une description plus approfondie de ces différentes techniques, voir l'annexe 10 de la thèse de Kelsey Flanagan (2018).

5.2 - Fiches des sites d'étude

1 - Chassieu – Bassin Django Reinhardt

Projet de recherche en appui

MicroMegas

Site

LIEU : Chassieu (69), Métropole de Lyon

MAÎTRE D'OUVRAGE : Métropole de Lyon

ÉQUIPES SCIENTIFIQUES : DEEP, EVS

DATE DE MISE EN SERVICE : 1975, réaménagements en 1985,
puis réhabilité en 2002 et 2004

TYPE BASSIN VERSANT : bassin versant urbain dense à forte composante industrielle muni
d'un réseau séparatif pluvial

ENVIRONNEMENT : industriel et agricole

TYPE OUVRAGE : bassin de retenue étanché



Figure 1. Vue aérienne du site de Chassieu.

■ Bassin versant
■ Ouvrage

© OTHU

Schéma fonctionnel

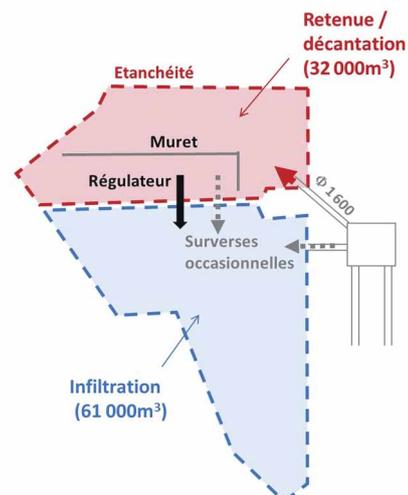


Figure 2. Détail du site d'étude.
Le bassin étudié est le compartiment
de retenue décantation uniquement.

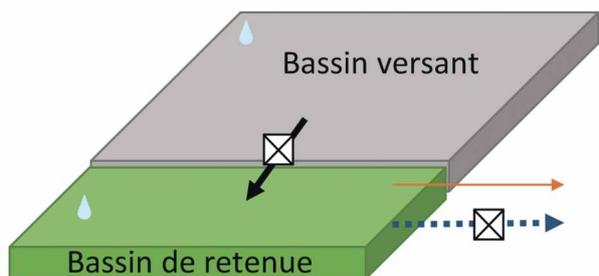


Figure 3. Schéma fonctionnel du site de Chassieu.

Schéma fonctionnel

Bassin versant d'apport

SURFACES : bassin versant 185 ha, bassin de retenue : surface de fond : 11 300 m²

COEFFICIENT D'IMPERMÉABILISATION : environ 75 %

PARTICULARITÉS : les activités du bassin versant concernent surtout l'industrie légère avec notamment des activités logistiques, traitement des déchets papier et carton ou encore fabrique d'enrobés routiers. Étant donné le renouvellement très régulier des entreprises sur le site, il n'est pas possible de proposer un recensement exhaustif et fiable permanent. En plus de l'activité industrielle, les espaces verts aménagés, les zones agricoles et naturelles représentent respectivement 20 %, 4 % et 4 % de la surface totale. Enfin la zone est maillée de rues et routes typiques d'un milieu urbain. D'après les comptages du Grand Lyon en 2014, la circulation moyenne est d'environ de 10 000 véhicules / jour (avec en moyenne approximativement 1 700 poids lourds) si l'on inclut la voie rapide qui borde le bassin versant.

Des eaux de refroidissement ou de lavage « propres » issues d'activités du bassin versant peuvent rejoindre le bassin de retenue par le réseau séparatif pluvial. Ces débits se sont amenuisés au fil du temps suite à une campagne d'information menée par la collectivité.

Référence eaux brutes

Les eaux brutes sont ici les eaux d'entrée dans le bassin pompée dans la conduite \varnothing 1 600.

Ouvrage

Description

Le bassin a une capacité de stockage de 32 200 m³. Il présente une entrée principale ainsi qu'une entrée secondaire, condamnée par un batardeau et seulement utilisée lors d'opérations sur le bassin (curage par exemple). Par temps de pluie, les effluents arrivent donc dans l'ouvrage par un collecteur circulaire de 1,6 m de diamètre. Le fond est constitué d'un radier bitumineux étanche et les talus sont recouverts d'une géomembrane étanche. Une cunette dite « de temps sec » permet la circulation des faibles débits jusqu'à la sortie de l'ouvrage. Deux fosses de décantation sont également localisées dans le bassin. Le bassin de retenue-décantation a régulièrement subi des modifications avec notamment la construction d'un muret muni de trois orifices en 2004 et destiné à améliorer la décantation. Les eaux supposées être moins chargées en MES après

décantation s'écoulent au travers de ces 3 orifices percés dans le muret. Enfin, les eaux sont rejetées dans un bassin d'infiltration via un régulateur pour être vidangées vers le bassin d'infiltration via un système de régulation (Hydroslide®) limitant les débits à 350 L/s. Les mesures débitmétriques réalisées montrent une régulation plutôt autour de 500 L/s.



Figure 4. Photo du bassin de retenue.

© OTHU

SUIVIS MÉTROLOGIQUES

Objectifs de la mesure

Mesurer les flux d'eau et de polluants en entrée et en sortie de l'ouvrage

Mesures hydriques

Pluie - Pluviomètre : pluviomètre à pesée OTT-LOG V2.18 au pas de temps de 1 min.

Débitmétrie en continu à pas de temps de 2 min en entrée et en sortie du bassin.

En entrée : mesure hauteur / vitesse (Flodar) : hauteur par capteur à ultrasons émergé en voute de la conduite, vitesse par capteur radar.



Figure 5. Débitmètre en entrée.

© OTHU

En sortie : mesure hauteur / vitesse (Flo-Pro) : hauteur par capteur à ultrasons immergé, vitesse via un capteur doppler.

Mesures de pollution

En entrée comme en sortie du bassin de retenue

Mesures en continu du pH, de la conductivité, de la température et de la turbidité (mesure doublée). Les eaux sont pompées dans la conduite d'entrée ou de sortie puis transitent dans un canal enfermé dans un bungalow. Dans le canal plonge l'ensemble des capteurs de mesures en continu.

Prélèvement d'échantillons par préleveurs échantillonneurs (échantillon moyen proportionnel au débit) – deux préleveurs : un avec 24 flacons en verre, l'autre avec 24 flacons en plastique (PEHD).



© OTHU



© OTHU

Figure 6. Dispositif de mesure des polluants.

Entretien du dispositif métrologique

À une fréquence régulière (2/3 fois par mois)

- Nettoyage des sondes et du canal de dérivation
- Contrôle du fonctionnement global de l'installation

À une fréquence régulière (2 fois par an)

- Vérifications et étalonnages des sondes
- Entretien des pompes

Avant chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Nettoyage des équipements d'échantillonnage pouvant être en contact avec l'eau
- Mise en place du dispositif d'échantillonnage
- Programmation des préleveurs et des ordinateurs

Après chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Récupération des échantillons
- Nettoyage et rangement du dispositif

RETOURS D'EXPÉRIENCES

Problèmes rencontrés et résolutions

- Vandalisme (tir de carabine sur les bungalows, visites et jeux d'enfants venant du camp des gens du voyage à proximité dans les compartiments rétention et infiltration)
- À l'origine le dispositif recevait des débits d'eau de temps sec assez constants qui permettaient aux capteurs de fonctionner en continu par temps sec comme par temps de pluie. Maintenant, ils ne fonctionnent en continu que par temps de pluie et se déclenchent sur hauteurs d'eau en réseau. Les capteurs de température, de conductimétrie et de pH peuvent manquer de temps pour se stabiliser
- Disjonction de l'armoire électrique lors d'orages importants. Mise en place d'un onduleur pour protéger le matériel le plus sensible
- Instabilité de l'accès ADSL (panne modem, problème fourreaux télécom). Redémarrage manuel et occasionnel du modem
- Le disjoncteur de protection du compresseur d'air saute de façon aléatoire. Ce compresseur permet de piloter la vidange du bac pour assurer son nettoyage automatique.
- Gel du groupe extérieur du climatiseur réversible en hiver. Les températures les plus basses nécessitent l'usage de convecteurs électriques
- Pannes aléatoires du matériel fonctionnant en continu (groupe froid des préleveurs, sondes, transmetteurs, rupture de tube de pompe, électrovannes, informatique). Maintenances préventives et curatives nécessaires
- Multiplicité des équipes (chercheurs de différents projets, opérationnels) conduit à des dysfonctionnements aléatoires

Objectifs abandonnés

Mesure en continu des débits de temps sec

Et si c'était à refaire ?

Le bungalow a été optimisé au cours du temps et complètement refait en 2015 après plus de 10 ans de fonctionnement.

17

POUR ALLER PLUS LOIN

- Walcker N., Bertrand-Krajewski J.-L., Vacherie S., Lepot M., Castebrunet H., Barraud S. et Lipeme Kouyi G. (2018). Une nouvelle station de mesure pour l'acquisition de séries chronologiques en hydrologie urbaine, TSM, 3(2018), 55-64. DOI : <https://doi.org/10.1051/tsm/201803055>.

2 - Compans – Accotement filtrant et noue filtrante

Projet de recherche en appui

Roulépur

Site

LIEU : Compans (77), Ile-de-France

MAÎTRE D'OUVRAGE : Conseil départemental de Seine-et-Marne

ÉQUIPES SCIENTIFIQUES : Leesu, Cerema

DATE DE MISE EN SERVICE : septembre 2012 (accotement filtrant), mars 2016 (noue filtrante)

TYPE BASSIN VERSANT : routier à fort trafic (11 000 véhicules/jour/direction)

ENVIRONNEMENT : industriel et agricole + aéroport

TYPE OUVRAGE : accotement filtrant et noue filtrante



Figure 1. Vue aérienne de l'environnement du site d'étude à Compans.

© D.R.

PARTICULARITÉS : l'eau entre dans ces deux ouvrages de façon diffuse, ce qui complique la mesure débitométrique et le prélèvement ; ainsi les eaux de ruissellement non traitées sont collectées sur un bassin versant de référence. Le site n'est pas muni d'une connexion électrique.

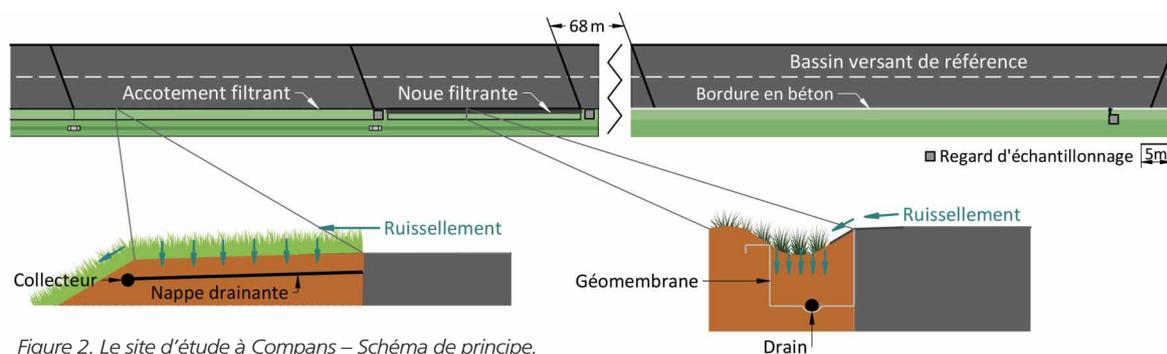


Figure 2. Le site d'étude à Compans – Schéma de principe.

Schéma fonctionnel

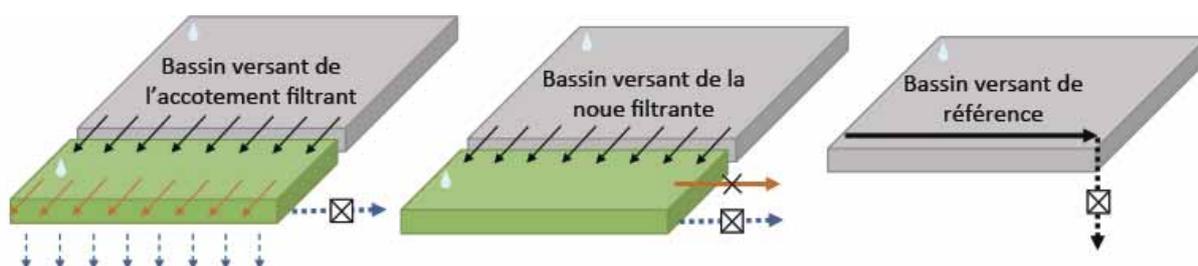


Figure 3. Schéma fonctionnel du site de Compans.

Bassin versant d'apport

SURFACES : 352 m² (noue filtrante), 504 m² (accotement filtrant), 945 m² (référence)

COEFFICIENT D'IMPERMÉABILISATION : 100 %

Référence eaux brutes

Les eaux brutes sont étudiées sur un bassin versant de référence, un des tronçons de la route drainée par l'accotement filtrant et la noue. Les eaux de ruissellement issues de cette partie de la chaussée sont considérées comme étant « l'entrée » de ces systèmes. Les eaux sont isolées du système de drainage, celles-ci dirigées vers une descente en béton par une bordure en béton, puis passent dans un siphon de 300 mm de diamètre.



Figure 4. Bassin versant de référence.

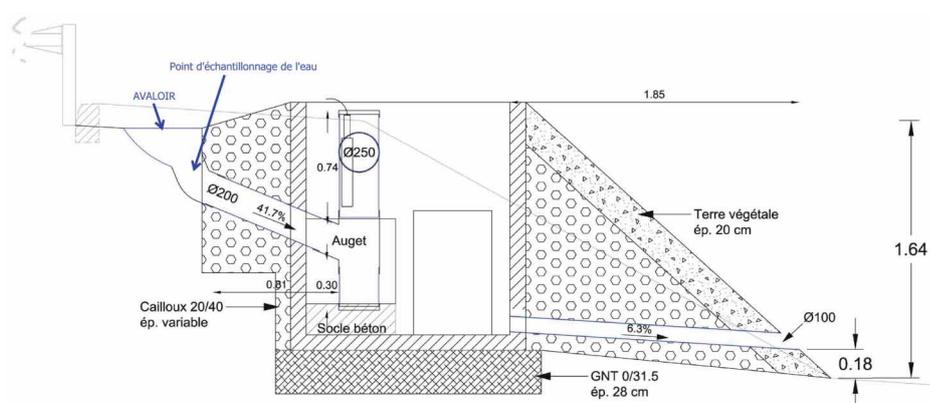


Figure 5. Regard collectant les eaux de ruissellement du bassin versant de référence.

Ouvrages

Accotement filtrant

L'accotement filtrant a une longueur de 50 m pour une largeur de 1,8 m. L'alimentation par les eaux de ruissellement est diffuse (et irrégulière) tout le long du linéaire de la bande enherbée. Le substrat de l'accotement, d'une épaisseur de 12 cm, est composé d'un mélange

terre-sable (60 % sable calcaire – 40 % terre végétale). L'ensemble de l'accotement est drainé par une nappe drainante sous le substrat ; ce drain n'est pas étanche et l'exfiltration d'une partie de l'eau est possible.



Figure 6. Accotement filtrant.

© OPUR

Noue filtrante

La noue filtrante a une longueur de 32 m et une largeur de 0,5 m et une pente longitudinale de 1,2 %. Elle est séparée en trois biefs par des redans en béton. Le substrat filtrant est composé d'un mélange terre-sable (60 % sable calcaire – 40 % terre végétale), épais de 50 cm. L'ensemble de la noue est imperméabilisé et est drainé par un drain agricole de 100 mm. L'alimentation par les eaux de ruissellement est diffuse (et irrégulière) tout le long du linéaire de la noue.



Figure 7. Noue filtrante.

© OPUR

SUIVIS MÉTROLOGIQUES

Objectifs de la mesure

- ▶ Mesurer les flux d'eau et de polluants en entrée et en sortie des ouvrages
- ▶ Déterminer le stock de polluants dans le sol de l'ouvrage

Mesures hydriques

Pluie

- *Pluviomètre* : auget basculant de précision de 0,2 mm, avec enregistrement en continu de l'heure des basculements

Bassin versant de référence

- *Eaux de ruissellement non traitées* : auget basculant de volume 17,4 L avec enregistrement en continu de l'heure des basculements



© OPUR

Figure 8. Auget basculant mesurant l'écoulement du ruissellement issu du bassin versant de référence.

Accotement filtrant

- *Entrée* : estimée d'après la mesure sur le bassin versant de référence
- *Drain* : auget basculant de volume 1 L, avec enregistrement des basculements en continu
- *Sortie par ruissellement* : mesure ponctuelle du volume d'eau collecté par une gouttière disposée perpendiculairement à la pente
- *État hydrique du sol* : mesures en continu de la teneur en eau et de sa tension dans le massif filtrant

Noe filtrante

- *Entrée* : estimée d'après la mesure sur le bassin versant de référence
- *Drain* : auget basculant de volume 1 L, avec enregistrement en continu de l'heure des basculements
- *Surverse* : déversoir triangulaire sur la partie avale et mesure du niveau d'eau par ultrasons



© OPUR

Figure 9. Déversoir employé pour mesurer la surverse de la noe filtrante.

- *État hydrique du sol* : mesures en continu de la teneur en eau et de sa tension dans le massif filtrant

Mesures de pollution

Bassin versant de référence

- *Eaux de ruissellement non traitées* : mesure en continu de la conductivité et de la turbidité avec une sonde multi-paramètres dans le siphon ; collecte d'échantillons moyens événementiels par deux préleveurs automatiques (Sigma SD900P) réfrigérés, équipés d'un monoflacon de 20 L, dans un cas en plastique et en verre dans l'autre.

Accotement filtrant

■ *Drain* : collecte d'échantillons moyens évènementiels par système gravitaire avec fractionnement de débit, deux flacons de 10 L en plastique, deux flacons de 10 L en verre.



Figure 10. Système de fractionnement de l'eau dans la cuve de l'accotement filtrant.

© OFUR

- *Sortie par ruissellement* : collecte d'échantillons par une gouttière
- *Stock dans le sol* : cartographie de pollution en surface, échantillonnage des carottes en zones de contamination similaire

Noe filtrante

- *Drain* : collecte ponctuelle d'échantillons moyens évènementiels par système gravitaire avec fractionnement de débit, deux flacons de 20 L (verre et plastique)
- *Surverse* : non échantillonnée, supposée proportionnelle à la qualité des eaux brutes par un facteur de dilution
- *Stock dans le sol* : cartographie de pollution à la surface, échantillonnage des carottes en zones de contamination similaire

Entretien du dispositif métrologique

À une fréquence régulière (tous les 1-2 mois)

- Changement de batteries, sauf en présence d'un panneau solaire pouvant les recharger (cas du regard du bassin versant de référence)
- Téléchargement manuel de données enregistrées en continu et vérification de mesures
- Nettoyage de siphon du regard du bassin versant de référence
- Nettoyage de la sonde multi-paramètres

Avant chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Nettoyage des équipements d'échantillonnage pouvant être en contact avec l'eau (tuyaux)
- Nettoyage du siphon du regard du bassin versant de référence
- Nettoyage de la sonde multi-paramètres
- Mise en place de flacons d'échantillonnage

RETOURS D'EXPÉRIENCES

Problèmes rencontrés et résolutions

Mesure du flux diffus en entrée

- Mesure des eaux brutes sur un bassin versant de référence

Absence de branchement électrique sur site

- Mise en place de batteries avec un panneau solaire pour alimenter les équipements

Conditions humides dans le regard des eaux brutes, menant à des pannes fréquentes des équipements électroniques

- Utilisation de boîtiers étanches avec silice dessicatif – cette solution n’est pas complètement efficace et la vérification fréquente des équipements est nécessaire
- Stockage de l’eau en surface irrégulier sur toute la longueur de la noue
- Mise en place de redans pour compartimenter la noue en trois parties et favoriser une infiltration homogène entre l’amont et l’aval
- Les eaux n’alimentent pas de manière régulière les ouvrages (irrégularité de la topographie), ce qui a un impact sur le recueil des eaux sur le bassin versant de référence et sur l’alimentation de la noue et l’accotement
- Installation de petites bosses pour mieux séparer les bassins versants
- Potentiel et historique de vandalisme sur site
- Fermeture à clef et dissimulation des équipements
- Potentiel de dégradation des équipements lors du fauchage des accotements
- Mise en place par le maître d’ouvrage d’un protocole d’entretien spécifique au site – cependant, lors de l’absence des personnes informées de ce besoin, l’entretien a été effectué de façon habituelle, menant à une dégradation des équipements
- Invalidation ou absence d’une partie de mesures hydrologiques
- Reconstitution de données par modélisation hydrologique avec une approche stochastique

Objectifs abandonnés

Suivi de fossés filtrants en aval de l’accotement filtrant

- Il a été démontré (par modélisation hydrologique et cartographie de la contamination du sol) que la majorité du ruissellement de l’eau s’infiltré dans l’accotement et que cette partie du suivi n’allait pas être très informatif

Évaluation des flux au niveau de l’accotement filtrant

- Le ruissellement à travers l’accotement étant non uniforme, les mesures issues des gouttières n’étaient pas représentatives de toute la longueur de l’ouvrage et ne pouvait pas servir à calculer le flux sortant

Étudier l’infiltration des eaux sur des portions non drainées de l’accotement et des fossés filtrants

Et si c’était à refaire ?

Accotement filtrant et noue filtrante : mesurer en continu la qualité (turbidité, conductivité) des eaux drainées

- Ce type de mesure permettrait de relativiser les résultats issus de l’échantillonnage irrégulier (dans le temps) des eaux à la sortie.

Noue filtrante : mieux caractériser la surverse

- Le dispositif de mesure du volume surversé a été installé plusieurs mois après le début d’échantillonnage. L’absence de cette donnée, ainsi que la non-caractérisation de la qualité de l’eau surverse, est une grande source d’incertitude dans l’évaluation du flux annuel.

18 POUR ALLER PLUS LOIN

- Flanagan, K. (2018). Évaluation de la rétention et du devenir d’un panel diversifié de micropolluants dans un ouvrage de biofiltration des eaux de ruissellement de voirie (Thèse de doctorat). Université de Paris-Est.
- Livrable L3, Roulépur (2019). Suivi expérimental de deux ouvrages de filtration végétalisés à Compans

3 - Couëron – Bassin sec BO₃-Chézine

Projet de recherche en appui

Matriochkas

Site

LIEU : Couëron (44), Nantes Métropole

MAÎTRE D'OUVRAGE : DIR Ouest

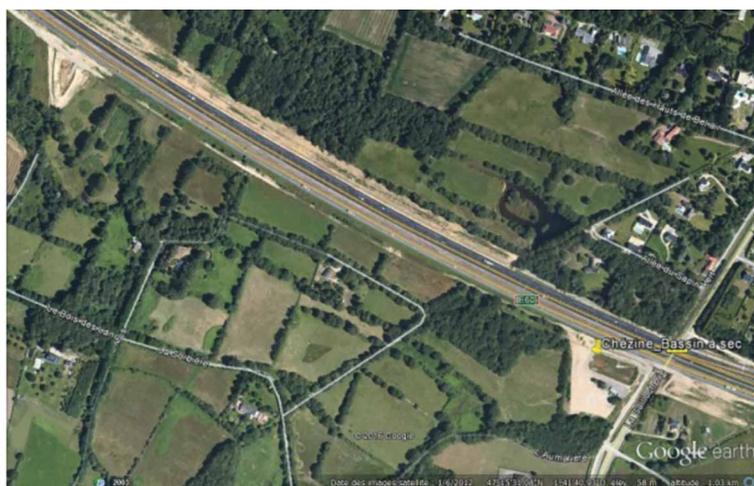
ÉQUIPE SCIENTIFIQUE : IFSTTAR

DATE DE MISE EN SERVICE : 2012

TYPE BASSIN VERSANT : routier - route nationale 2x2 voies à fort trafic (N165, 68 370 véhicules/jour)

ENVIRONNEMENT : agricole et résidentiel périurbain

TYPE OUVRAGE : bassin sec



© Google Earth

Figure 1. Vue aérienne de l'environnement du site d'étude à Couëron (Google Earth).

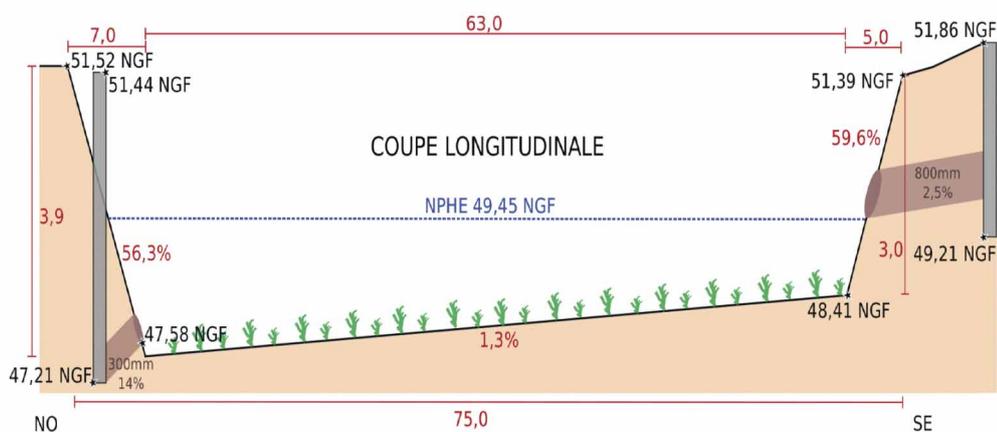


Figure 2. Site d'étude - Schéma de principe.

Schéma fonctionnel

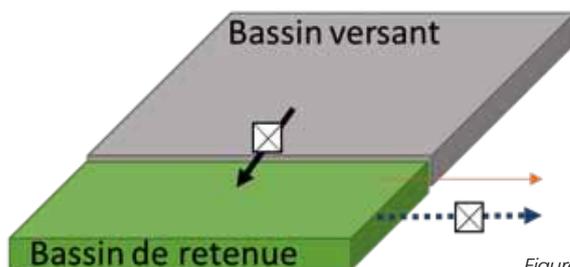


Figure 3. Schéma fonctionnel du site BO3.

Bassin versant d'apport

SURFACE : 0,048 km²

COEFFICIENT D'IMPERMÉABILISATION : ~90 %

PARTICULARITÉS : l'eau de la voirie est récupérée par un accotement filtrant, puis drainée avec un drain situé au fond de cet accotement. L'accotement est situé au centre de la 2x2 voies, ce qui rend l'accès au drain très difficile pour cette route très circulée.

Ouvrage

Bassin sec

Le bassin possède une entrée, une sortie et une surverse. L'ouvrage s'étend sur 75 m de long et environ 29 m de largeur, ce qui représente une superficie d'environ 2 175 m². Le volume du bassin est de 1 320 m³. Il est alimenté par un collecteur circulaire (Ø 800 mm). En sortie, l'eau arrive dans un regard par un collecteur circulaire (Ø 300 mm) et l'eau est évacuée par un collecteur circulaire (Ø 200 mm) qui est relié à un fossé qui s'écoule vers la rivière de la Chézine.



© ONEVU

Figure 4. Bassin sec.

Objectifs de la mesure

- Mesurer les flux d'eau et de polluants en entrée et en sortie de l'ouvrage

Mesures hydriques

Pluie

■ *Pluviomètre* : géré par l'IFSTTAR : pluviomètre à augets basculants de précision 0,2 mm, avec enregistrement en continu de la minute des basculements. Le pluviomètre est situé dans le bourg de Sautron (à 1,6 km).

Débits

■ *En entrée* : débitmètre Doppler Sigma mesurant la hauteur (capteur de pression) et la vitesse (Doppler) à un pas de temps de 5 minutes.

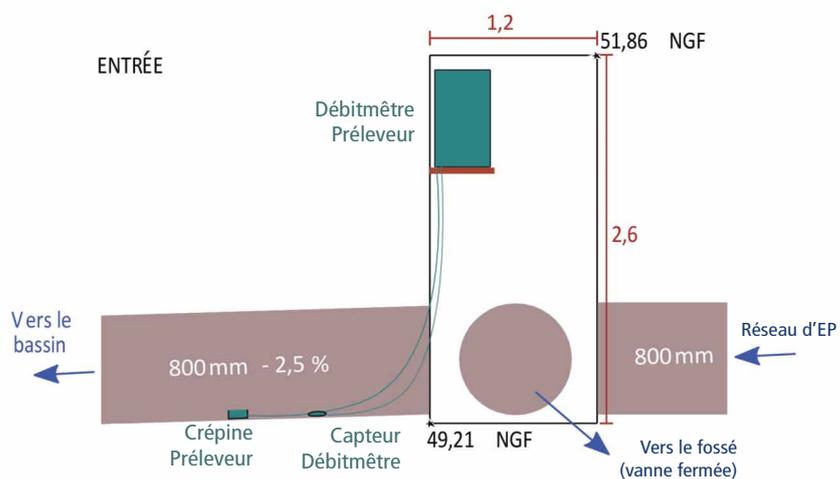


Figure 5. Système de mesure en entrée (unités en mètres).

■ *En sortie* : débitmètre Doppler Sigma mesurant la hauteur (capteur de pression) et la vitesse (Doppler) à un pas de temps de 5 minutes.

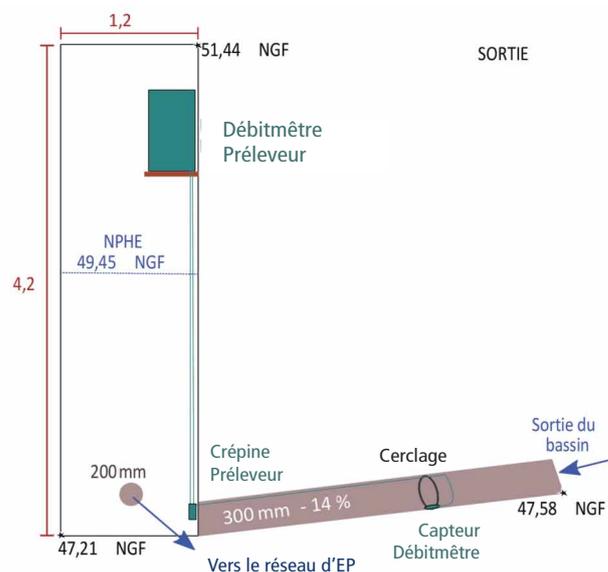


Figure 6. Système de mesure en sortie (unités en mètres).

Mesures de pollution

Prélèvements automatiques : système équivalent en entrée et en sortie

- Collecte ponctuelle d'échantillons moyens évènementiels par deux préleveurs automatiques (Sigma AS950), monoflacon de 10 L en verre. Le déclenchement du prélèvement par temps de pluie se fait à partir d'une consigne de seuil de hauteur (10,5 cm en été et 11,5 cm en hiver) et des prélèvements de 250 mL sont effectués toutes les 15 min.

Prélèvements ponctuels de sédiments

Une fois par an, une mesure de qualité du sol et des sédiments a été réalisée à plusieurs endroits dans le bassin.

Entretien du dispositif métrologique

À une fréquence régulière (tous les 15 jours)

- Changement de batteries
- Vérification de l'ensablement ou de l'encombrement autour du capteur
- Téléchargement manuel de données enregistrées en continu et vérification de mesures

Avant et après chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Rinçage des équipements d'échantillonnage pouvant être en contact avec l'eau (tuyaux)
- Vérification des flacons d'échantillonnage et vidange éventuelle

RETOURS D'EXPÉRIENCES

Problèmes rencontrés et résolutions

Absence de branchement électrique sur site

- Mise en place de batteries pour alimenter les équipements

Présence de rongeurs (ragondins) qui grignotent les câbles

- ▶ Pas de réelle solution *ecofriendly*

Capteur en sortie difficile d'accès (collecteur de petite taille)

- La présence d'un autre point de mesure (hauteur dans le regard) a progressivement permis de se passer de cette mesure de débit en sortie, après vérification de la bonne concordance des 2 mesures.

Faible pollution en entrée en raison du rôle filtrant joué par les accotements filtrants

Problèmes ponctuels de téléchargement de données, dont la cause n'a pas pu être identifiée

Panne ponctuelle de préleveur

Objectifs abandonnés

Suivi de la pollution en continu dans la chambre aval

- Il était envisagé initialement d'installer une sonde de mesure multiparamètres (conductivité, pH, température, turbidité) dans la chambre de régulation en aval. Les difficultés d'accès à la chambre n'ont pas permis de réaliser cette installation dans de bonnes conditions.

Et si c'était à refaire ?

Choisir un ouvrage sans accotement filtrant en amont, ou pour lequel l'accès aux accotements filtrants serait possible

19 POUR ALLER PLUS LOIN

- Livrable L2, Matriochkas (2016). Protocole expérimental de suivi des micropolluants dans un ouvrage de rétention/infiltration des eaux pluviales - Cahier des charges.

4 - Paris – STOPPOL®

Projet de recherche en appui

Roulépur

Site

LIEU : PARIS (75), Ile-de-France, rive droite de la Seine en face de l'Île Saint-Louis et de l'Île de la Cité

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ville de Paris, Service technique de l'eau et de l'assainissement

ÉQUIPES SCIENTIFIQUES : LEESU, Cerema

DATE DE MISE EN SERVICE : septembre 2012

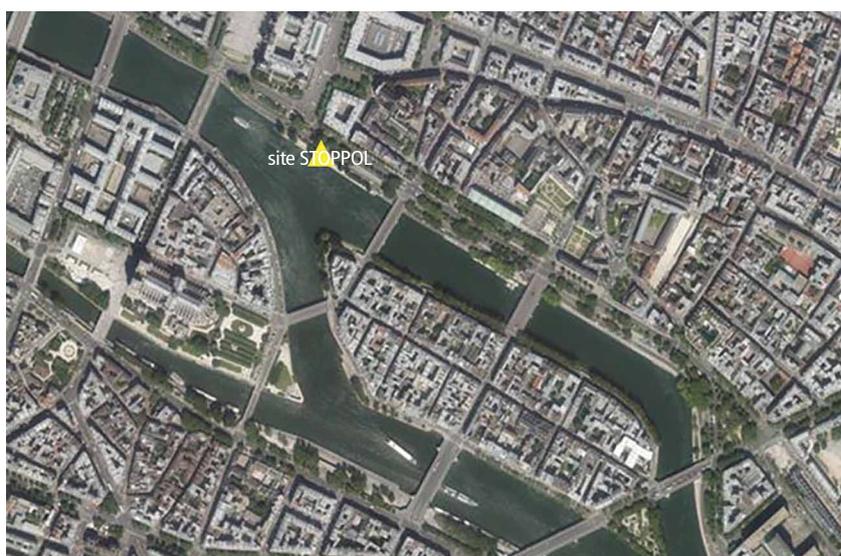
TYPE BASSIN VERSANT : routier à fort trafic (30 000 véhicules/jour)

ENVIRONNEMENT : urbain dense

TYPE OUVRAGE : décanteur avec filtration spécifique

Le dispositif est inséré dans un jardin public qui permet d'accueillir une armoire électrique

PÉRIODE DE MESURE : novembre 2015 à septembre 2016



© D.R.

Figure 1. Vue aérienne de l'environnement du site d'étude à Paris.

PARTICULARITÉS : à partir de juillet 2016, la voie Express G. Pompidou a été transformée en voie piétonne sur le tronçon constituant la surface d'apport du STOPPOL®. Une partie des mesures a donc été réalisée en période non circulée.

À l'amont, une canalisation neuve a été posée entre l'avaloir et le STOPPOL®, juste avant le démarrage des mesures, car l'ancienne était endommagée. La mesure de débit n'est pas accessible en entrée du dispositif par manque de pente et de place.

À l'aval, l'eau passe d'abord dans un regard visitable avant le rejet en Seine, permettant l'installation d'appareillage de mesure de débit.

Schéma fonctionnel

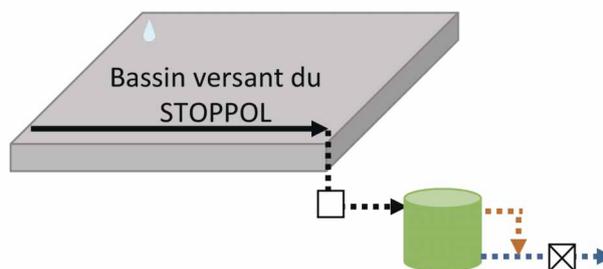


Figure 2. Schéma fonctionnel du site de Paris.

Bassin versant d'apport

SURFACES : 1 040 m²

COEFFICIENT D'IMPERMÉABILISATION : 100 %

PARTICULARITÉS : voirie très fortement circulée au début du projet Roulépur, environ 30 000 véhicules/jour (véhicules légers et petits camions de livraison)

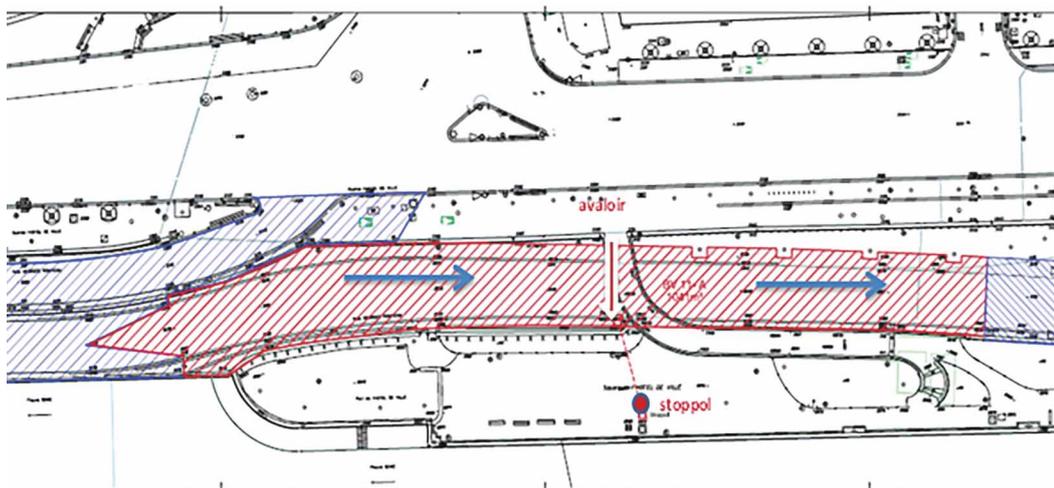


Figure 3. Bassin versant du STOPPOL® à Paris – Schéma de principe.

Ouvrage

STOPPOL®

Le STOPPOL® est un dispositif compact qui permet le traitement décentralisé des eaux de ruissellement. Il a été développé et commercialisé par Saint-Dizier environnement. Les fonctions du STOPPOL® sont les suivantes : dégrillage, décantation et filtration (avec absorption et adsorption sur un filtre). Ce dispositif est adapté d'après le concepteur pour le traitement des eaux de ruissellement d'une zone de 1 000 m² maximum. L'arrivée des eaux pluviales ruisselées se fait par une canalisation de 300 mm de diamètre.

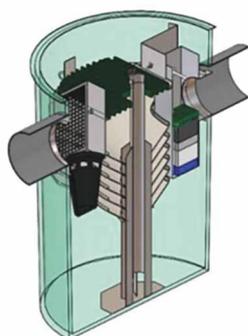


Figure 4. Coupe du STOPPOL.

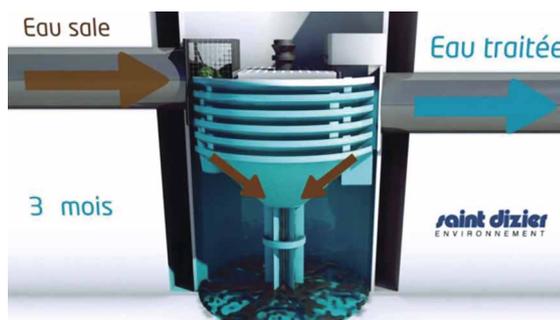


Figure 5. Coupe du STOPPOL®

SUIVIS MÉTROLOGIQUES

Objectifs de la mesure

- ▶ Mesurer les flux d'eau en sortie de l'ouvrage et les concentrations de polluants en entrée et en sortie. Le flux en sortie est supposé être identique au flux d'eau en entrée
- ▶ Déterminer les flux de polluants entrant et sortant

Mesures hydriques

Pluie

- *Pluviomètre* : pluviomètres du STEA, auget basculant de précision de 0,2 mm, avec enregistrement en continu de l'heure des basculements
- *Entrée* : le volume de pluie ruisselée entrant dans le STOPPOL® est estimé d'après la mesure sur le bassin versant de référence

STOPPOL®

La mesure de débit n'est pas accessible en entrée du dispositif par manque de pente et de place.

- *Sortie* : mesure en continu par auget basculant pour les très faibles débits et débitmètre Nivus pour les débits > 1 l/s, le Nivus est installé sur un siphon pour permettre une mesure sur canalisation en charge



© Ville de Paris

Figure 6. Siphon avec sonde Nivus.



© Ville de Paris

Figure 7. Siphon avec sonde Nivus en place dans le regard aval.

Mesures de pollution

Bassin versant de référence

■ *Eaux de ruissellement non traitées* : collecte d'échantillons moyens évènementiels par un préleveur automatique (Sigma SD900P) réfrigéré, équipé d'un monoflacon de 20 L, en plastique ou en verre. Asservissement au volume écoulé.

Sortie STOPPOL®

■ Collecte d'échantillons moyens évènementiels par un préleveur automatique (Sigma SD900P) réfrigéré, équipé d'un monoflacon de 20 L, en plastique ou en verre. Asservissement au volume écoulé.

Situations de crue de la Seine

En cas de crue

La mesure de débit n'est plus accessible en cas de crue. Au fur et à mesure de la montée des eaux de la Seine dans le regard de sortie, le débitmètre à auget est d'abord bloqué par les eaux, puis le débitmètre Nivus. Deux épisodes de crue « ordinaires » ont interrompu les mesures.

De plus, début juin 2016, une crue exceptionnelle a submergé le STOPPOL®, l'armoire de mesure abritant les 2 préleveurs et l'installation électrique. Les 2 préleveurs automatiques ont pu être retirés à temps. Le site de mesure n'a pu être remis en service que début juillet 2016.

Entretien du STOPPOL®

À une fréquence régulière (tous les 1-2 mois)

■ Nettoyage du panier dégrilleur et du seuil de prélèvement amont

À une fréquence régulière (tous les 6 mois)

■ Curage des boues et changement du filtre. La fréquence a pu être plus élevée en cas de crue de la Seine

■ Curage de la canalisation amont. Le curage a pu être plus fréquent en cas de bouchage par des débris végétaux provenant des arbres du square

Avant chaque campagne d'échantillonnage d'eau

Mise en place de flacons d'échantillonnage

Entretien du dispositif métrologique

À une fréquence régulière

■ Téléchargement à distance des données enregistrées en continue et vérification de mesures

À une fréquence irrégulière lors de la collecte des échantillons prélevés

■ Téléchargement manuel des données enregistrées en continue et vérification de mesures

Mesure du flux en entrée

Aucune solution n'a été trouvée pour mesurer les volumes entrant dans le STOPPOL®. Ces volumes sont considérés identiques aux volumes sortant.

Mesure du flux en sortie

Le site est sous influence des crues de la Seine. Le problème avait été identifié dès le choix du site. L'historique des épisodes de crues montrait une grande variabilité des intensités et des durées de crue d'une année à l'autre mais au moins un épisode par an. Finalement, trois épisodes de crues ont eu lieu durant la période de mesure de novembre 2015 à septembre 2016 dont une crue majeure.

Évolution du bassin versant étudié

L'objectif était d'étudier une voirie très fortement circulée. La piétonisation des berges de la Seine, objectif fort de la mandature, a été mise en place dans des délais très courts, interrompant les équipes du STEA en cours de mesure. Aucun délai n'a été accordé à Roulépur par la Mission Berges de Seine. Les mesures ont alors été poursuivies en période non circulée afin d'avoir des éléments de comparaisons entre les deux phases de mesure. La période de mesure disponible après arrêt de la circulation est cependant trop courte pour conclure.

Coordination des services de la Ville de Paris et de l'entreprise titulaire du marché d'entretien des appareils de mesure

- Le curage des boues se faisant de nuit par une entreprise extérieure avec un arrêt programmé de la circulation, et étant géré par une équipe différente de l'équipe responsable de l'instrumentation, la programmation de curage était à prévoir au moins 2 mois à l'avance.
- L'entreprise titulaire du marché d'entretien des appareils de mesure a découvert, lors de cette campagne de mesures, l'entretien des deux débitmètres utilisés (auget basculant et Nivus). En conséquence, le délai de mise en fonctionnement effectif du débitmètre à auget a été très long (3 mois). Le réglage du Nivus a été également fastidieux, notamment avec une difficulté prolongée à éliminer le bruit de fond. Les équipes de terrain du prestataire se sont avérées insuffisamment formées à la gestion des préleveurs automatiques laissant les tuyaux de remplissage des flacons de prélèvement plonger dans l'échantillon provoquant une ré-aspiration de ce dernier pendant les 6 premiers mois de mesure.
- Les travaux de branchement des tuyaux de prélèvement ont été effectués sur un marché de travaux sans qu'il ait été détecté, à la réception de travaux, que du béton avait obstrué la canalisation « pompier » du STOPPOL® destinée à curer les boues. Cette obstruction n'a été détectée que lors du curage organisé fin janvier 2016.
- Le site étant situé dans un square, les débris végétaux ont souvent obstrué partiellement la canalisation amont. Le nettoyage de cette canalisation n'était possible que lors des curages des boues du fait de la nécessité d'arrêter la circulation.

Autre problème rencontré

Un des filtres fournis était trop grand, s'adaptant mal au compartiment dans lequel il doit s'insérer dans le STOPPOL®. Il a donc été tassé plus que nécessaire.

Objectifs abandonnés

Un seul type de filtre a pu être étudié quand l'étude de 3 types de filtres était initialement prévue.

Et si c'était à refaire ?

La formation des entreprises titulaires des marchés est à prévoir

- Dans le cas présent, la formation des équipes de l'entreprise titulaire du marché d'entretien des capteurs s'est effectuée au fil de l'eau sans compétence initiale des équipes. En effet, les marchés ont été élaborés sur la base de compétence minimum des entreprises n'ayant pas pris en compte la spécificité de la campagne Roulépur. Solution proposée : intégrer les spécificités des campagnes de mesure dès la rédaction des marchés quand c'est possible.
- Des réunions préparatoires plus nombreuses et impliquant simultanément tous les intervenants, toutes qualifications confondues, auraient peut-être été nécessaires pour une compréhension approfondie des objectifs.

20

POUR ALLER PLUS LOIN

- Livrable L3, Roulépur (2020). Suivi expérimental du dispositif STOPPOL® à Paris.

5 - Nantes - Noue Dumont (Bottière Chenaie)

Projet de recherche en appui

Matriochkas

Site

LIEU : Nantes (44), Nantes Métropole

MAÎTRE D'OUVRAGE : Nantes Métropole

ÉQUIPE SCIENTIFIQUE : IFSTTAR

DATE DE MISE EN SERVICE : 2012

TYPE BASSIN VERSANT : résidentiel dense, drainé uniquement par un réseau de noues

ENVIRONNEMENT : urbain dense

TYPE OUVRAGE : noue filtrante végétalisée



Figure 1. Vue aérienne de l'environnement du site d'étude à Nantes (Google Earth).

PARTICULARITÉS : la noue Dumont est la noue exutoire du réseau de noues d'un petit bassin versant urbain et se rejette dans un collecteur d'eau pluviale.

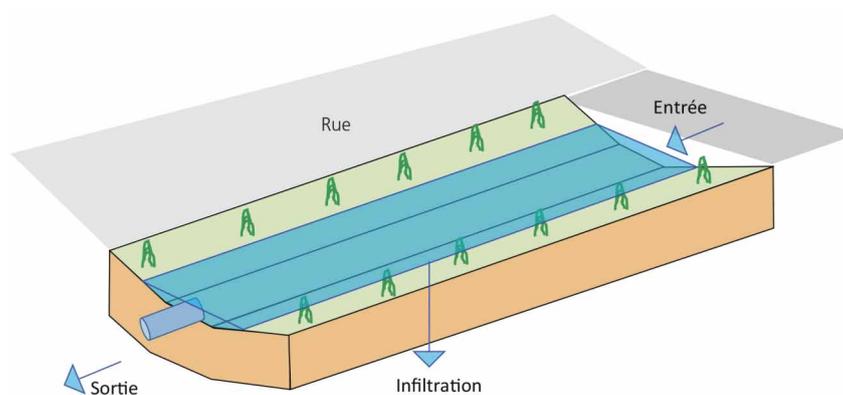


Figure 2. Site d'étude - Schéma de principe.

Schéma fonctionnel

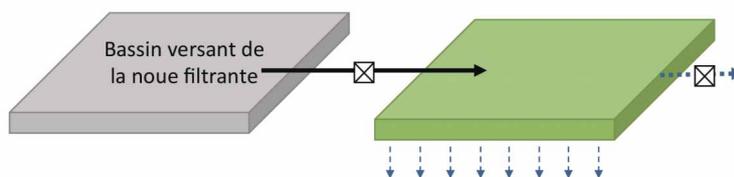


Figure 3. Schéma fonctionnel du site noue Dumont.

Bassin versant d'apport

SURFACE : 1,7 ha

COEFFICIENT D'IMPERMÉABILISATION : ~75 %

PARTICULARITÉS : il n'y a pas de réseau d'eau pluviale sur ce bassin versant. Les noues collectent l'eau de la voirie par alimentation diffuse latérale et l'eau des bâtiments par des buses directement connectées aux noues. Les noues collectent également de l'eau issue de pompages de l'eau drainée par les parkings enterrés.

Ouvrage

Noue

L'ouvrage s'étend sur 11,5 m de long et 4,5 m de large. La profondeur de la noue est de 80 cm et la section d'écoulement ~ 0,18 m².

La noue étudiée est alimentée par un passage inférieur sous une dalle en béton, dont la section est environ de 1,5 m x 0,3 m. Le débit de sortie (débit de fuite) est assuré par un petit collecteur circulaire (Ø 400 mm), avec une zone morte de 2 cm environ. Ce collecteur est ensuite relié à un collecteur d'eaux pluviales. Le substrat est constitué d'un mélange sol-sable et l'infiltration est forte, caractérisée par une perméabilité de surface de 5e⁻⁶ m/s.



Figure 4. La noue Dumont.

© ONEVU

SUIVIS MÉTROLOGIQUES

Objectifs de la mesure

- Mesurer les flux d'eau et de polluants en entrée et en sortie de l'ouvrage

Mesures hydriques

Pluie

■ *Pluviomètre* : géré par l'IFSTAR : pluviomètre à augets basculants de précision 0,2 mm, avec enregistrement en continu de la minute des basculements. Le pluviomètre le plus proche est situé rue Henri Dunant (à 800 m). Sur ce secteur, l'IFSTAR possède 2 autres pluviomètres distants de moins de 2 km du site et qui peuvent être utilisés en cas de défaillance du pluviomètre Dunant.

Débits

■ *En entrée* : installation d'un seuil à déversoir triangulaire dans la section d'écoulement et mesure de la hauteur d'eau par un capteur de pression Campbell CS451. Le débit est estimé par une courbe de tarage établie en laboratoire. Le pas de temps d'acquisition est de 2 minutes.

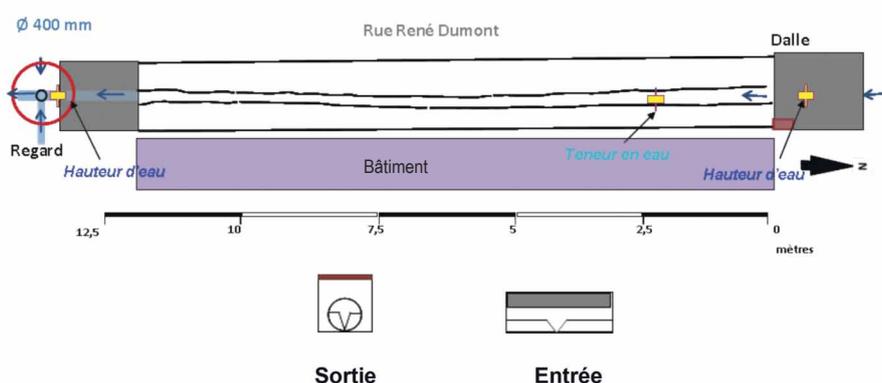


Figure 5. Système de mesure en entrée et en sortie – La sonde de hauteur est située dans l'axe de l'écoulement, en amont d'un seuil triangulaire.

Sortie

Entrée

■ *En sortie* : installation d'un seuil à déversoir triangulaire dans le collecteur circulaire et mesure de la hauteur d'eau par un capteur de pression Campbell CS451. Le débit est estimé par une courbe de tarage établie en laboratoire. Le pas de temps d'acquisition est flexible.

Mesure de l'état hydrique du sol

Une sonde de teneur en eau a été installée au centre de la noue et dans l'axe, pour vérifier l'infiltration de l'eau dans la noue (Capteur de type Campbell CS616).

Tous les capteurs sont reliés à 2 centrales d'acquisition Campbell CR300.

Mesures de pollution

Prélèvements manuels : système équivalent en entrée et en sortie

■ Collecte ponctuelle d'échantillons moyens évènementiels par prélèvements manuels à l'aide de béciers de 350 mL, et collecte régulièrement espacée en entrée et en sortie pour atteindre le volume de 10 L stocké dans un flacon en verre. Le déclenchement du prélèvement se fait à partir d'une évaluation visuelle de la hauteur d'eau en aval. Si l'écoulement est suffisant en aval et en amont (~2 cm), on déclenche le prélèvement en amont à l'aide du bécier, et on alterne tous les 5 min : amont / aval.

Prélèvements ponctuels de sols et sédiments

Une fois par an, une mesure de la qualité du sol et des sédiments a été réalisée en amont et en aval dans la noue.

Entretien du dispositif métrologique

À une fréquence régulière (tous les 15 jours)

- Changement de batteries
- Vérification de l'ensablement ou de l'encombrement autour du capteur
- Téléchargement manuel de données enregistrées en continu et vérification de mesures

Avant chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Rinçage du bécet avant chaque prélèvement manuel

RETOURS D'EXPÉRIENCES

Problèmes rencontrés et résolutions

Absence de branchement électrique sur site

- Mise en place de batteries pour alimenter les équipements

Espace réduit et pas de possibilité d'intégrer un préleveur automatique, trop encombrant.

- Prélèvements manuels et vigilance par rapport à la pluie

Noue initialement non choisie dans le cadre du projet et installation du point de mesure amont tardif (valable à partir de janvier 2018).

Intervention du service voirie pour installer un panneau de signalisation sur la berge de la noue => présence de gravats et légère déformation du profil en long.

Arrivée ponctuelle de ruissellement en provenance de la route.

Objectifs abandonnés

Prélèvements asservis au débit (en raison de prélèvements manuels, voir ci-dessus)

Et si c'était à refaire ?

- Prévoir l'installation du site plus tôt pour avoir le temps de demander des autorisations d'installer des préleveurs automatiques.

21

POUR ALLER PLUS LOIN

- Livable L2, Matriochkas (2016). Protocole expérimental de suivi des micropolluants dans un ouvrage de rétention/infiltration des eaux pluviales - Cahier des charges.

6 - Rosny-sous-Bois – Filtres à sable horizontaux plantés

Projet de recherche en appui

Roulépur

Site

LIEU : Rosny-sous-Bois (93), Ile-de-France

MAÎTRE D'OUVRAGE : Conseil départemental de Seine-Saint-Denis

ÉQUIPES SCIENTIFIQUES : CD93, Leesu

DATE DE MISE EN SERVICE : automne 2008

TYPE BASSIN VERSANT : routier à moyen trafic

ENVIRONNEMENT : urbain

TYPE OUVRAGE : filtres à sables horizontaux plantés



© D.R.

Figure 1. Vue aérienne de l'environnement du site d'étude à Rosny-sous-Bois.



© D.R.

Figure 2. Vue aérienne du bassin versant du site d'étude à Rosny-sous-Bois (BV de la rue Missak Manouchain en bleu qui récupère un débit traversier provenant du BV du lycée Jean Moulin en rouge).

PARTICULARITÉS : le lycée Jean Moulin situé 2 rue Missak Manouchain est composé d'un système de rétention très complexe. Ce bassin versant complexifie significativement le calcul de la surface total d'apport et du coefficient d'imperméabilisation.

Schéma fonctionnel

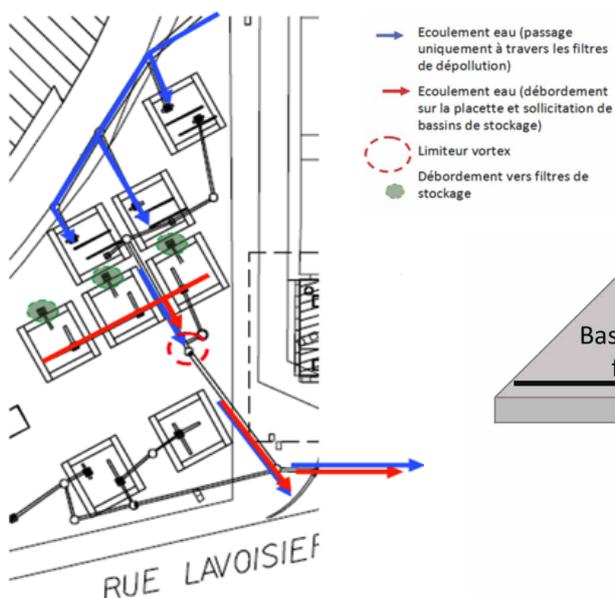


Figure 3. Site d'étude à Rosny-sous-Bois – Schéma de principe.

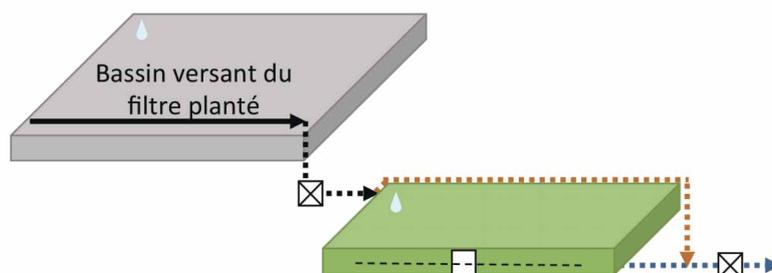


Figure 4. Schéma fonctionnel du site de Rosny-sous-Bois.

PARTICULARITÉS : les filtres à sable provoquent une influence aval très forte qui impacte significativement les débits d'entrée. Ce phénomène complique la mesure débitmétrique et le prélèvement en entrée d'ouvrage ; les temps de vidange de l'ouvrage souvent longs impactent significativement les taux de recouvrement lors des campagnes de prélèvements d'eau en entrée et sortie d'ouvrage. L'instrumentation en aval n'est pas munie d'une alimentation continue ce qui impacte l'enregistrement des données en continu.

Bassin versant d'apport

SURFACES : 7 596 m² dont 3 410 m² (rue Missak Manouchian), 2 497 m² (lycée – Toitures végétalisées non stockantes), 1 184 m² (lycée – cour intérieure du bâtiment principal du lycée avec espace minéral et végétalisé), 315 m² (lycée – parvis minéral) et 190 m² (bassin de stockage à ciel ouvert végétalisé).

COEFFICIENT D'IMPERMÉABILISATION : 70 %

Ouvrages



Figure 5 : Filtres à sable plantés.

© D.R.

Filtres à sable horizontaux plantés

Les filtres constituent trois filtres carrés (4,20 x 4,20 m) de dépollution, végétalisés, en parallèle. Ils favorisent la filtration de l'eau par écoulement dans un substrat de granulométries différentes et permettent également un stockage de l'eau à ciel ouvert. L'eau est collectée, par le réseau d'assainissement pluvial (Ø 600 mm), sur un bassin versant de 7 596 m², comprenant :

- pour la rue Missak Manouchian, une chaussée circulée, des places de stationnement, une voie cyclable, des trottoirs ;
- pour le lycée, une toiture végétalisée, une cour, un parvis minéral et un bassin de stockage.

L'eau est ensuite introduite à la base des trois filtres par une conduite d'alimentation (Ø 200 mm). La dépollution se fait par circulation de l'eau dans le substrat. Ce dernier est composé de matériaux de différentes granulométries : gravier 6-20, puis gravillon 4-8, puis sable grossier 2-4, sable fin 0,1-2 et enfin gravillon 4-8. Des cloisons perpendiculaires à l'écoulement naturel de l'eau forcent la circulation de l'eau dans les différentes granulométries.

Les eaux ainsi filtrées sont ensuite captées par des drains connectés à un regard tampon puis dirigées vers un limiteur vortex avant d'être évacuées par une canalisation de 190 mm de diamètre vers l'exutoire. De plus, le regard d'alimentation des trois filtres est équipé d'une grille permettant la surverse à ciel ouvert. L'eau, ainsi surversée, pourra ensuite se ré-infiltrer ou déborder vers des bassins de stockage situés en aval. L'ensemble du dispositif de rétention est étanche. Les pertes au ruissellement se limitent à l'évapotranspiration, aucune infiltration n'étant possible.

SUIVIS MÉTROLOGIQUES

Objectifs de la mesure

- ▶ Mesurer les flux d'eau et de polluants en entrée et en sortie des ouvrages
- ▶ Déterminer le stock de polluants dans le collecteur principal (Ø 600 mm) en entrée d'ouvrage
- ▶ Déterminer le stock de polluant dans le substrat des filtres

Mesures hydriques

Pluie

- *Pluviomètre* : auget basculant de précision 0,2 mm, avec enregistrement en continu de l'heure des basculements
- *Localisation du pluviomètre* : Neuilly-Plaisance (école Édouard Hériot - 34 rue Daniel Perdrigé)

Amont des filtres à sables

- Débitmètre électromagnétique (KROHNE, TIDALFLUX4300F) avec enregistrement en continu de la hauteur (taux de remplissage uniquement), vitesse et débit (alimentation électrique sur secteur et télétransmission des données).
- Sonde pression avec enregistrement en continu d'une hauteur complémentaire (alimentation sur secteur et télétransmission des données)

Figure 6. Débitmètre électromagnétique mesurant l'écoulement du ruissellement issu du bassin versant avec le dispositif de prélèvement d'eaux brutes.



© D.R.

Aval des filtres et amont du vortex

- Sonde pression avec enregistrement en continu d'une hauteur (alimentation électrique sur batterie et récupération manuelle des données)
- Calcul d'un débit selon une relation hauteur/débit réalisée par Saint-Dizier

Aval des filtres et du vortex

- Obturateur déversoir avec seuil triangulaire avec enregistrement en continu d'une hauteur via un débitmètre bulle à bulle (alimentation électrique sur batterie et récupération manuelle des données)
- Calcul d'un débit selon une relation hauteur/débit réalisée par Hydreka



© D.R.



© D.R.

Figures 7 et 8. Obturateur déversoir employé pour mesurer le débit en sortie (aval des filtres et du vortex).

PARTICULARITÉS : la plage de mesure de l'obturateur déversoir étant limité, le calcul du débit au niveau du vortex, au moyen de la loi hauteur débit fournie par le fabricant, a été utilisé pour compléter la série de données.

Mesures de pollution

Campagnes prélèvement d'eaux brutes en entrée des filtres

- Prélèvement d'échantillons d'eau non filtrée proportionnel au temps. Le préleveur réfrigéré (Bülher 1029 multiflacons pour une capacité totale de 10 L), alimenté sur secteur, est asservi à une mesure de temps sec pour le déclenchement de la campagne de prélèvement avec des flacons verres ou plastiques.

Campagne prélèvement d'eaux filtrées en sortie des filtres

- Prélèvement d'échantillons d'eau filtrée dépendant du débit avec un préleveur réfrigéré (sigma-AS950 monoflacon) alimenté par batterie. Le prélèvement s'effectue à pas de temps variable avec un volume fixe dans un monoflacon de 14 L verre ou plastique.

Campagne prélèvement de sédiments dans le collecteur (Ø 600 mm) en amont des filtres à sables

- Collecte de sédiments selon un protocole de prélèvement dans le collecteur amont.

Campagne prélèvement de substrat dans les filtres à sables

- Collecte de substrat (sable) selon un protocole de prélèvement dans les filtres de dépollution.

Entretien du dispositif métrologique amont (débitmètre électromagnétique et sonde pression + préleveur)**À une fréquence régulière**

- Concaténation des rapatriements journaliers dans un fichier semaine transmis à l'équipe de validation pour vérification des mesures
- Nettoyage de la sonde de hauteur

À une fréquence variable

- Nettoyage au niveau de la tige de prélèvement et des sondes du débitmètre électromagnétique

Avant chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Nettoyage du préleveur Bühlher 1029 (bol dans la tête de prélèvement, conduit d'alimentation des flacons, intérieur du préleveur)
- Mise en place de flacons d'échantillonnage

Entretien du dispositif métrologique aval (sonde pression)**À une fréquence régulière (tous les mois)**

- Téléchargement manuel de données enregistrées
- Fichier transmis à l'équipe de validation pour vérification des mesures
- Nettoyage de la sonde de hauteur

Entretien du dispositif métrologique aval (obturateur déversoir+préleveur)**À une fréquence régulière (1 fois par semaine)**

- Fichier semaine transmis à l'équipe de validation pour vérification des mesures
- Nettoyage de la sonde de hauteur
- Etalonnage du zéro

Avant chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Nettoyage du tuyau de prélèvement si cumul de sédiment
- Mise en place du mono flacon d'échantillonnage

Problèmes rencontrés et résolutions

Manque de place pour réaliser un prélèvement simultané verre et plastique (PEHD) en entrée et en sortie d'ouvrage

- Travaux d'agrandissement du tampon à l'aval pour faire passer un préleveur réfrigéré (impossibilité d'en mettre deux en parallèle)

Problème de sécurité pour accéder, à l'amont, au préleveur et à la trappe de visite du débitmètre électromagnétique

- Ajout d'échelons pour sécuriser la descente dans la chambre
- Mise en place d'une trappe de visite plus légère afin de faciliter les interventions (nécessite toujours une intervention lourde avec plusieurs agents)

Multiple chute de tension lors des campagnes de prélèvement à l'amont

- Modifications apportées pour fiabiliser l'asservissement (câblage) et pérenniser l'alimentation du préleveur (batterie en complément de l'alimentation secteur)

Enregistrement manuel des données enregistrées

- Mise en place d'un acquisateur ISODAQ-RT+ pour l'enregistrement et la transmission des données amont par GSM
- Pas de modifications réalisées pour l'aval

Enregistrement d'une seule mesure à l'amont (entre hauteur, vitesse, débit et impulsion)

- Le convertisseur KROHNE initial a été remplacé par un convertisseur KROHNE multiségnal IFC -300F (20/01/2016). Ce dernier permet l'enregistrement de l'ensemble des mesures (hauteurs, vitesses et débits) qui sont nécessaires à leur validation.

Mesure de hauteur par le débitmètre électromagnétique limité au taux de remplissage de la canalisation

- Ajout d'une mesure complémentaire de hauteur via un capteur de pression

Sous-estimation de la mesure des volumes cumulés en entrée d'ouvrage et asservissement du préleveur dépendant du débit remis en cause

- Curage de la canalisation ou, à défaut, nettoyage manuel du point de mesure par la trappe de visite pour éviter une trop forte accumulation de sédiments au niveau des électrodes susceptibles d'impacter la mesure
- Augmentation de la sensibilité d'enregistrement du débitmètre électromagnétique pour avoir une couverture débitométrique plus importante (néanmoins, le débitmètre sous-estime toujours les volumes cumulés)
- A été posé un relai pour l'asservissement du préleveur réfrigéré à la hauteur (18/08/2016) pour garantir les campagnes de prélèvements du fait des mesures de débits peu fiables.

Incertitude sur les mesures de hauteur trop importantes avec un seuil rectangulaire ad-hoc

- A été mis en place un obturateur déversoir à seuil triangulaire (Hydreka) asservi à un débitmètre bulle à bulle (Sigma950). Le débit est obtenu par une loi hauteur/débit.

Maintenance compliqué à l'aval (nettoyage notamment)

- Prolongement de la canalisation (Ø 190 mm) avec une ouverture en amont de l'obturateur. Cette modification a réduit la plage de mesure du débitmètre mais a facilité son entretien. Cette ouverture aurait pu permettre le passage du tuyau de prélèvement.
- Un capteur de pression a été placé à l'aval des filtres, au niveau du limiteur vortex, pour des raisons de validation débitométrique.

Absence de branchement électrique sur l'aval, défaut récurrent de batterie, absence d'une partie de mesures hydrologiques

- Mise en place de batteries avec un changement hebdomadaire
- Changement des batteries standards par des batteries à plus forte capacité (batterie voiture)
- Reconstitution des données de débit à partir des hauteurs d'eau mesurées au niveau du vortex

Obsolescence de l'obturateur déversoir (membrane d'étanchéité) et du débitmètre bulle à bulle (matériel ancien)

- Maintenance hebdomadaire avec gonflement de la membrane d'étanchéité jusqu'au remplacement de l'obturateur
- Changement du débitmètre

Vandalisme sur site à l'aval (obturateur)

- Pas de solution possible pour éviter ce problème

Objectifs abandonnés

Mesure de la teneur en eau dans les substrats et capacité d'infiltration de la surface

- Possibilité de vandalisme
- Impact potentiel des équipes d'intervention de gestion des espaces verts

Analyse de la biomasse (végétaux)

- La gestion des espaces verts est réalisée par le service espace vert de la commune de Rosny-sous-Bois pour laquelle nous n'avons aucune information (fréquence de maintenance, faucardage, remplacement des espèces végétales...). Les mesures sur la biomasse ne semblent pas pertinentes.

Et si c'était à refaire ?

Pour l'entrée, il serait nécessaire d'installer le point de mesure et de prélèvement en entrée des filtres beaucoup plus en amont. En l'état, le point de mesure est impacté quantitativement et qualitativement (influence aval sur les débits – décantation).

Travailler sur une ou deux mesures en continu (turbidité, conductivité) des eaux brutes et filtrées

- Ce type de mesure permettrait de relativiser les résultats issus de l'échantillonnage irrégulier (taux de recouvrement médiocre et décalage dans le temps entre prélèvement amont et aval).

Globalement, le fonctionnement hydrologique est assez complexe. Il aurait été nécessaire de mieux appréhender ce fonctionnement en début d'étude pour fiabiliser les dispositifs de mesure et les campagnes de prélèvement.

Simplifier le dispositif débitmétrique amont

22 POUR ALLER PLUS LOIN

- Livrable L3, Roulépur (2018). Suivi expérimental d'un ouvrage de filtres à sable horizontaux plantés à Rosny-sous-Bois.

7 - Vertou – Bassin en eau de La Ville au Blanc

Projet de recherche en appui

Matriochkas

Site

LIEU : Vertou (44), Nantes Métropole

MAÎTRE D'OUVRAGE : Conseil départemental de Loire Atlantique (jusqu'en 2016),
Nantes Métropole depuis 2017

ÉQUIPE SCIENTIFIQUE : IFSTTAR

DATE DE MISE EN SERVICE : 1997

TYPE BASSIN VERSANT : mixte - zone d'entreprise et route départementale à trafic moyen
(D115)

ENVIRONNEMENT : industriel, commercial et résidentiel périurbain

TYPE OUVRAGE : bassin en eau étanche



Figure 1. Vue aérienne de l'environnement du site d'étude à Vertou (Google Earth) – le bassin est indiqué dans l'ellipse rouge.

PARTICULARITÉS : le bassin est étanche ; il est alimenté et drainé par des collecteurs circulaires.

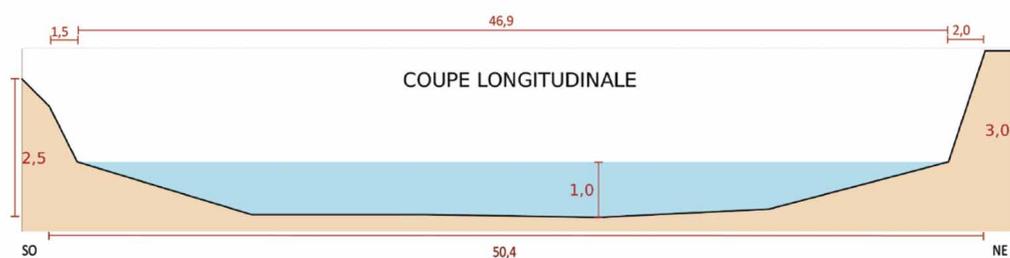


Figure 2. Le site d'étude - Schéma de principe, en mètres.

Schéma fonctionnel

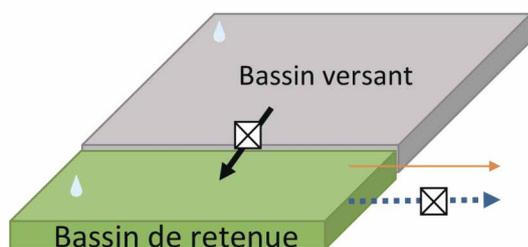


Figure 3. Schéma fonctionnel du site de la Ville au Blanc.

Bassin versant d'apport

SURFACE : 0,3 km²

COEFFICIENT D'IMPERMÉABILISATION : 28 %

PARTICULARITÉS : à noter sur le bassin versant la présence de fossés le long de la route départementale et un petit bassin en eau dans la zone d'entreprise

Ouvrages

Bassin en eau

Le bassin a une superficie d'environ 650 m², il s'étend sur environ 50 m de long et 22 m de large, les berges sont hautes de 3 m par rapport au fond de l'ouvrage et la hauteur d'eau par temps sec est de 1 m. Le bassin est étanche avec un empierrement. Il est alimenté par un collecteur circulaire (Ø 1 000 mm). Une chambre collecte l'eau en sortie d'ouvrage avec un système de régulation et le débit sort par un collecteur circulaire (Ø 1 200 mm) qui évacue l'eau vers une petite rivière, la Vertonne.



© ONEVU

Figure 4. Le bassin en eau.

Objectifs de la mesure

- ▶ Mesurer les flux d'eau et de polluants en entrée et en sortie de l'ouvrage

Mesures hydriques

Pluie

■ *Pluviomètres* : gérés par Nantes Métropole, à augets basculants de précision 0,2 mm, avec enregistrement en continu de l'heure des basculements. 2 pluviomètres sont utilisés : Thebaudières et Filée, ils sont distants de 3 et 5 km du site.

Débits

■ *En entrée* : débitmètre Doppler Sigma mesurant la hauteur (capteur de pression) et la vitesse (Doppler) à un pas de temps de 5 min. Un seuil de 10 cm a été installé afin d'assurer une ligne d'eau suffisante en vue des prélèvements.

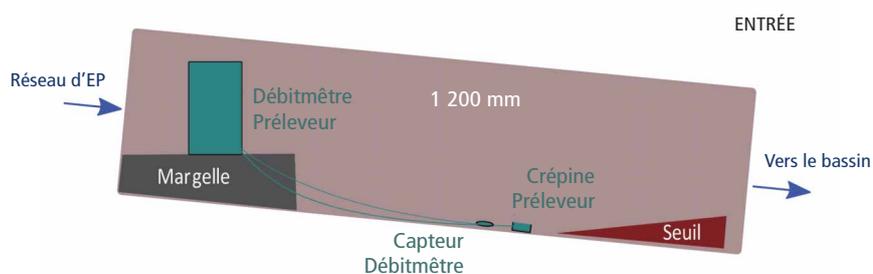


Figure 5. Système de mesure en entrée.

■ *En sortie* : débitmètre Doppler Sigma mesurant la hauteur (capteur de pression) et la vitesse (Doppler) à un pas de temps de 5 minutes. Un seuil de 10 cm a été installé afin d'assurer une ligne d'eau suffisante en vue des prélèvements. Une paroi bétonnée est présente dans une chambre de régulation et l'eau passe soit par un orifice, soit par surverse au-dessus de cette paroi pour des fortes hauteurs. Une mesure de hauteur est également réalisée dans la chambre de régulation, ce qui permet un calcul complémentaire du débit par une loi d'orifice.

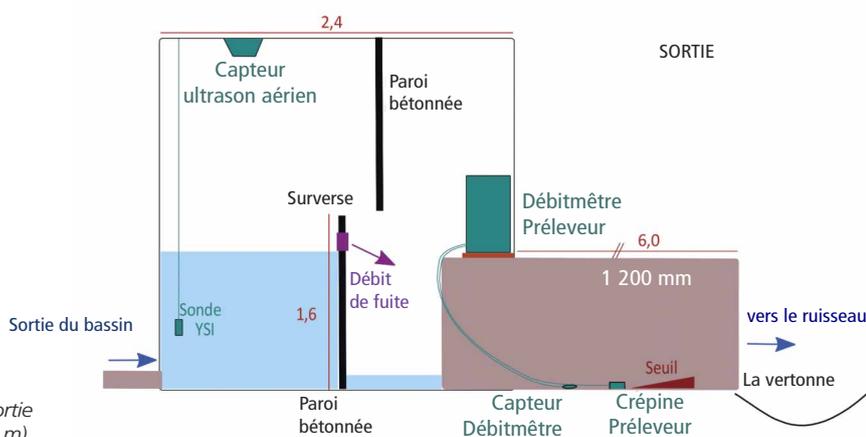


Figure 6. Système de mesure en sortie (dimensions en m).

Prélèvements automatiques : système équivalent en entrée et en sortie

- Collecte ponctuelle d'échantillons moyens évènementiels par deux préleveurs automatiques (Sigma AS950), monoflacon de 10 L en verre. Le déclenchement du prélèvement par temps de pluie se fait à partir d'une consigne de seuil de hauteur, et les prélèvements sont effectués tous les 30 m³ par flacon de 500 mL en entrée et de 375 mL en sortie.

Prélèvements ponctuels de sédiments

Une fois par an, un prélèvement de sédiments a été réalisé en plusieurs points du bassin afin de connaître leur qualité.

Entretien du dispositif métrologique**À une fréquence régulière (tous les 15 jours)**

- Changement de batteries
- Téléchargement manuel de données enregistrées en continu et vérification de mesures
- Nettoyage du siphon du regard du bassin versant de référence

Avant et après chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Rinçage et purge des équipements d'échantillonnage pouvant être en contact avec l'eau (tuyaux)
- Vérification des flacons d'échantillonnage

RETOURS D'EXPÉRIENCE**Problèmes rencontrés et résolutions**

Absence de branchement électrique sur site

- Mise en place de batteries pour alimenter les équipements

Rôle de l'entretien de l'ouvrage

- Au début de l'installation, la végétation était très présente sur les berges et aux alentours du bassin. Débroussaillage initial pour accéder au point de mesure en sortie. Un entretien complet (végétation arborée retirée) a été réalisé par le maître d'ouvrage en 2017, ce qui a rendu à la fois l'accès plus facile et le site plus visible. Un système a été mis en place pour dissimuler les équipements en sortie.

Accès délicat en sortie par un tampon en béton peu maniable

- Pas de solution optimale trouvée

Accès délicat en entrée en raison de l'absence d'une échelle de sécurité

Consigne de prélèvement (hauteur) variable dans l'année, en fonction des conditions d'écoulement

- Ajustement régulier de cette consigne de prélèvement pour capter des événements pluvieux

Présence d'écoulements turbulents en entrée qui ont parfois fait bouger le préleveur

- Consolidation du système

Objectifs abandonnés

Suivi de la pollution en continu dans la chambre aval

- Il était envisagé initialement d'installer une sonde de mesure multiparamètres (conductivité, pH, température, turbidité) dans la chambre de régulation en aval. Les difficultés d'accès à la chambre n'ont pas permis de réaliser cette installation dans de bonnes conditions.

Et si c'était à refaire ?

Mettre en place un système de télétransmission pour pouvoir optimiser la récupération des échantillons de terrain et vérifier le fonctionnement des capteurs (débitmètre et préleveur) sur ce site soumis à des inondations assez fréquentes.

23

POUR ALLER PLUS LOIN

- Livrable L2, Matriochkas (2016). Protocole expérimental de suivi des micropolluants dans un ouvrage de rétention/infiltration des eaux pluviales - Cahier des charges.

8 - Villeneuve-le-Roi – Parking perméable végétalisé

Projet de recherche en appui

Roulépur

Site

LIEU : Villeneuve-le-Roi (94), Ile-de-France

MAÎTRES D'OUVRAGE : Ville de Villeneuve-le-Roi et SyAGE

ÉQUIPE SCIENTIFIQUE : Cerema

DATE DE MISE EN SERVICE : janvier 2015

TYPE BASSIN VERSANT : résidentiel avec trafic faible

ENVIRONNEMENT : résidentiel en bord de Seine, légèrement industriel, proximité de l'aéroport d'Orly

TYPE OUVRAGE : parking perméable végétalisé



Figure 1. Vue aérienne de l'environnement du site d'étude à Villeneuve-le-Roi .

— Parking perméable végétalisé
— Parking imperméable de référence

© D.R.

PARTICULARITÉS : la pluie s'infiltré directement à la surface du parking perméable. Aucun ruissellement de surface n'a été observé sur le parking et il n'y a aucun apport d'eau extérieur au parking, d'où la nécessité d'instrumenter un parking imperméable de référence. Il y a de l'électricité sur les deux parkings (perméable et imperméable). Suite à une malfaçon lors de la construction du regard de mesure sur le parking perméable, un volume d'eau mort nécessite d'être pompé en continu.

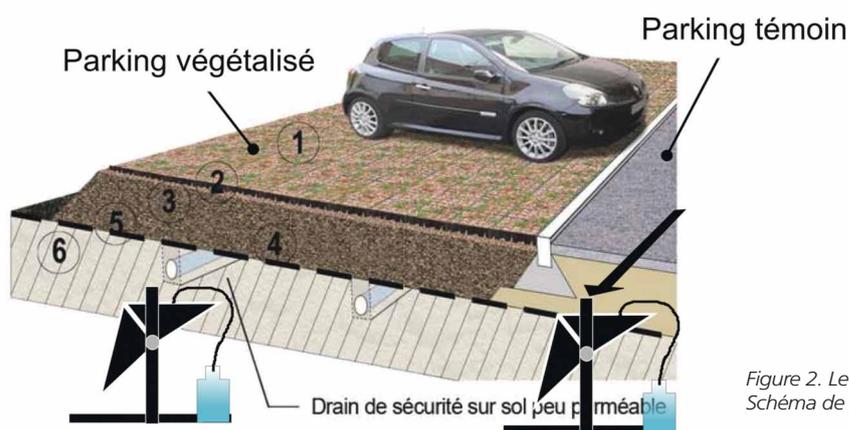


Figure 2. Le site d'étude à Villeneuve-le-Roi – Schéma de principe.

Schéma fonctionnel

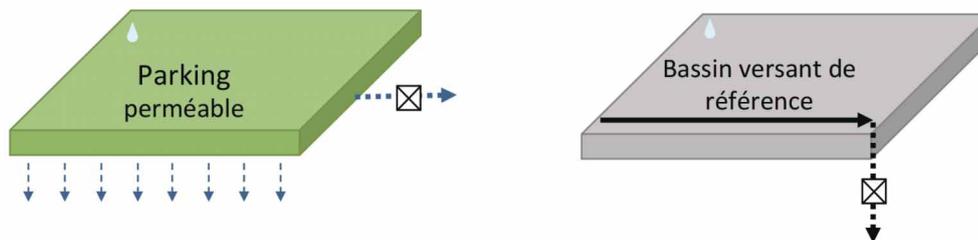


Figure 3. Schéma fonctionnel du site de Villeneuve-le-Roi, le système étudié à gauche, la zone de référence pour les eaux brutes à droite.

Référence eaux brutes

Les eaux brutes sont étudiées sur un parking de référence en enrobé imperméable situé à quelques mètres du parking perméable. Les eaux de ruissellement issues de ce parking de référence sont considérées comme étant « l'entrée » du parking perméable. Les eaux de ruissellement sont récupérées par 2 avaloirs de surface et le débit est mesuré au niveau d'un regard environ 5 mètres en aval.



Figure 4. Parking imperméable de référence.

© Cerebra

Ouvrage

Parking perméable végétalisé

SURFACE du bassin d'apport = SURFACE ouvrage : 1 270 m²

Le parking perméable possède 34 places de parking avec des dalles végétalisées et sont desservies par une allée roulante en pavés béton autobloquants. La surface des places est composée de dalles alvéolaires ÉCORASTER® remplies de substrat ÉCOVEGETAL® Mousses (Terre cuite, composte, pouzzolane) et sert de support à la végétation (sédums, fétuques, trèfles...). L'allée roulante est composée de pavés béton autobloquants. Le lit de pose de 4 cm sur lequel repose les dalles et les pavés est composé de substrat ÉCOVEGETAL® Mousses. Sous ce lit de pose se trouve un géotextile en polypropylène non tissé aiguilleté. Ces premières couches reposent sur une première couche de fondation de graves drainantes de 20 cm en

conçassés 20/40. Une couche de sous-fondations en graves drainantes de 30 cm en conçassés 40/80. L'eau qui percole dans l'ouvrage peut s'infiltrer sur place ou être collectée par un drain placé dans le fond de forme.



© Leesu

Figure 5. Parking perméable.

SUIVIS MÉTROLOGIQUES

Objectifs de la mesure

- ▶ Mesurer les flux d'eau et de polluants en entrée (parking imperméable) et en sortie (parking perméable)
- ▶ Déterminer le stock de polluants dans le sol de l'ouvrage

Mesures hydriques

Pluie

- *Pluviomètre* : auget basculant de précision 0,1 mm, avec enregistrement de la date et de l'heure au moment du basculement

Parking de référence

- *Eaux de ruissellement non traitées* : enregistrement des mesures instantanées de hauteur d'eau et de débit à quelques cm en amont d'un avaloir en V, pas de temps d'enregistrement : 1 min



© Cerema

Figure 6. Déversoir en V avec mesure de la hauteur d'eau et du débit provenant du ruissellement issu du parking de référence.

Parking perméable végétalisé

■ *Drain* : auget basculant de 4 L et 5 L (un auget par drain), avec enregistrement de la date et de l'heure au moment du basculement.

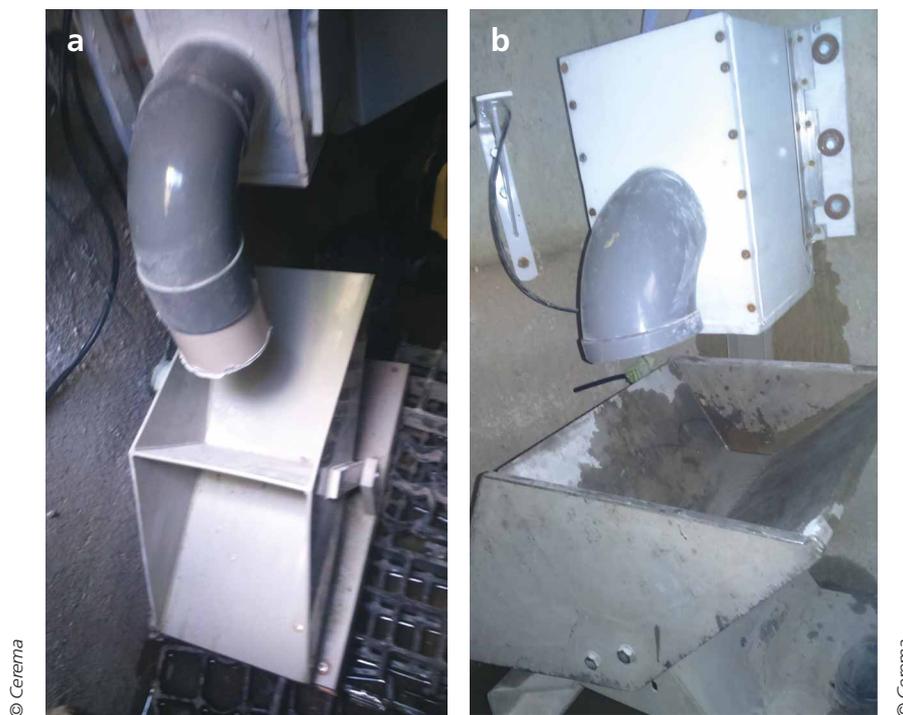


Figure 7. Débitmètres à auget basculant pour la mesure des débits en sortie de drain du parking perméable (a) auget de 5 L ; b) auget de 4 L.

Mesures de pollution

Bassin versant de référence

■ *Eaux de ruissellement non traitées* : collecte d'échantillons moyens évènementiels par deux préleveurs automatiques ISCO avec embases réfrigérées, équipés d'un monoflacon de 20 L, dans un cas en plastique et en verre dans l'autre.

Parking perméable végétalisé

■ *Drain* : collecte d'échantillons moyens évènementiels par deux préleveurs automatiques ISCO, équipés d'un monoflacon de 20 L, dans un cas en plastique et en verre dans l'autre.

Entretien du dispositif métrologique

À une fréquence régulière (tous les mois)

- Vérification du bon fonctionnement des pompes
- Relevé manuel des données enregistrées et vérification des mesures
- Relevé des données pluviométriques et vérification du chargement de la pile
- Nettoyage des augets, du déversoir et du pluviomètre

Avant chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Nettoyage des équipements d'échantillonnage pouvant être en contact avec l'eau (tuyaux)
- Nettoyage du déversoir
- Mise en place de flacons d'échantillonnage
- Lancement des programmes de prélèvements

Problèmes rencontrés et résolutions

En entrée : absence de ruissellement de surface sur le parking perméable

- Mesure des eaux brutes sur un parking imperméable de référence

Absence d'électricité sur le parking perméable

- Raccordement provisoire pendant la durée du projet sur le réseau électrique de la ville

Malfaçon du regard où sont placés les instruments de mesure entraînant un volume d'eau mort de 60 cm

- Installations de pompes, branchées en continu avec mise en route selon le niveau d'eau

Entrée d'eau de pluie par la grille du regard sur le parking perméable

- Installation d'une bâche et d'un morceau de plexiglass pour protéger les instruments

Inondations des sites suite à 2 crues importantes de la Seine

- Instruments retirés et électricité coupée en attendant la décrue

Inondation du regard suite à une coupure d'électricité réalisée par la ville de Villeneuve-le-Roi

- Accord avec la ville pour ne plus couper l'électricité ou pour prévenir préalablement

Inondation du regard suite à un dysfonctionnement de pompes

- Changement de pompe et ajout d'une seconde pompe par sécurité

Inondation du regard par retour d'eau venant d'un parc où l'eau du parking doit s'évacuer

- Installation d'une plaque en bois pour boucher l'exutoire du regard donnant vers le parc, les tuyaux des pompes passent au travers de la plaque

Inondations récurrentes (comme listées précédemment)

- Ajout de message d'alerte (SMS) sur la hauteur d'eau dans le regard et sur le niveau de charge de la batterie de la centrale d'acquisition des données en cas de coupure d'électricité

- Embases réfrigérées retirées pour éviter tout dommage (une embase hors service après une inondation) et les risques électriques : la prise électrique est située à seulement 10 cm de hauteur par rapport au sol et est donc facilement immergeable lors des inondations

Retard pris sur le projet suite aux inondations n'a pas permis de mettre en place une solution innovante de parking perméable végétalisé sur une moitié du parking

- Évaluation de solutions améliorées de parkings perméables végétalisés en colonnes

Objectifs abandonnés

Mesures de l'état hydrique du sol (teneur en eau et tension)

- Trop de retard pris, dysfonctionnement des instruments

Prélèvement de l'eau interstitielle sous l'ouvrage

- Trop complexe à mettre en place et trop de biais potentiels

Et si c'était à refaire ?

Mieux choisir le site à instrumenter et bien penser à l'instrumentation

- Le cas idéal serait de penser aux mesures voulues (mesure de débit, teneur en eau, prélèvements d'eau rejetée par le système et interstitielle...) au moment de la conception.

Bien séparer la partie avec les dalles végétalisées des dalles bétons

- Ceci permettrait de voir l'impact éventuel de la végétation sur les performances hydriques (évapotranspiration) et la rétention des polluants.

24 POUR ALLER PLUS LOIN

- Varnède, L. (2020). Des parkings perméables végétalisées pour une gestion durable des eaux pluviales - Evaluation expérimentale et développement d'un outil d'aide à la conception. (Thèse de doctorat). Université Paris-Est.
- Livrable 3, Roulépur (2020). Suivis expérimentaux de parkings perméables *in situ* à Broué et à Villeneuve-le-Roi, et en colonnes à Trappes.

9 - Villeurbanne (éco-campus de La Doua)

Chaussée à structure réservoir de l'éco-campus Lyon Tech La Doua (CSR)

Projet de recherche en appui

MicroMegas

Site

LIEU : éco-campus Lyon Tech La Doua - Villeurbanne (69)

MAÎTRE D'OUVRAGE : INSA Lyon

ÉQUIPES SCIENTIFIQUES : DEEP-INSA, EVS

DATE DE MISE EN SERVICE : septembre 2010

TYPE BASSIN VERSANT : parking de bâtiments (bureaux, salles de cours, restaurant universitaire) ; il est aujourd'hui réservé au restaurant universitaire et à des personnels permanents

ENVIRONNEMENT : campus

TYPE OUVRAGE : chaussée à structure réservoir



Figure 1. Vue aérienne de l'environnement du site d'étude.



Figure 2. Le site d'étude.

Schéma fonctionnel

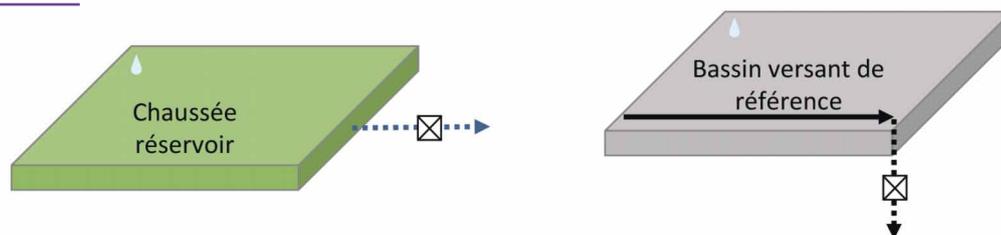


Figure 3. Schéma fonctionnel du site, le système étudié à gauche, la zone de référence pour les eaux brutes à droite.

Bassin versant d'apport

SURFACE du bassin d'apport = SURFACE de l'ouvrage : 93,96 m²

COEFFICIENT D'IMPERMÉABILISATION : 100 %

PARTICULARITÉS : ouvrage à revêtement drainant en béton drainant

Référence eaux brutes

Pour l'estimation des abattements de micropolluants, les concentrations en sortie sont comparées à celles ayant ruisselé sur un parking classique de mêmes dimensions en béton bitumineux (BB) contigu à la CSR.

Ce parking présente une pente de 2 à 3 % qui conduit les eaux de ruissellement vers un avaloir situé à l'entrée d'un puits de mesure dédié.

Le parking dans sa globalité permet en théorie de recevoir 6 véhicules en stationnement ; trois places sont réservées aux handicapés sur la partie de référence. Mais des voitures ou camionnettes se garent souvent derrière les places de parkings. Les places pour handicapés ne sont pas respectées.



Figure 4. Le bassin versant de référence contigu à la partie en CSR.

© OTHU

Ouvrage

La chaussée réservoir est composée en surface d'un revêtement drainant de 0,15 m (béton drainant Hydromedia™ utilisable pour les revêtements routiers sur une couche de gravier 20/50 de 0,30 m. La capacité d'infiltration du béton drainant est de 880 L/min/m² soit environ 1,5 cm/s.

Le fond de fouille a été étanché par une géomembrane. Un drain a été installé à l'exutoire pour récupérer les eaux. Une sous-couche de gravier roulé 20/50 de 30 cm a ensuite été mise en place et le béton poreux a été coulé en 4 bandes successives d'une largeur de 1,8 m avec une épaisseur de 15 cm. Afin d'assurer la continuité entre les bandes, un joint en ciment a été coulé entre chacune d'entre elles. Le fond de fouille présente une pente de 4 à 5 % de façon à récupérer dans une chambre de mesure l'ensemble des eaux qui s'infiltrent à travers le matériau ou ruissellent.

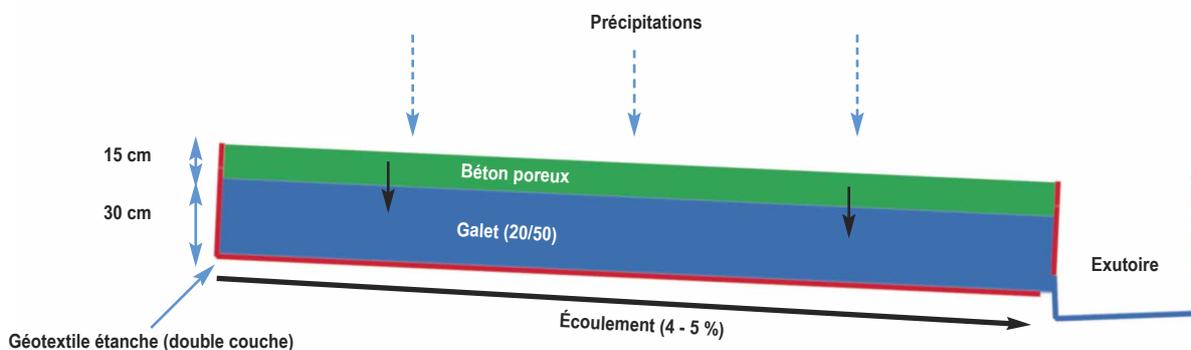


Figure 5. Coupe longitudinale de la chaussée réservoir.

SUIVIS MÉTROLOGIQUES

Objectifs de la mesure

- Mesurer les flux d'eau et de micropolluants en sortie des ouvrages pour comparaison avec un ouvrage centralisé et d'autres ouvrages à la source du campus. Les familles de micropolluants étudiés sont les métaux et métalloïdes, des pesticides, les HAPs, les alkylphénols et dérivés et les PBDE.

Mesures hydriques

Pluie

- Pluviomètre à auget basculant

Bassin versant de référence et sortie de la CSR

Une première instrumentation a été réalisée en 2010 : des mesures de débit (pas de temps : 30 s) via un débitmètre électromagnétique alimenté via le lampadaire en bordure du parking et des échantillonnages des eaux pluviales avec un bidon de 60 L. La pluviométrie était représentée par les quantités de pluie tombée sur la partie de référence (parking imperméable).

Dans le cadre de MicroMegs, la même instrumentation que celle mise en place sur la noue et la tranchée a été implémentée également dans les deux chambres de mesure reliées à la partie de parking imperméable. L'installation nouvelle a été terminée début 2016. L'ensemble était alimenté par des panneaux solaires ; en mai 2017, un panneau solaire plus puissant est mis en place. Début 2018, le site est raccordé au secteur.

L'instrumentation est décrite ci-après.

① Les effluents en sortie du drain arrivent dans la chambre et subissent une mesure de conductivité électrique et de température ; les capteurs sont placés dans une cellule cylindrique en PVC.

② Une mesure de débit par un double débitmètre - débitmètre électromagnétique (EM) + débitmètre massique à auget (20 g) - est ensuite effectuée. Les petits débits de la gamme [0 ; 100 L/h] sont mesurés par le débitmètre à auget tandis que le mesurage des débits plus importants de la gamme [75 ; 2 000 L/h] est assuré par le débitmètre EM. Le mesurage de l'un comme de l'autre est une valeur moyennée de l'ensemble des débits sur le pas de temps de mesure.

③ Une centrale d'acquisition recueille en continu et au pas de temps de 2 minutes les données des débitmètres, du conductimètre et de la sonde de température. Les deux signaux issus des débitmètres subissent un traitement en ligne pour ne fournir en fin de compte qu'un seul débit présentant l'incertitude la plus faible. Les deux informations sont néanmoins archivées.

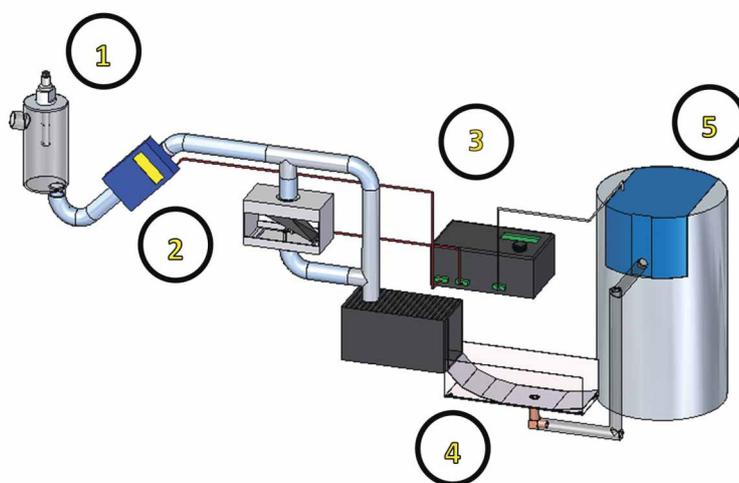


Figure 6. Schéma de principe de l'instrumentation situé dans la chambre de mesure.

Les premières données de débit datent de mai 2016.

Une station météo Campbell est installée sur un bâtiment du campus depuis le 4 novembre 2016 (Bât Coulomb 1) (pluviomètre à auget, température, vitesse du vent...). En pratique, les données de pluviométrie du Grand Lyon (pluviomètre situé au transbordeur) sont utilisées.

Mesures de pollution

④ Les eaux sont ensuite récupérées dans un bac de prélèvement en inox dont la forme a été étudiée pour assurer une bonne mise en suspension de la phase particulaire et plus généralement une bonne homogénéité de la section de prélèvement, et donc des polluants associés, dans le volume d'eau au moment du prélèvement.

Le système de prélèvement : en fonction de la hauteur de pluie attendue et des aléas météorologiques, les eaux sont soit recueillies intégralement dans un bidon de 16 L et la représentativité de l'échantillon est ensuite analysée, soit prélevées proportionnellement au débit par un préleveur portable dans un monoflacon (le plus inerte possible en plastique téflonné). Ce monoflacon recueille une quantité d'eau suffisante pour les analyses des micropolluants et fournit un échantillon dont la concentration est représentative d'une concentration moyenne événementielle.

Le bidon de 16 L est toujours installé pour pallier les problèmes potentiels du préleveur.

Avant les premières campagnes, des blancs de l'ensemble du système de prélèvement ont été réalisés le 15 février 2017.

Entretien du dispositif métrologique

À une fréquence régulière (toutes les semaines)

- Changement de batteries quand il y avait des batteries même en présence du panneau solaire (problématique en hiver)
- Téléchargement manuel de données enregistrées en continu et vérification de mesures
- Nettoyage des sondes de conductivité, de température et du système de débitmétrie (auget, tuyaux)

Avant chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Nettoyage des équipements d'échantillonnage pouvant être en contact avec l'eau (tuyaux, goulotte, bidons et préleveur)
- Téflonnage réguliers des bidons (les tuyaux étant téflonnés de base)
- Mise en place de flacons d'échantillonnage
- Programmation des préleveurs

RETOURS D'EXPÉRIENCES

Problèmes rencontrés et résolutions

- Panneau solaire inadapté (40 W), changement en mai 2017 pour un panneau solaire plus puissant (100 W). Mais insuffisance en automne/ hiver (ombres et rayonnement solaire insuffisant et batteries inadaptées aux températures basses), début 2018, le site est raccordé au secteur.
- Problèmes liés au chantier. Une partie latérale a été ouverte pour le passage d'une chaussée provisoire. Bien que le site expérimental et sa nécessaire « sanctuarisation » aient été signalés à l'entreprise coordonnatrice et au maître d'ouvrage des travaux du campus, les sous-traitants n'en ont pas été informés.
- Débordement du bidon lorsque le préleveur n'a pas fonctionné
- Inondation due à une mauvaise évacuation du surplus d'eau dans le puits de mesure lors d'un orage. Retourneement du préleveur qui a été noyé et endommagé.

Objectifs abandonnés

Aucun

Et si c'était à refaire ?

- Chambre plus grande, alimentée de manière propre au réseau électrique et drainée par le fond ce qui a été amélioré sur les chambres à l'exutoire de la noue et de la tranchée

25 POUR ALLER PLUS LOIN

- Garnier R., Barraud S., Castebrunet H. et Vacherie S. (2016). Mesure d'efficacité des systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales en matière d'abattement de micropolluants et comparaison systèmes à la source / systèmes centralisé : métrologie hydraulique et stratégie de prélèvements. 7^{es} Journées Doctorales de l'hydrologie urbaines, Nantes, 11-12 octobre 2016, 4 p.
- Barraud S., Garnier R. et Castebrunet H. (2020). Rapport de suivis des sites - Efficacités de dispositifs centralisé et décentralisés vis-à-vis du traitement des micropolluants. Livrable L2B. Projet MicroMegas.
- Garnier R. (2020). Systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales : contribution à l'analyse de performances conjointes en matière d'hydrologie quantitative et de piégeage de micropolluants. Comparaison systèmes à la source – système centralisé. Thèse de doctorat de l'Insa de Lyon. 318 p.

10 - Villeurbanne (éco-campus de La Doua)

Noue de l'éco-campus Lyon Tech La Doua

Projet de recherche en appui

MicroMegas

Site

LIEU : éco-campus Lyon Tech La Doua - Villeurbanne (69)

MAÎTRE D'OUVRAGE : Université de Lyon

ÉQUIPES SCIENTIFIQUES : DEEP-INSA, EVS

DATE DE MISE EN SERVICE : été 2013

TYPE BASSIN VERSANT : parking de résidences universitaires

ENVIRONNEMENT : campus

TYPE OUVRAGE : noue



Figure 1. Vue aérienne de l'environnement du site d'étude.

© D.R.



© D.R.



© D.R.

Figure 2. Le site d'étude en hiver et vue de la noue au printemps après plantation.

Schéma fonctionnel

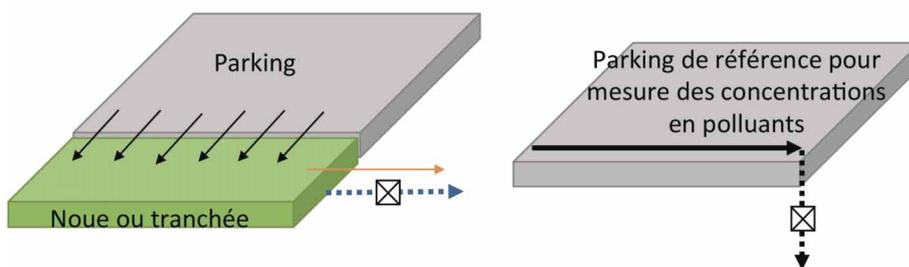


Figure 3. Schéma fonctionnel du site, le système étudié à gauche, la zone de référence pour les eaux brutes à droite.

Bassin versant d'apport

SURFACES : 271,5 m² (parking seul), 30,8 m² d'ouvrage
 COEFFICIENT D'IMPERMÉABILISATION : 45 % (en prenant en compte la surface de noue) et 50 % (sans prise en compte de l'ouvrage)
 COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT : 10 % (pour des pluies < 24 mm)
 PARTICULARITÉS : la surface du parking est revêtue de 136,5 m² de stabilisé et de 135 m² de revêtement en béton bitumineux.

Référence eaux brutes

Méthodologie identique à la CSR (voir fiche 9)

Ouvrage

La noue est tapissée d'une géomembrane étanche sur le fond et les parois, et remblayé avec de la terre végétale (25 % argile, 46 % limons, 29 % sables). Cette noue a été plantée fleurie en 2017 (jachère avec système racinaire superficiel).

Les eaux de ruissellement sont collectées par un drain routier (Ø 160 mm) disposé au fond de la noue, protégé par un géotextile et des galets calibrés. Les eaux collectées sont ensuite acheminées dans un regard, puis dans la chambre de mesure par un tube polyéther polyuréthane pur pour le milieu alimentaire souple de Ø 100 mm placé dans un fourreau de Ø 200 mm correspondant au drain avant réfection (voir problèmes rencontrés).

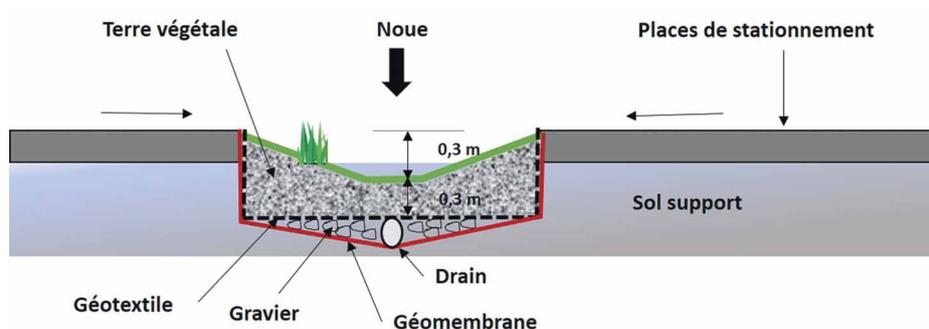


Figure 4 : Coupe transversale de la noue.

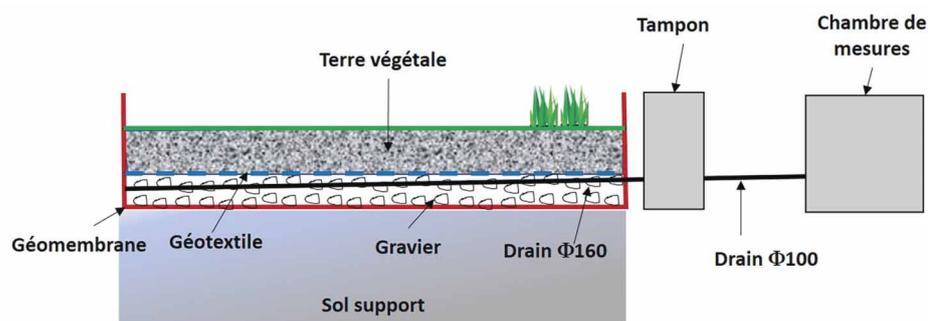


Figure 5. Coupe longitudinale de la noue.

SUIVIS MÉTROLOGIQUES

Objectifs de la mesure

- Mesurer les flux d'eau et de micropolluants en sortie des ouvrages pour comparaison avec un ouvrage centralisé et d'autres ouvrages à la source du campus. Les familles de micropolluants étudiés sont les métaux et métalloïdes, des pesticides, les HAPs, les alkyphénols et dérivés et les PBDE.

Mesures hydriques

Pluie

- Pluviomètre à augets basculants

Bassin versant de référence et sortie du système Parking + noue

L'instrumentation est décrite ci-après.

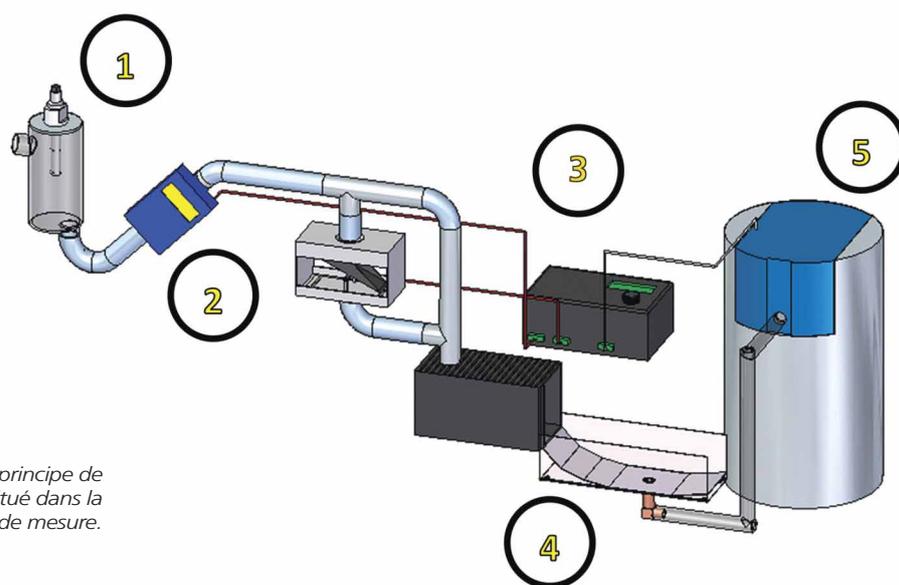


Figure 6 : Schéma de principe de l'instrumentation situé dans la chambre de mesure.

Les effluents de sortie arrivent dans une chambre de mesure où ils sont soumis à différentes mesures décrites, dans l'ordre, ci-après.

- ① Une mesure de conductivité électrique et de température. Les capteurs sont placés dans une cellule cylindrique en PVC.
- ② Une mesure de débit par un double débitmètre - débitmètre électromagnétique (EM) + débitmètre massique à auget (20 g). Les petits débits de la gamme [0 ; 100 L/h] sont mesurés par le débitmètre à auget tandis que le mesurage des débits plus importants de la gamme [75 ; 2 000 L/h] est assuré par le débitmètre EM. Le mesurage de l'un comme de l'autre est une valeur moyennée de l'ensemble des débits sur le pas de temps de mesure (2 min).
- ③ Une centrale d'acquisition recueille en continu et au pas de temps de 2 minutes les données des débitmètres, du conductimètre et de la sonde de température. Les deux signaux issus des débitmètres subissent un traitement en ligne pour ne fournir en fin de compte qu'un seul débit présentant l'incertitude la plus faible. Les deux informations débitométriques sont néanmoins archivées.

Mesures de pollution

- ④ Les eaux sont ensuite récupérées dans un bac de prélèvement en inox dont la forme a été étudiée pour assurer un bon mélange des polluants dans le volume d'eau au moment du prélèvement.

Le système de prélèvement : en fonction de la hauteur de pluie attendue et des aléas météorologiques, les eaux sont soit recueillies intégralement dans un bidon de 16 L et la représentativité de l'échantillon est ensuite analysée, soit prélevées proportionnellement au débit par un préleveur portable dans un monoflacon (le plus inerte possible en plastique téflonné). Ce monoflacon recueille une quantité d'eau suffisante pour les analyses des micropolluants et fournit un échantillon dont la concentration est représentative d'une concentration moyenne événementielle.

Le bidon de 16 L est toujours installé pour pallier les problèmes potentiels du préleveur. Avant les premières campagnes, des blancs de l'ensemble du système de prélèvement ont été réalisés le 15 février 2017.

Entretien du dispositif métrologique

À une fréquence régulière (toutes les semaines)

- Téléchargement manuel de données enregistrées en continu et vérification de mesures
- Nettoyage des sondes de conductivité et température et du système de débitmétrie (auget, tuyaux)

Avant chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Nettoyage des équipements d'échantillonnage pouvant être en contact avec l'eau (tuyaux, goulotte, bidons et préleveur)
- Téflonnage réguliers des bidons (les tuyaux étant téflonnés de base)
- Mise en place de flacons d'échantillonnage
- Programmation des préleveurs
- Pour la noue d'apport (évaluation du coefficient volumétrique de ruissellement), nettoyage des caniveaux collecteurs

Problèmes rencontrés et résolutions

■ Problèmes de réalisation. L'entreprise d'exécution a implanté un regard inutile entre la chambre de mesure et l'exutoire de la noue. Comme la connexion des tuyaux dans le regard était défectueuse (mauvaise étanchéité), tout le dispositif de connexion a été refait



Figure 7. Connexion refaite dans le regard.

- L'arrivée des eaux dans la chambre a été implantée au bas de la chambre. Il a donc fallu creuser pour installer le dispositif de mesure et le préleveur
- Un des butoirs en bois a été défoncé arrachant la géomembrane qui a dû être réparée
- Géomembrane non soudée en des points particuliers solidarissant deux parties par simple pression
- Drain posé sans soin

Figure 8. Basculement du madrier servant de butoir pour le parking



Objectifs abandonnés

Il était prévu au départ d'étudier la performance de la noue. Pour évaluer son efficacité et son comportement vis-à-vis des flux d'eau et de micropolluants il aurait été nécessaire de faire des mesures entrée/sortie de la noue. Or ce n'était pas possible car toute interception des eaux en entrée aurait faussé les quantités en sortie qui sont déjà statistiquement assez faibles.

Il avait alors été envisagé de réaliser des mesures en entrée sur un parking contigu exactement de même composition que celui du parking drainé par la noue (une partie en stabilisé et une partie en BB).

Nous l'avons fait pour estimer les conditions de ruissellement du parking (coefficient de ruissellement, pertes initiales).

Les eaux du parking sont collectées par des caniveaux tout autour de la « noue dite d'apport ». Cependant, le dispositif se colmate souvent (feuilles mortes, débris, encrassement très rapide des grilles...) et demande donc un entretien lourd. Dans ces conditions peu de mesures sont fiables.

Ce dispositif fonctionne pour la description du bassin versant réel alimentant la noue mais n'est pas utilisé pour la mesure des concentrations en micropolluants ni des flux d'eau en entrée de noue.



Figure 9. Système de mesure permettant d'évaluer les débits et volumes d'eau en entrée des systèmes drainés par la noue et la tranchée. a) montre la localisation et la similitude du site de référence, b) montre la noue de référence avec installation à la périphérie des caniveaux, c) et d) la connexion des caniveaux au système de mesure (double mesure 1/par auget basculant et 2/par mesure électromagnétique).

Le dispositif évalué n'est donc pas la noue mais le système parking + noue.

La deuxième raison qui a conduit à prendre pour référence un parking traditionnel est que l'on a cherché à harmoniser les comparaisons entre les différents dispositifs étudiés (système muni d'une noue, d'une tranchée et chaussée à structure réservoir).

Et si c'était à refaire ?

Nous choisirions un site plus traditionnel encore (parking en BB) se déversant dans la noue. Ceci dit, le dispositif parking partiellement formé de stabilisé est une solution assez répandue sur la métropole.

Nécessité d'assister à toutes les étapes du chantier

26 POUR ALLER PLUS LOIN

- Garnier R., Barraud S., Castebrunet H. et Vacherie S. (2016). Mesure d'efficacité des systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales en matière d'abattement de micropolluants et comparaison systèmes à la source / systèmes centralisés : métrologie hydraulique et stratégie de prélèvements. 7^{es} Journées Doctorales de l'hydrologie urbaines, Nantes, 11-12 octobre 2016, 4 p.
- Barraud S., Garnier R. et Castebrunet H. (2020). Rapport de suivis des sites - Efficacités de dispositifs centralisés et décentralisés vis-à-vis du traitement des micropolluants. Livrable L2B. Projet MicroMegs.
- Garnier R. (2020). Systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales : contribution à l'analyse de performances conjointes en matière d'hydrologie quantitative et de piégeage de micropolluants. Comparaison systèmes à la source – système centralisé. Thèse de doctorat de l'Insa de Lyon. 318 p.

11 - Villeurbanne (éco-campus de La Doua) - Tranchée drainante de l'éco-campus Lyon Tech La Doua

Projet de recherche en appui

MicroMegas

Site

LIEU : éco-campus Lyon Tech La Doua - Villeurbanne (69)

MAÎTRE D'OUVRAGE : Université de Lyon

ÉQUIPES SCIENTIFIQUES : DEEP-INSA, EVS

DATE DE MISE EN SERVICE : été 2013

TYPE BASSIN VERSANT : parking de résidences universitaires

ENVIRONNEMENT : campus

TYPE OUVRAGE : tranchée



Figure 1. Vue aérienne de l'environnement du site d'étude.

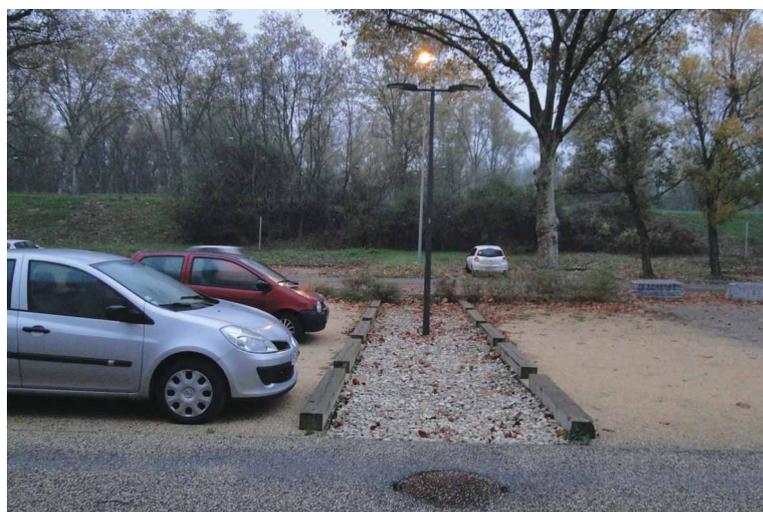


Figure 2. Le site d'étude.

Schéma fonctionnel

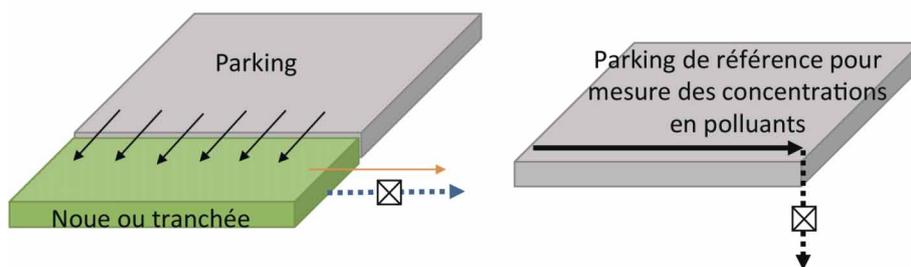


Figure 3. Schéma fonctionnel du site, le système étudié à gauche, la zone de référence pour les eaux brutes à droite.

Bassin versant d'apport

SURFACES : 234,1 m² (parking), 26 m² d'ouvrage

COEFFICIENT D'IMPERMÉABILISATION : 46,4 % (en prenant en compte la surface de noue) et 48,5 % (sans prise en compte de l'ouvrage)

COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT : 10 % (pour des pluies < 24 mm)

PARTICULARITÉS : la surface du parking est revêtue de 111,5 m² de stabilisé et de 122,6 m² de revêtement en béton bitumineux.

Référence eaux brutes

Méthodologie identique à la CSR (voir fiche 9)

Ouvrage

La tranchée drainante, constituée de graves, est tapissée d'une géomembrane étanche sur le fond et les parois, et remblayée avec de la grave (50 % de vide).

Les eaux de ruissellement sont collectées par un drain routier (Ø 160 mm) disposé au fond, protégé par un géotextile et des galets calibrés. Les eaux collectées sont ensuite acheminées dans un regard, puis dans la chambre de mesure par un tube polyéther polyuréthane pur pour le milieu alimentaire souple de Ø 100 mm placé dans un fourreau de Ø 200 mm correspondant au drain avant réfection (voir problèmes rencontrés).

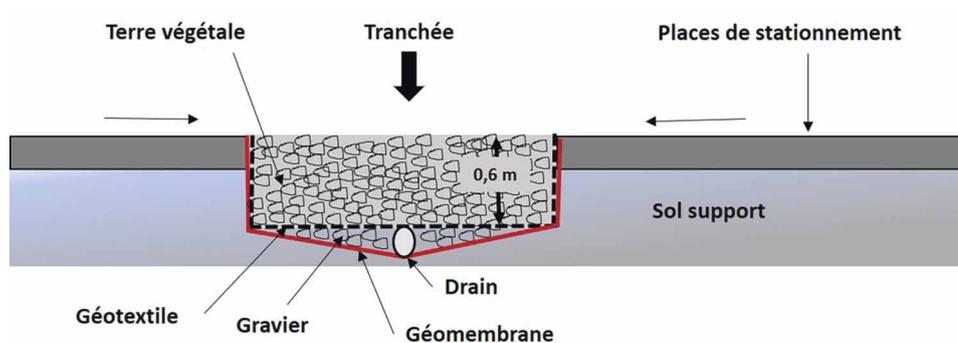


Figure 4. Coupe transversale de la tranchée.

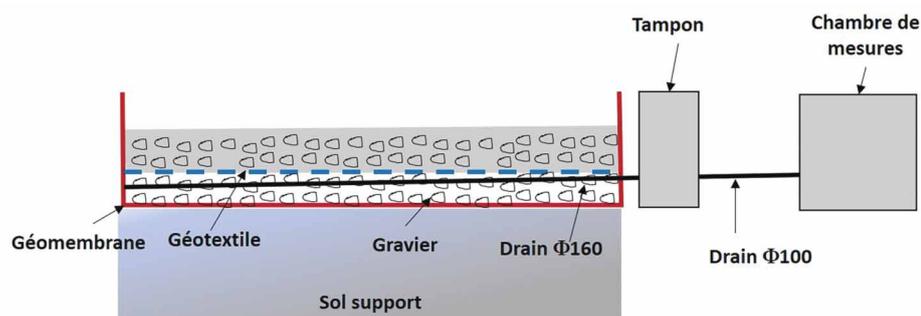


Figure 5. Coupe longitudinale de la tranchée.

SUIVIS MÉTROLOGIQUES

Objectifs de la mesure

► Mesurer les flux d'eau et de micropolluants en sortie des ouvrages pour comparaison avec un ouvrage centralisé et d'autres ouvrages à la source du campus. Les familles de micropolluants étudiés sont les métaux et métalloïdes, des pesticides, les HAPs, les alkyphénols et dérivés et les PBDE.

Mesures hydriques

Pluie

■ Pluviomètre à augets basculants

Bassin versant de référence et sortie du système Parking + noue

L'instrumentation est décrite ci-après.

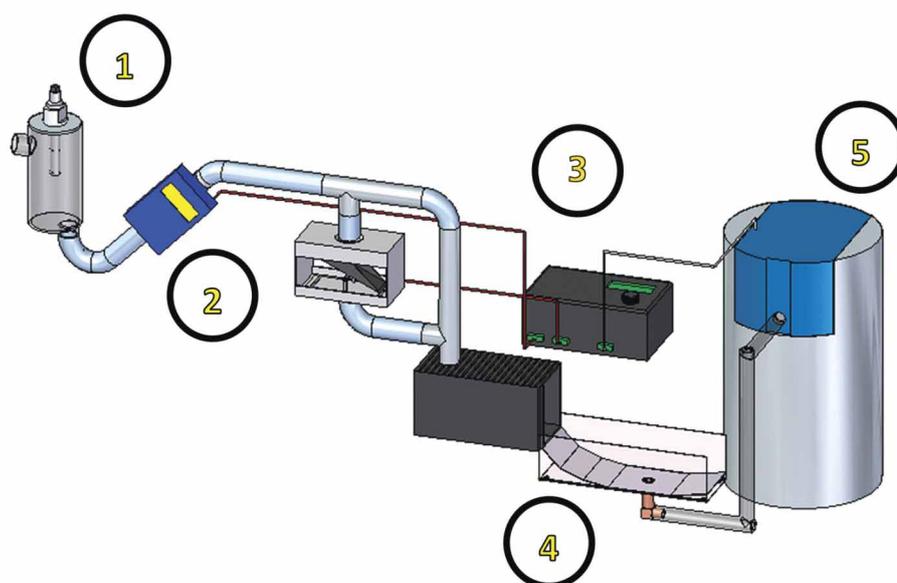


Figure 6 : Schéma de principe de l'instrumentation situé dans la chambre de mesure.

Les effluents de sortie arrivent dans une chambre de mesure où ils sont soumis à différentes mesures décrites, dans l'ordre, ci-après.

- ① Une mesure de conductivité électrique et de température. Les capteurs sont placés dans une cellule cylindrique en PVC.
- ② Une mesure de débit par un double débitmètre - débitmètre électromagnétique (EM) + débitmètre massique à auget (20 g). Les petits débits de la gamme [0 ; 100 L/h] sont mesurés par le débitmètre à auget tandis que le mesurage des débits plus importants de la gamme [75 ; 2 000 L/h] est assuré par le débitmètre EM. Le mesurage de l'un comme de l'autre est une valeur moyennée de l'ensemble des débits sur le pas de temps de mesure (2 min).
- ③ Une centrale d'acquisition recueille en continu et au pas de temps de 2 minutes les données des débitmètres, du conductimètre et de la sonde de température. Les deux signaux issus des débitmètres subissent un traitement en ligne pour ne fournir en fin de compte qu'un seul débit présentant l'incertitude la plus faible. Les deux informations débitométriques sont néanmoins archivées.

Mesures de pollution

- ④ Les eaux sont ensuite récupérées dans un bac de prélèvement en inox dont la forme a été étudiée pour assurer une bonne mise en suspension de la phase particulaire et plus généralement une bonne homogénéité de la section de prélèvement dans le volume d'eau au moment du prélèvement.

Le système de prélèvement : en fonction de la hauteur de pluie attendue et des aléas météorologiques, les eaux sont soit recueillies intégralement dans un bidon de 16 L et la représentativité de l'échantillon est ensuite analysée, soit prélevées proportionnellement au débit par un préleveur portable dans un monoflacon (le plus inerte possible en plastique téflonné). Ce monoflacon recueille une quantité d'eau suffisante pour les analyses des micropolluants et fournit un échantillon dont la concentration est représentative d'une concentration moyenne événementielle.

Le bidon de 16 L est toujours installé pour pallier les problèmes potentiels du préleveur.

Avant les premières campagnes, des blancs de l'ensemble du système de prélèvement ont été réalisés le 15 février 2017.

Entretien du dispositif métrologique

À une fréquence régulière (toutes les semaines)

- Téléchargement manuel de données enregistrées en continu et vérification de mesures
- Nettoyage des sondes de conductivité et température et du système de débitmétrie (auget, tuyaux)

Avant chaque campagne d'échantillonnage d'eau

- Nettoyage des équipements d'échantillonnage pouvant être en contact avec l'eau (tuyaux, goulotte, bidons et préleveur)
- Téflonnage réguliers des bidons (les tuyaux étant téflonnés de base)
- Mise en place de flacons d'échantillonnage
- Programmation des préleveurs
- Pour la noue d'apport (évaluation du coefficient volumétrique de ruissellement) nettoyage des caniveaux collecteurs

Problèmes rencontrés et résolutions

■ Problèmes de réalisation. L'entreprise d'exécution a implanté un regard inutile entre la chambre de mesure et l'exutoire de la tranchée. Comme la connexion des tuyaux dans le regard était défectueuse (mauvaise étanchéité), tout le dispositif de connexion a été refait.



Figure 7. Connexion refaite dans le regard.

- L'arrivée des eaux dans la chambre a été implantée au bas de la chambre. Il a donc fallu creuser pour installer le dispositif de mesure et le préleveur
- Géomembrane non soudée en des points particuliers solidarissant deux parties par simple pression
- Drain posé sans soin présentant un point haut au milieu de la tranchée repéré par géoradar

Objectifs abandonnés

Il était prévu au départ d'étudier la performance de la noue. Pour évaluer son efficacité et son comportement vis-à-vis des flux d'eau et de micropolluants il aurait été nécessaire de faire des mesures entrée/sortie de la noue. Or ce n'était pas possible car toute interception des eaux en entrée aurait faussé les quantités en sortie qui sont déjà statistiquement assez faibles.

Il avait alors été envisagé de réaliser des mesures en entrée sur un parking contigu exactement de même composition que celui du parking drainé par la noue (une partie en stabilisé et une partie en BB).

Nous l'avons fait pour estimer les conditions de ruissellement du parking (coefficient de ruissellement, pertes initiales).

Les eaux du parking sont collectées par des caniveaux tout autour de la « noue dite d'apport ». Cependant, le dispositif se colmate souvent (feuilles mortes, débris, encrassement très rapide des grilles...) et demande donc un entretien lourd. Dans ces conditions peu de mesures sont fiables.

Ce dispositif fonctionne pour la description du bassin versant réel alimentant la noue mais n'est pas utilisé pour la mesure des concentrations en micropolluants ni des flux d'eau en entrée de noue.



Figure 9. Système de mesure permettant d'évaluer les débits et volumes d'eau en entrée des systèmes drainés par la noue et la tranchée. a) montre la localisation et la similitude du site de référence, b) montre la noue de référence avec installation à la périphérie des caniveaux, c) et d) la connexion des caniveaux au système de mesure (double mesure 1/par auget basculant et 2/par mesure électromagnétique).

Le dispositif évalué n'est donc pas la noue mais le système parking + noue.

La deuxième raison qui a conduit à prendre pour référence un parking traditionnel est que l'on a cherché à harmoniser les comparaisons entre les différents dispositifs étudiés (système muni d'une noue, d'une tranchée et chaussée à structure réservoir).

Et si c'était à refaire ?

Nous choisirions un site plus traditionnel encore (parking en BB) se déversant dans la noue. Ceci dit le dispositif parking partiellement formé de stabilisé est une solution assez répandue sur la métropole.

27 POUR ALLER PLUS LOIN

- Garnier R., Barraud S., Castebrunet H. et Vacherie S. (2016). Mesure d'efficacité des systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales en matière d'abattement de micropolluants et comparaison systèmes à la source / systèmes centralisé : métrologie hydraulique et stratégie de prélèvements. 7^{es} Journées Doctorales de l'hydrologie urbaines, Nantes, 11-12 octobre 2016, 4 p.
- Barraud S., Garnier R. et Castebrunet H. (2020). Rapport de suivis des sites - Efficacités de dispositifs centralisé et décentralisés vis-à-vis du traitement des micropolluants. Livrable L2B. Projet MicroMegs.
- Garnier R. (2020). Systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales : contribution à l'analyse de performances conjointes en matière d'hydrologie quantitative et de piégeage de micropolluants. Comparaison systèmes à la source – système centralisé. Thèse de doctorat de l'Insa de Lyon. 318 p.



Glossaire

- **Analyse fonctionnelle** : caractérisation des fonctions d'un ouvrage (produit) en fonction des enjeux (besoins).
- **Anthrosols** : sols fortement modifiés ou fabriqués par l'homme.
- **Bassin versant d'apport (BVa)** : bassin versant extérieur alimentant l'ouvrage.
- **Bassin versant total (BVt)** : bassin versant alimentant un ouvrage, y compris sa propre surface.
- **CSR** : chaussée à structure réservoir.
- **Concentration moyenne événementielle (CME)** : concentration moyenne d'un polluant pondérée au volume au cours d'un événement pluvieux.
- **Dispositif de contrôle à la source des eaux pluviales** : ouvrage ou ensemble d'ouvrages « pris » dans leurs différents « environnements » technique et professionnel, juridique, politique, social et urbain.
- **Dispositif d'observation** : ensemble de moyens mis en place afin d'acquérir les données nécessaires pour évaluer la performance d'un ouvrage.
- **Enjeu** : problématique environnementale et/ou sociétale à laquelle un ouvrage de gestion des eaux pluviales répond.
- **Fonction de contrainte** : fonction assurée par l'ouvrage mais qui n'est pas sa raison d'être.
- **Fonction de service** : action attendue d'un ouvrage pour répondre à un enjeu.
- **Fonction d'usage** : objectif principal de l'ouvrage pour lequel il a été conçu.
- **Indicateur de performance** : représentation synthétique d'informations permettant la communication, l'évaluation et/ou la prise de décision ayant une tendance par rapport à une fonction de service d'un ouvrage.
- **Indicateur de performance hydrologique** : indicateur décrivant la capacité d'un ouvrage de gestion des eaux pluviales à assurer une fonction relative aux flux d'eau.
- **Indicateur de performance polluant** : indicateur décrivant la capacité d'un ouvrage de gestion des eaux pluviales à assurer une fonction relative aux flux de polluants.
- **Indicateur de performance socio-technique** : indicateur décrivant la capacité d'un dispositif socio-technique à assurer une fonction à l'interface ouvrage-homme.

- **Indicateur descriptif** : indicateur qui permet de décrire le fonctionnement de l'ouvrage, dans l'objectif de comparer le fonctionnement de différents ouvrages ou types d'aménagement entre eux.
- **Indicateur explicatif** : indicateur qui décrit un aspect du fonctionnement qui pourrait expliquer une performance observée.
- **Indicateur normatif** : indicateur de performance qui compare une grandeur à une valeur considérée comme acceptable.
- **Indicateur relatif** : indicateur de performance qui compare la valeur d'une grandeur après ou avec l'effet de l'ouvrage à la valeur de cette grandeur avant ou sans l'effet de l'ouvrage.
- **Mésusage** : désigne une interaction avec l'ouvrage qui, en raison de l'utilisation qu'en fait l'utilisateur, conduit à une dégradation de son fonctionnement hydrologique et plus globalement de ses fonctions techniques.
- **Milieu récepteur** : environnement naturel dans lesquels un flux est rejeté.
- **Milieu construit** : environnement anthropisé, comprenant notamment les bâtiments et les infrastructures.
- **NQE** : norme de qualité environnementale.
- **Ouvrage de gestion/contrôle à la source des eaux pluviales (OGA)** : désigne l'ensemble des éléments techniques qui concourent à un effet recherché sur la régulation des quantités ou de la qualité des eaux pluviales.
- **Pratique** : utilisation plus large d'un objet de ce qui était attendu, parfois insolite de l'objet pouvant être imprévue, détournée, ajoutant des fonctions à l'objet. Certaines pratiques, seront qualifiées de « déqualifiantes » lorsqu'elles engendrent des externalités négatives (dégâts physiques sur le dispositif technique, mauvaise réputation...).
- **Projet d'aménagement** : désigne un élément du projet urbain dans lequel doit être intégré un dispositif de gestion à la source des eaux pluviales : une voirie, un équipement public, un ensemble de logements, un projet (de développement urbain) plus global (du type Zone d'Aménagement Concertée – ZAC- ou écoquartier) dans lequel s'inscrit le projet d'aménagement. Les projets d'aménagement et leur(s) dispositif(s) de gestion à la source des eaux pluviales correspondent à un espace « affecté » - au sens de la planification urbaine - mais peuvent être amenés à remplir différentes fonctions dans le projet urbain. À l'échelle du projet urbain, une infrastructure routière n'aura bien évidemment pas les mêmes fonctions si elle permet de desservir des zones d'habitations ou des zones d'activités ou commerciales.
- **Usage** : utilisation simple, commune de l'objet correspondant à la fois aux normes sociales admises et aux fonctions attendues par les fabricants.



Citation

Flanagan K. (coord.), Barraud S., Gromaire M.C. et Rodriguez F. 2022. *Guide méthodologique pour l'évaluation de performances des ouvrages de maîtrise à la source des eaux pluviales* - Groupe de Liaison Inter-Projets : Matriochkas, MicroMegas, Roulépur. Office français de la biodiversité, collection Guides et protocoles, 164 pages.

Édition

Béatrice Gentil-Salasc

Création et mises en forme graphiques

Béatrice Saurel - saurelb@free.fr

Gratuit

Dépôt légal à parution

ISSN print : 2607-1312

ISBN web-pdf : 978-2-38170-124-0

ISBN print : 978-2-38170-125-7

Impression

Cloître

Imprimé sur du papier issu de sources responsables

© OFB, septembre 2022

L'évaluation de performances des ouvrages de maîtrise à la source des eaux pluviales : une démarche complexe mais pertinente pour les acteurs de la gestion des eaux pluviales

Dans le contexte actuel de changements multiples (perturbation climatique, urbanisation continue, densification) impactant le fonctionnement hydrologique mais aussi la qualité des environnements urbains, la gestion des eaux pluviales intégrée à l'urbanisme et au plus près de sa source est devenue un enjeu majeur de développement d'une ville durable, résiliente et viable pour ses habitants.

Les ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales sont plurifonctionnels, et les acteurs en charge de la gestion des eaux sont en attente d'outils méthodologiques leur permettant de concevoir et gérer ces ouvrages, et d'évaluer leur performance. Pour cela, il faut pouvoir définir des indicateurs adaptés, qui peuvent être liés à différents enjeux auxquels les ouvrages peuvent répondre, ainsi qu'aux différentes fonctions de service qu'ils peuvent assurer pour répondre à ces enjeux.

Ce guide propose des éléments méthodologiques pour mettre en œuvre l'évaluation des performances de ces ouvrages. Il est destiné aux maîtres d'ouvrage ayant en charge la gestion d'un parc d'ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales, des organismes mettant en œuvre des études de suivis d'ouvrages (bureaux d'études), ainsi que des organismes prescripteurs de suivis tels que les polices de l'eau ou financeurs de suivis comme les agences de l'eau. Ce guide est le fruit d'un travail commun réunissant des chercheurs et des acteurs opérationnels de la gestion de l'eau au sein de trois projets de recherche (Matriochkas, MicroMegas et Roulépur) financés dans le cadre de l'appel à projet « Innovations et changements de pratiques : lutte contre les micropolluants des eaux urbaines » de l'Office français de la biodiversité et des agences de l'eau (notamment Loire Bretagne, Rhône Méditerranée Corse et Seine Normandie pour les trois projets).

Le guide présente une démarche destinée à l'évaluation des performances des ouvrages. Elle est basée sur un inventaire des 6 enjeux auxquels les ouvrages de gestion à la source peuvent répondre, ainsi que des 21 fonctions de services associées. Le guide propose une quarantaine d'indicateurs regroupés en 3 catégories, les fonctions hydrologiques (relatives aux flux d'eau), les fonctions relatives aux polluants et les fonctions de gestion ou socio-techniques. Ces indicateurs font l'objet d'une fiche détaillée permettant son estimation. Des exemples d'application de ces indicateurs sont présentés ; ils sont basés sur les retours d'expérience issus des ouvrages investigués dans le cadre des projets Matriochkas, MicroMegas et Roulépur, situés en milieu urbain ou routier dans l'agglomération nantaise, la métropole de Lyon et la région parisienne. Ces ouvrages et l'instrumentation mise en œuvre pour évaluer leur performance sont décrits en détail dans cette publication.

