

Mesurer l'efficacité des techniques alternatives pour la maîtrise des flux polluants: un challenge métrologique. Le cas de quatre dispositifs innovants suivis dans le cadre du projet ROULÉPUR

Evaluating the efficiency of SUDS for pollutant management: a metrological challenge. The case of four innovative devices investigated by the ROULÉPUR project

David Ramier¹ ; Emilie Caupos² ; Philippe Branchu¹ ; Philippe Dubois³ ; Kelsey Flanagan³ ; Pierre Georgel⁴ ; Pascale Neveu⁵ ; Julien Paupardin⁶ ; Tina Ratovelomanana⁷ ; Mohamed Saad³ ; Martin Seidl³ ; Eric Thomas⁷ ; Jean-Yves Viau⁸ et Marie-Christine Gromaire³

¹ Cerema, Dter IDF, Trappes, France. david.ramier@cerema.fr. ² LEESU, Université Paris-Est – École des Ponts Paris-Tech, Créteil Cedex, France. emilie.caupos@u-pec.fr. ³ LEESU, Université de Paris-Est – École des Ponts Paris-Tech, Marne-la-Vallée, France. gromaire@leesu.fr. ⁵ écovégétal, les grands près, 28410 Broué, France. pgeorgel@ecovegetal.fr. ⁵ Direction de la Propreté et de l'Eau, Paris, France. pascale.neveu@paris.fr. ⁶ Direction de l'Eau et de l'Assainissement, Rosny-sous-Bois, France. julien.paupardin@cq93.fr. ⁷ Agence routière territoriale de Melun, Vert-Saint-Denis, France. eric.thomas@departement77.fr. ⁸ Saint Dizier Environnement, rue Gay Lussac Z.I, 59147 Gondecourt, France. jyviau@saintdizierenvironnement.fr.

RÉSUMÉ

Les eaux de voiries et parkings sont constituées d'une matrice complexe de micropolluants d'origines multiples (émissions liées au trafic et à l'environnement urbain – chauffage, usure du mobilier urbain, des bâtiments...), qui contribuent à la dégradation des milieux aquatiques lorsqu'elles ne sont pas traitées avant rejet. Diverses solutions techniques existent pour la maîtrise, voire un traitement à la source de ces flux polluants. Leur efficacité en termes d'abattement des micropolluants demande cependant à être évaluée in-situ. Dans le cadre du projet Roulépur, quatre solutions innovantes de maîtrise à la source des flux de micropolluants générés par le ruissellement sur les voiries urbaines sont testées. Ces quatre solutions sont : i) un dispositif compact de décantation/filtration/adsorption, le STOPPOL[®] 10CKF de Saint Dizier Environnement, ii) des filtres plantés horizontaux non infiltrants, iii) des bandes enherbées et des fossés filtrants/infiltrants et iv) un parking perméable végétalisé Ecovégétal. L'évaluation de ces solutions nécessite des mesures combinées, de quantité et qualité des eaux, en entrée et en sortie de chaque dispositif, et ce pour des périodes de temps au moins annuelles. La nécessité d'avoir des mesures en continu et comparables entre les différentes solutions dans des environnements contraints complique la mise en œuvre de l'instrumentation. L'objectif de cette communication est de présenter les difficultés liées à cette instrumentation et les solutions envisagées.

ABSTRACT

Urban water is composed of a complex matrix of micropollutants produced by traffic and contributes to the degradation of the aquatic bodies without treatment before discharge to the environment. Various solutions are available to manage or treat these pollutants fluxes. However, an in-situ evaluation of the efficiency of these solutions is still necessary. Within the framework of the ROULÉPUR project, four innovative source control solutions for the micropollutant loads stemming from runoff on urban streets are tested. These solutions are: i) a compact decantation/filtration/adsorption device, the STOPPOL[®] 10CKF, Saint Dizier Environnement, ii) non-infiltrating stormwater biofilters, iii) vegetative filter strips and biofiltration/infiltration swales and iv) a vegetative pervious parking lot. Assessment of performance of these solutions requires measurement of both, quality and quantity of water at the inlet and outlet of each device over a period of at least one year. Continuous measurements that are also comparable between devices are quite difficult to achieve in an urban environment. This paper aims to present difficulties encountered and solutions in order to have accurate measurement for the four devices.

MOTS CLÉS

Qualité des eaux pluviales, traitements innovants, métrologie innovante, ruissellement, gestion à la source

1 INTRODUCTION

La contamination en métaux et hydrocarbures des eaux de ruissellement des surfaces imperméables, est reconnue, mais ces eaux sont susceptibles de véhiculer une palette bien plus large de micropolluants (retardateurs de flammes, surfactants, plastifiants, antioxydants ...) dont les effets toxiques potentiels sur les milieux aquatiques récepteurs sont insuffisamment documentés à ce jour (Tang *et al.*, 2013). Les stratégies de gestion « à moindre impact » des eaux pluviales, basées sur la maîtrise des flux d'eau et de contaminants dès l'origine du ruissellement sont actuellement promues tant par la communauté scientifique internationale (Freni *et al.*, 2010) que par certains acteurs publics (AESN, 2013). Cependant le choix de la solution de gestion va dépendre de la nature de l'effluent (concentration, nature et forme des micropolluants) mais également de l'environnement dans lequel elle s'insère (espace foncier disponible, nature du sous-sol...). Ainsi, des solutions innovantes de rétention/dépollution des eaux de ruissellement à la source avec différents niveaux de technicité et d'industrialisation ont été développées ces dernières années. Le projet ROULÉPUR ambitionne d'évaluer et comparer quatre solutions innovantes. Cette évaluation nécessite des mesures de flux d'eau et de polluants, en entrée et en sortie de ces solutions et la comparaison implique d'avoir des méthodes de prélèvements et mesures similaires entre les quatre sites. Cela représente un défi important dans le cas de ces solutions présentant des niveaux de développement et des environnements différents. Cette communication propose de présenter et discuter les difficultés rencontrées et les solutions mises en œuvre pour relever ce défi. Les solutions innovantes et les objectifs d'observation seront d'abord décrits. Les solutions choisies seront ensuite présentées et discutées.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 Les solutions innovantes

2.1.1 Le STOPPOL®

Le STOPPOL®, développé par St Dizier Environnement, est un dispositif compact qui permet le traitement décentralisé des eaux de ruissellement, notamment les eaux de ruissellement de voirie. Dans sa version 10CKF, les fonctions utilisées sont le dégrillage, la décantation et la filtration par absorption et adsorption sur un filtre. Pour notre étude, ce dispositif est utilisé pour le traitement des eaux de ruissellement de 1040 m² de chaussée à très forte circulation (voie sur berge) située à Paris (France) avant leur rejet dans la rivière Seine (Figure 1).

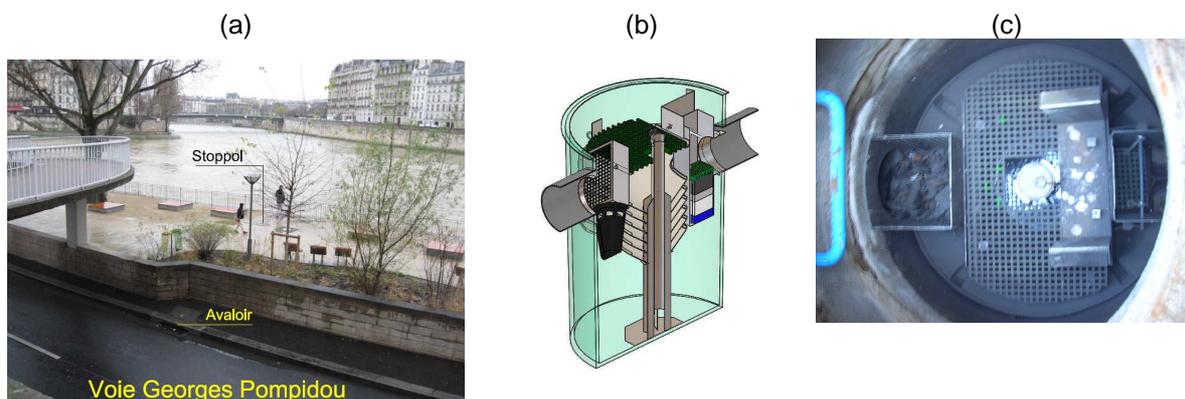


Figure 1 : (a) plan de situation du dispositif, (b) coupe de principe du STOPPOL® (St Dizier environnement), (c) vue du dessus du STOPPOL® en place.

2.1.2 Filtres plantés horizontaux

Les filtres plantés horizontaux se trouvent sur la commune de Rosny-sous-Bois (département de Seine-Saint-Denis), à l'est de Paris. Ils sont composés de trois bassins carrés (4,20 x 4,20 m, Figure 2). Ces trois bassins sont constitués d'un substrat de différentes granulométries (gravier, sable grossier, sable fin, gravillon). Au-dessus de ce substrat se trouve 30 cm de terre végétale, support de la végétation (*Carex muskingumensis*, *Panicum virgatum*, *Calamagrostis acutiflora* Overdam, *Imperata cylindrica* Red Baron). Un stockage en surface est également possible. Ces filtres sont alimentés par le ruissellement sur un bassin versant de 3410 m².

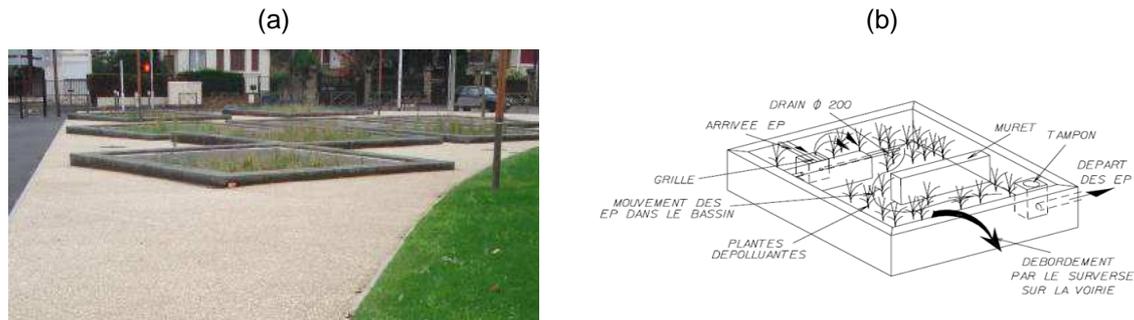


Figure 2 : (a) vue d'ensemble des trois filtres plantés horizontaux, (b) schéma de principe des bassins (DEA 93).

2.1.3 Bandes enherbées et fossés filtrants et infiltrants

Ce dispositif est mis en place pour le traitement des eaux de ruissellement d'une chaussée constituée de deux voies de circulation. Il est situé près de l'aéroport Charles de Gaulle, sur la commune de Compans, au Nord-Est de Paris (département de Seine-et-Marne). Un accotement et un fossé (Figure 3 (a)) sont divisés en trois différents biefs. Chacun de ces biefs a une longueur de 50 m et collecte entre 500 et 1000 m² de surface de chaussée. Le premier (Figure 3 (b)) est surmonté d'une bande enherbée de 1,95 m de large inclinée à 8% (accotement) suivie d'une pente à 66% de 1,10 m de large et d'un fossé de 40 cm de large. Ce dispositif permet simplement l'infiltration de l'eau dans le sol. La végétation de la bande enherbée et du fossé est une végétation spontanée. Le deuxième bief (Figure 3 (c)) est conçu de la même manière mais le fond du fossé est composé d'un matériau filtrant planté d'hélophytes. Enfin le troisième bief (Figure 3 (d)) reprend les éléments des deux autres mais la bande enherbée et le fossé sont tous les deux constitués d'un matériau filtrant et sont drainés par une nappe drainante. De plus, la bande enherbée est plantée d'un mélange spécifique composé pour 20% d'espèces hyper accumulatrices et le fossé est planté d'hélophytes.

2.1.4 Parking perméable végétalisé

Le parking perméable végétalisé est développé par la société ecovégétal. Il est situé à Villeneuve-le-Roi (département du Val-de-Marne, Figure 4 (a)), à 20 km au sud de Paris, à proximité de l'aéroport d'Orly et a une surface de 1278 m². Le parking est actuellement mis en œuvre avec la solution ecovégétal® Mousses (Figure 4 (b)). Elle est composée en surface d'un module en PEBD (module ECORASTER®) rempli d'un substrat minéral (terres cuites recyclées...) et d'un mélange de végétation extensive (thym serpolet, mousses, sédums, graminées alpines et trèfle blanc). Ce module est posé sur 3 cm du même substrat minéral. La fondation du système est composée de 20 cm de grave drainante compactée et une sous-fondation comprenant 10 à 40 cm de grave drainante. Cet ensemble est séparé du fond de forme par un géotextile au niveau duquel un drain permet d'évacuer l'excédent d'eau.

2.2 Objectifs et contraintes d'observations

2.2.1 Objectifs

L'objectif du suivi de ces différents sites est d'évaluer leur capacité à abattre les flux de micropolluants générés par la voirie, son utilisation et son environnement proche. Le choix des micropolluants à analyser dans les eaux pluviales s'est porté sur les composés suivants : hydrocarbures, alkylphénol, phtalates, HAP, Métaux, MES, COD, COP, azote kjeldhal, ammonium, nitrates, phosphate, phosphore total, en s'intéressant à la fois aux phases dissoutes et particulaires. La mesure de la concentration et des flux de micropolluants implique donc de réaliser des prélèvements d'eau et de mesurer les débits d'eau passant à travers ces systèmes. L'estimation correcte du fonctionnement de ces systèmes implique : i) d'observer et de faire des mesures même pour les événements courants (Gromaire-Mertz *et al.*, 1998 ; Nehls *et al.*, 2011) ; ii) de faire des mesures, quantitative (débits d'eau) et qualitative (prélèvement d'eau), à l'amont et à l'aval des dispositifs. Sur la base des pluies de période de retour

annuelle observées à Paris et en considérant un temps de concentration assez rapide, ce qui est souvent le cas pour les surfaces urbaines imperméabilisées, l'intensité des pluies à observer peut atteindre $80 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Ainsi, pour ces surfaces, la gamme des débits à mesurer peut donc varier entre 0 et $200 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{ha}^{-1}$ (hypothèse d'un coefficient de ruissellement de 0,9).

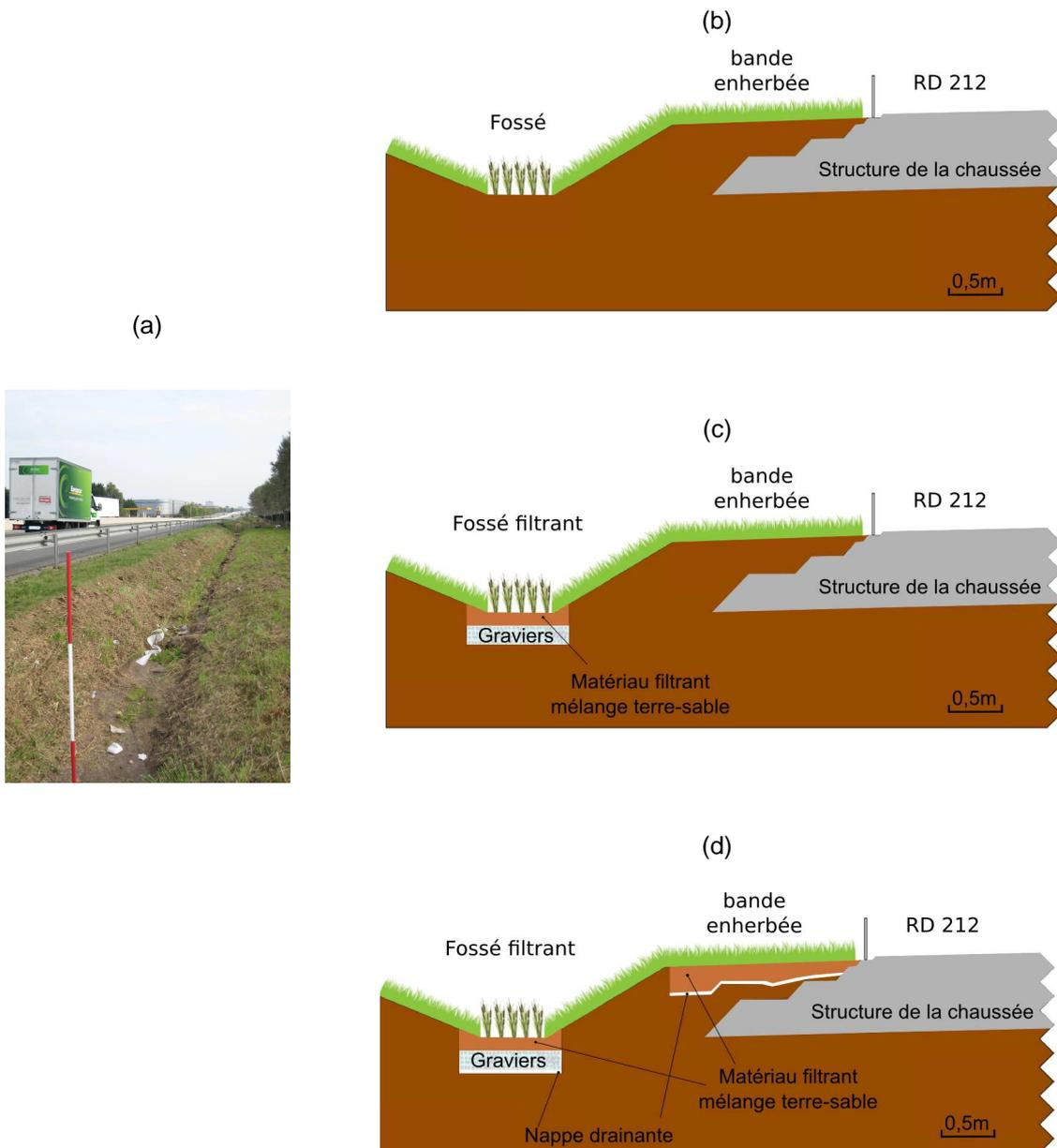


Figure 3 : (a) vue d'ensemble de l'accotement et du fossé, (b) schéma de principe du premier bief, (c) schéma de principe du bief filtrant, infiltrant non drainé, (d) schéma de principe du bief filtrant, infiltrant et drainé.

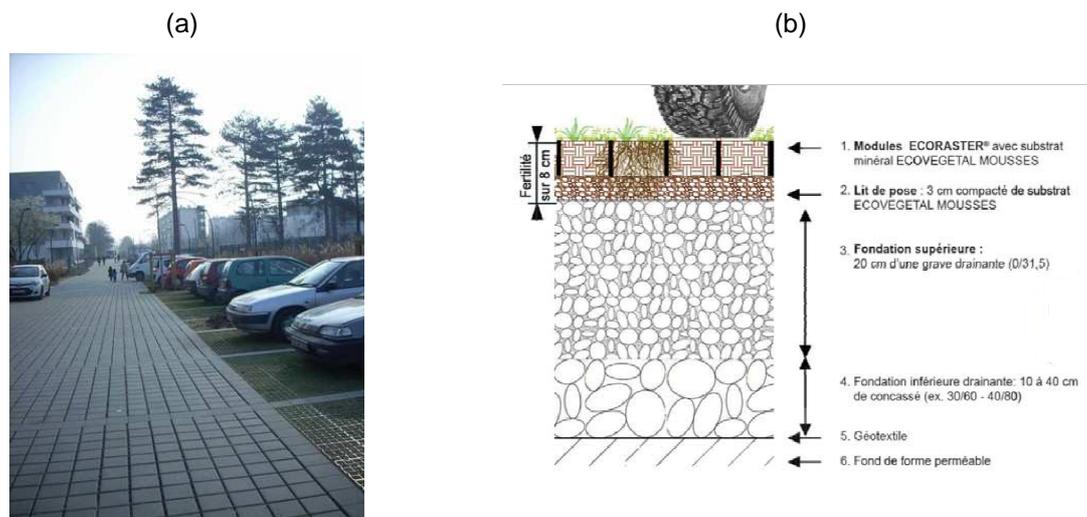


Figure 4 : (a) photographie du parking perméable végétalisé de Villeneuve-le-Roi, (b) schéma de principe des parkings ecovégétal® Mousses (écovégétal).

2.2.2 Contraintes

Les quatre solutions étudiées présentent des niveaux techniques différents. Les niveaux de contamination attendus peuvent aussi être très différents entre les circulations denses des sites de Paris et Compans et celle liée aux rotations de véhicule du parking perméable. Enfin, pour certaines solutions, les aménagements n'ont pas été prévus pour la mise en place d'un suivi sur le long terme. Les solutions peuvent être classées en deux catégories, la première est celle où l'entrée et la sortie sont canalisées, c'est le cas du STOPPOL® et des filtres plantés horizontaux. Pour la deuxième catégorie, les apports d'eau au niveau des dispositifs sont diffus. C'est le cas des fossés filtrants/infiltrants et du parking perméable dont l'apport par ruissellement de surface et la pluie ne sont pas canalisés. De plus, les sorties de ces deux dernières solutions peuvent être triples puisqu'une partie de l'eau est drainée, une autre partie rejoint le substrat et le sol par percolation et une dernière partie peut être évapotranspirée. Pour la première catégorie, l'entrée et la sortie sont alors bien identifiées, en revanche pour la deuxième catégorie, il est nécessaire de trouver un moyen pour mesurer les flux d'eau en entrée du dispositif et en sortie, au niveau des drains mais également de faire des mesures et des prélèvements de l'eau dans le sol et le substrat. En outre, le passage de l'eau dans un sol ou un substrat implique des fins d'événements pluvieux qui peuvent être longues avec des débits plus faibles voire nuls dans certains cas. Au final, une portion non négligeable du volume écoulé, devant être mesuré, devra l'être pour des débits faibles. Or, il existe peu de systèmes qui permettent de mesurer une large gamme de débits (Benoist et Birgand, 2002). Enfin, la présence d'un système de mesure ne doit pas modifier les conditions d'écoulement (aussi bien dans une canalisation, un drain que dans le sol) et la représentativité des eaux échantillonnées. Il convient donc d'éviter les installations entraînant de la sédimentation et de prévoir un espacement suffisant entre le débitmètre et la prise du prélèvement.

Le suivi des micropolluants organiques et minéraux entraîne aussi des contraintes particulières. Pour limiter les contaminations et/ou pertes par absorption, lors des prélèvements d'eau, les différentes analyses envisagées nécessitent des flacons en verre (micropolluants organiques) et en plastique (métaux) et le volume à collecter est estimé à au moins 10 l. Comme, les temps de transferts et donc le temps entre la fin de pluie et la fin de l'écoulement et les délais de récupération des échantillons liés à la réactivité des équipes, peuvent être long, l'utilisation de préleveurs réfrigérés a été privilégiée. Elle n'est cependant pas techniquement possible sur tous les points de mesure (contraintes d'espace et d'alimentation électrique).

2.3 Instrumentation mise en œuvre

2.3.1 STOPPOL®

La configuration du site, le besoin d'un curage régulier et l'importance de débris végétaux s'accumulant dans la canalisation ne permettait finalement pas la mise en place d'un système de mesure des débits en amont du dispositif de traitement. Il a été considéré que de par sa nature, le STOPPOL® ne modifiait pas les débits. Il n'y a en effet pas de rétention d'eau. Une seule mesure de débit à l'aval est donc nécessaire. La canalisation aval du STOPPOL® a un diamètre de 300 mm et se termine dans un regard qui est connecté hydrauliquement avec la rivière Seine et celle-ci atteint fréquemment le niveau de la canalisation. De plus, la ligne d'eau dans la canalisation ne doit pas être modifiée pour ne pas perturber le fonctionnement du STOPPOL®, ce qui réduit fortement le champ des dispositifs de mesure de débit envisageables. Ainsi pour avoir une mesure de débits précise pour une large gamme d'évènements, il a été décidé de combiner, dans le regard, une mesure par augets basculants de 5 l (UFT GmbH, Allemagne) permettant une mesure de débit jusqu'à $1,3 \text{ l.s}^{-1}$ et une mesure de débit par débitmètre ultrason, à corrélation d'écho, fonctionnant en conduite pleine (capteur cylindrique POA, Nivus, Allemagne) permettant de mesurer les débits entre 0,8 l/s et 9 l/s. Ce dernier a nécessité la pose d'un siphon dans le regard de mesure, en veillant à ce qu'il n'y ait pas de mise en charge de la canalisation. Cependant en cas de submersion du regard (crue de la Seine), l'auget ne fonctionnera plus puis si le niveau d'eau augmente encore, le siphon sera noyé, bloquant la mesure avec le débitmètre ultrason. Ainsi, en plus de ces deux moyens de mesures, une loi hauteur débit a été calée pour le STOPPOL® permettant d'avoir une troisième mesure de débit à partir d'un piézomètre placé dans le STOPPOL® qui permet d'estimer les débits lors des périodes où le siphon est noyé ou surchargé (débit supérieur à 9 l.s^{-1}). Les prélèvements sont réalisés par deux préleveurs monoflacon réfrigérés (SIGMA 900 SD, HACH, USA). Les flacons ont un volume de 20 l et il a été choisi d'alterner le verre et le plastique à chaque prélèvement. La mise en place des préleveurs a nécessité la pose d'une armoire à une dizaine de mètre du STOPPOL®. Les prélèvements sont asservis à la mesure du débitmètre à augets jusqu'à 1 l.s^{-1} puis au débitmètre ultrason pour les débits supérieurs à 1 l.s^{-1} .

2.3.2 Filtres plantés horizontaux

La mesure du débit se fait, en amont, par un débitmètre électromagnétique (TIDALFLUX 2300K, Krohne, Allemagne) installé sur la conduite d'alimentation (diamètre de 600 mm). Ce débitmètre a la particularité de fonctionner en conduite partiellement remplie (à partir de 10 % de remplissage). Un seuil a été réalisé pour garantir un niveau de remplissage suffisant. La gamme de débits pouvant ainsi être mesurée va de 0 l.s^{-1} à $83,33 \text{ l.s}^{-1}$. Afin d'éviter les problèmes de sédimentation liés à ce seuil, la tige de prélèvement d'eau est placée suffisamment en amont et un nettoyage régulier est prévu. La mesure des débits sortants est réalisée en aval d'un régulateur de débit vortex, et porte donc sur une gamme de débits beaucoup plus limitée. Elle est réalisée au moyen d'un déversoir triangulaire (obturateur déversoir Hydreka, France) avec une mesure de hauteur d'eau par un débitmètre bulle-à-bulle (Sigma 950, Hydreka, France). Le déversoir a un angle de $53^{\circ}8'$ et est installé sur une canalisation de 180 mm de diamètre. Cet appareil doit pouvoir mesurer les débits jusqu'à $3,4 \text{ l.s}^{-1}$ (débit maximum du régulateur). Les prélèvements à l'amont seront réalisés par un préleveur réfrigéré multiflacons (Bülher 1029, HACH, USA). Les 12 flacons de 1 l seront, selon les campagnes de mesure, en verre ou en plastique. Ce préleveur est placé dans le même regard que le débitmètre électromagnétique. Pour l'aval, il sera installé un préleveur réfrigéré monoflacon (AS950, HACH, USA). Ce dernier sera placé dans le regard où se trouve le déversoir triangulaire et auquel il sera asservi. Ce dernier fonctionnera sur batterie et nécessitera d'alterner flacons en verre et en plastique.

2.3.3 Bandes enherbées et fossés filtrants et infiltrants

Dans ce dispositif, l'apport d'eau est diffus. Afin de caractériser le flux d'eau entrant, il a donc été choisi d'utiliser une surface témoin. Cette surface témoin se trouve à proximité et a les mêmes caractéristiques (même revêtement, superficie équivalente) que la surface d'apport des bandes enherbées et fossés. Cependant, une bordure permet de canaliser le ruissellement afin de l'envoyer dans un regard. Le débit est alors mesuré avec des augets basculants de 20 l chacun (UFT GmbH, Allemagne) ce qui permet la mesure d'un débit d'environ 5 l.s^{-1} . Deux préleveurs réfrigérés monoflacon de 20 l (un pour le verre, un pour le plastique), alimentés par batterie et panneau photovoltaïque, sont asservis à ces augets. Pour les prélèvements en sortie des accotements et fossés, deux cas de figures existent : une partie de l'eau est drainée, l'autre est infiltrée dans le sol. La mesure des flux d'eau drainée est réalisée par des augets de 1 l (Précis-Mécanique, France). Un

système de fractionnement et de collecte mis en place sous les augets alimente gravitairement deux flacons en verre et deux flacons en plastique de 10 l chacun de façon à constituer des échantillons moyens proportionnels au volume. La réfrigération de ces eaux s'est en revanche avérée impossible du fait du manque d'espace dans le regard de collecte. L'eau présente dans le sol des accotements et fossés filtrants sera suivie par la mise en place de tensiomètres (tensiomètres T8, UMS, Allemagne et MPS-1, Decagon Devices, USA) et de sondes capacitatives pour la mesure de la teneur en eau (EC-5 et 5TE, Decagon Devices, USA). Le prélèvement de l'eau interstitielle du sol s'avère plus délicat. Plusieurs techniques existent pour ce faire : bougies poreuses, plaques poreuses, lysimètres... (Weihermüller *et al.*, 2007). Le choix doit être fait en fonction du volume d'eau qu'il est possible de prélever et de la représentativité de l'échantillon. En effet, il est cherché à prélever l'eau au moment de l'écoulement dans le sol et non l'eau résiduelle et avec des volumes suffisants pour les analyses. De plus, les premières observations montrent que ces fossés filtrants ont un fonctionnement différent de celui prévu. Aussi, d'autres systèmes de récupération des eaux sont actuellement testés. Il s'agit de gouttières et de plaques lysimétriques pour la collecte des ruissellements superficiel et hypodermique.

2.3.4 Parking perméable

Ce site est encore en cours d'instrumentation mais comme pour les fossés filtrants, l'apport d'eau est diffus et une partie de l'eau est drainée, l'autre s'infiltré. Un parking témoin, correspondant à un parking traditionnel revêtu d'un enrobé, sera donc utilisé pour mesurer les flux de polluants produit par la rotation des véhicules. L'évaluation de l'efficacité du parking perméable sera ensuite réalisée par la mesure des flux d'eau drainée et infiltrée dans le sol. Les débits au niveau des drains seront mesurés par des augets (Précis-Mécanique, France). Les prélèvements se feront par des préleveurs monoflacon réfrigérés (Isco 3700, Teledyne Isco, USA). Le site où se situe le parking étant récent, il est possible de réaliser des aménagements (regards, électricité) favorisant de bonnes conditions d'installation des instruments. Pour les mesures et prélèvements de l'eau dans le substrat et le sol, les instruments seront similaires à ceux utilisés pour les fossés.

3 DISCUSSION ET CONCLUSION

Les contraintes spécifiques à chaque site n'ont pas permis de choisir du matériel identique et pour le STOPPOL®, il est même nécessaire d'avoir trois mesures de débits différentes pour assurer une mesure fiable sur l'ensemble de la gamme désirée. Cependant, malgré les différences, les instruments choisis devraient permettre d'observer le même type d'événements pluvieux courants. L'équipement pour les prélèvements d'eau est plus homogène. Si les préleveurs ne sont pas tous du même modèle, leur fonctionnement est similaire et la réfrigération, malgré les fortes contraintes que cela impose - installation sur la voie publique, place disponible, alimentation électrique - est possible dans presque tous les cas. Les matériaux utilisés pour le flaconnage seront les mêmes, les protocoles de prélèvement ont été homogénéisés et ce sont les mêmes laboratoires qui réaliseront les analyses. Ces précautions devront permettre d'avoir des résultats qui puissent être comparables. Cependant, l'utilisation de surfaces témoins pour mesurer l'entrée du système, bien qu'indispensable dans certains cas, reste discutable. Il est possible que le fait de canaliser les eaux de ruissellement favorise la formation d'un dépôt susceptible de modifier à terme la concentration en micropolluants par rapport à la solution initiale. Il est également à noter que pour les solutions pour lesquelles le suivi n'a pas été prévu à la conception, des travaux d'adaptation et des installations supplémentaires sont généralement nécessaires, ce qui entraîne un surcoût. La grande difficulté, au niveau des mesures, actuellement toujours en cours de résolution, réside dans la mesure et le prélèvement de l'eau dans le sol. L'importante hétérogénéité du sol, la difficulté d'installation en évitant de perturber le système, complique la mise en place d'un suivi représentatif qui ne soit pas non plus trop coûteux. Enfin, il paraît important, d'autant plus dans le cas de dispositifs infiltrants, d'avoir une connaissance préalable du fonctionnement hydrologique réel, ce dernier pouvant différer de ce qui est prévu lors de la conception. Cela permet de choisir au mieux le nombre et l'emplacement des capteurs et de gérer l'asservissement des préleveurs. Il est donc conseillé, avant l'installation définitive, d'avoir des observations préalables ou lorsque que ce n'est pas possible d'avoir recours à un modèle pour mieux définir le fonctionnement des dispositifs.

BIBLIOGRAPHIE

AESN, Composante Urbaine, LEESU, (2013). Outils de bonne gestion des eaux de ruissellement en zones urbaines. Document d'orientation pour une meilleure maîtrise des pollutions dès l'origine du ruissellement. 63 p.

- Benoist, J.C., Birgand, F., (2002). Les dispositifs de mesure des débits dans les bassins versants agricoles. *Ingénieries* 51–63.
- Edwards, I.J., Jackson, W.D., Fleming, P.M., (1974). Tipping bucket gauges for measuring run-off from experimental plots. *Agric. Meteorol.* 13, 189–201. doi:10.1016/0002-1571(74)90046-6
- Freni G., Mannima G. and Viviani G., (2010). Urban storm-water management: centralized versus source control. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 136: 268-278.
- Gromaire-Mertz, M.-C., Chebbo, G., Saad, M., (1998). Origins and characteristics of urban wet weather pollution in combined sewer systems: The experimental urban catchment “Le Marais” in Paris. *Water Sci. Technol.*, 37, 35–43.
- Nehls, T., Nam Rim, Y., Wessolek, G., (2011). Technical note on measuring run-off dynamics from pavements using a new device: the weighable tipping bucket. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 1379–1386. doi:10.5194/hess-15-1379-2011
- Tang, J. Y. M., Aryal, R., Deletic, A., Gernjak, W., Glenn, E., McCarthy, D. and Esther, B. I., (2013). Toxicity characterization of urban stormwater with bioanalytical tools. *Water Research*, 47(15): 5594-5606.
- Weihermüller, L., Siemens, J., Deurer, M., Knoblauch, S., Rupp, H., Göttlein, A., Pütz, T., (2007). In Situ Soil Water Extraction: A Review. *J. Environ. Qual.* 36, 1735. doi:10.2134/jeq2007.0218