

CARACTÉRISATION DES TRANFERTS D’EAU DANS UNE BANDE ENHERBEE FAISANT PARTIE D’UN OUVRAGE VEGETALISE DE FILTRATION / INFILTRATION DES EAUX DE RUISSELLEMENT DE VOIRIE

FLANAGAN K. ⁽¹⁾, KANSO T. ⁽¹⁾, RAMIER D. ⁽²⁾, DUBOIS P. ⁽¹⁾, THOMAS, E. ⁽³⁾, CHEBBO G. ⁽¹⁾, BRANCHU P. ⁽²⁾, GROMAIRE M.-C. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Laboratoire Eau, Environnement, Systèmes Urbains, École des ponts ParisTech, 6-8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, Champs-sur-Marne, 77455 Marne-la-Vallée Cedex 2, kelsey.flanagan@leesu.enpc.fr, tala.kanso@enpc.fr, philippe.dubois@leesu.enpc.fr, chebbo@leesu.enpc.fr, gromaire@leesu.enpc.fr

⁽²⁾ Cerema/DTer Ile-de-France, 12 rue Teisserenc de Bort, 78190 Trappes, philippe.branchu@cerema.fr, david.ramier@cerema.fr

⁽³⁾ Conseil Départemental de Seine-et-Marne, Direction principale des routes, 314 avenue Anna Lindh, 77240 Vert Saint Denis, eric.thomas@departement77.fr

RESUME

La problématique de gestion des eaux pluviales, et plus particulièrement celle des eaux de ruissellement sur voirie, s’est enrichie ces dernières années d’un volet lié à la prise en compte de leur contamination par les micropolluants. Dans ce contexte, des ouvrages végétalisés installés en bordure de voirie dans l’objectif de filtrer et infiltrer ces eaux à la source constituent une solution de gestion intéressant les maîtres d’ouvrages. La conception de ces systèmes est simple mais leur fonctionnement est cependant complexe. Des travaux de caractérisation du fonctionnement hydrologique d’une bande enherbée faisant partie d’un tel système ont été menés en Seine-et-Marne en collaboration avec le Conseil Départemental, montrant que le fonctionnement réel de la bande est bien plus complexe que sa représentation théorique. Cette étude met ainsi en évidence une hétérogénéité spatiale forte de la conductivité hydraulique au sein de l’ouvrage, une distribution irrégulière de l’écoulement et la formation d’écoulements préférentiels qui sont fonction des conditions climatiques. Ces travaux sont la première étape d’une étude plus large visant la caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrologique et du devenir de micropolluants dans l’ouvrage.

Mots clés : gestion à la source, eaux de voirie, bande enherbée, biofiltration, infiltration, sol

ABSTRACT

Recent research has shown road runoff to be contaminated by various micropollutants, bringing about a need for techniques managing this pollution. In this context, one solution coming forward is that of roadside planted systems designed to filter and infiltrate runoff at the source. While the design of these systems is quite simple, the reality of their operation is complex. A real system of this type, located in Seine-and-Marne, has been studied in collaboration with the Departmental Counsel in order to characterize its hydrological behavior; this work shows that the real performance of the systems is much more complex than its theoretical representation. Notably, evidence indicates a variability of the hydraulic conductivity throughout the system, an irregular distribution of water across the system and of the occurrence of preferential flows under certain climatic conditions. This work is the first step in a larger study aiming to characterize and model the hydrological behavior and the fate of micropollutants in the system.

Keywords: source control, road runoff, vegetative filter strip, biofiltration, infiltration, soil

INTRODUCTION

Les eaux de ruissellement de voirie sont contaminées par des micropolluants organiques (Kalmykova et al., 2013) et métalliques (Davis and Birch, 2010) et montrent une toxicité envers des organismes aquatiques (Kayhanian et al., 2008). De ce fait, elles sont susceptibles de dégrader la qualité des milieux aquatiques, superficiels et souterrains, dans lesquels elles sont rejetées.

Plusieurs de ces micropolluants (métaux, hydrocarbures aromatiques polycycliques – HAPs, alkylphenols, phthalates) sont des substances prioritaires de la Directive Cadre sur l'Eau de l'Union Européenne. Ce texte impose la réduction ou suppression des rejets de ces substances, préconisant en particulier leur contrôle à la source.

Dans ce contexte, on constate le développement de techniques de gestion des eaux de ruissellement à la source reposant sur des systèmes eau-sol-plantes. Ces systèmes sont conçus pour la collecte, la dépollution et l'infiltration des eaux de ruissellement proche de la source de ruissellement. Le flux polluant vers le milieu récepteur est réduit par la réduction du volume d'eau et par la rétention et éventuellement la dégradation des polluants dans le substrat.

On retrouve de nombreuses références dans la littérature scientifique internationale s'adressant à ce type de systèmes. On peut distinguer deux types de systèmes : les bandes enherbées conçues pour améliorer la qualité de l'eau lorsqu'elle ruisselle à travers une zone de végétation dense (Winston et al., 2012) et les ouvrages dits de biorétention ou biofiltration où l'eau est stockée en surface afin de forcer sa filtration/infiltration par le substrat et le sol sous-jacent. (Roy-Poirier et al., 2010)

La plupart des études évaluant l'efficacité *in situ* de rétention de polluants dans ces types d'ouvrages s'intéressent à l'efficacité vis-à-vis des matières en suspension et des nutriments. On retrouve quelques études s'intéressant aux micropolluants métalliques (Bäckström et al., 2006; Barrett et al., 1998; Davis, 2007; Hunt et al., 2006; Stagge et al., 2012). Les études ciblant l'efficacité *in situ* de rétention de micropolluants organiques et s'intéressant uniquement aux hydrocarbures totaux ou aux HAPs (Davis, 2005 ; DiBlasi et al., 2009) ou utilisant une eau de ruissellement synthétique avec des concentrations initiales plus élevées que les concentrations habituelles dans les eaux de ruissellement (Zhang et al., 2014) sont rares. Ainsi, il est intéressant de mieux caractériser le devenir de micropolluants, et tout particulièrement les organiques, dans ce type d'ouvrage en conditions réelles.

De plus, il n'existe pas actuellement de guide pour la conception de ce type d'ouvrage en France. Les méthodes de conception à l'internationale sont généralement empiriques et ne peuvent être directement extrapolées à un climat et à un contexte différent. (Davis et al., 2009). Des études *in situ* permettraient ainsi une meilleure compréhension du fonctionnement d'un système de ce type dans le contexte français, ce qui pourrait servir de base à l'établissement de préconisations et à la proposition d'outils de conception.

En réponse à ces besoins, ce projet de recherche, qui s'inscrit au sein du projet ROULEPUR¹, vise la caractérisation *in situ* du fonctionnement d'un ouvrage opérationnel couplant un accotement végétalisé, ou bande enherbée, à un ouvrage de biofiltration en fossé. L'étude s'intéresse aussi bien au fonctionnement hydrologique qu'au devenir des polluants, et notamment de micropolluants métalliques et organiques (HAPs, alkylphenols, phthalates, bisphenol-A).

L'ouvrage en question, de conception relativement simple, a un fonctionnement complexe. D'un point de vue quantitatif, le fonctionnement couple du ruissellement superficiel et un écoulement en milieu poreux non-saturé, avec des pertes par évapotranspiration et une infiltration en profondeur. D'un point de vue qualitatif, de nombreux processus interviennent

¹ Projet ROULEPUR (solutions innovantes pour une maîtrise à la source de la contamination en micropolluants des eaux de ruissellement des voiries et parkings urbains) financé par l'Onema et l'Agence de l'eau Seine Normandie dans le cadre de l'appel à projets Lutte contre les micropolluants dans les eaux urbaines.

potentiellement: décantation et filtration des polluants particuliers, adsorption des polluants dissous sur la phase particulaire du sol, volatilisation, photolyse, biodégradation, accumulation dans les plantes.

Face à cette complexité, l'approche proposée dans cette étude couple un suivi in situ, complété par des caractérisations de sol en laboratoire, au développement d'un modèle combinant une description physique des écoulements et une représentation plus conceptuelle du transfert des polluants.

Seuls les premiers travaux de l'approche quantitative (tests d'infiltration, capteurs in situ) de l'étude de la bande enherbée de l'ouvrage sont présentés ici.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Présentation du site d'étude

Le site d'étude est un ouvrage de filtration et infiltration des eaux de ruissellement de voirie, mis en œuvre en 2012 sur un axe routier à forte circulation, la RD 212 à Compans (77). Ce site est situé à proximité de l'Aéroport Charles de Gaulle et dans une zone d'activité présentant plusieurs industries lourdes. Cette situation devrait potentiellement engendrer une forte pollution des eaux de ruissellement. L'ouvrage, conçu et géré par la Direction Principale des Routes du Conseil Départemental de Seine-et-Marne, consiste en un accotement végétalisé et un fossé avec une couche de substrat filtrant. La géométrie et le fonctionnement théorique de l'ouvrage sont présentés ci-dessous et illustrés dans la figure 1.

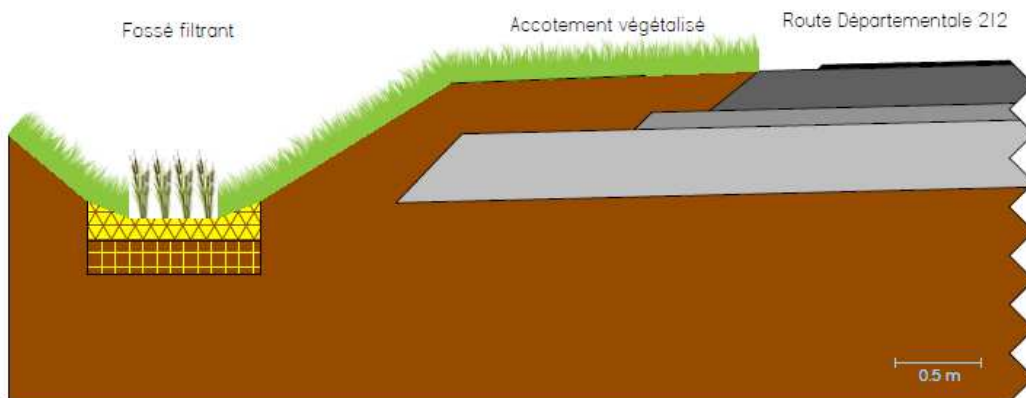


Figure 1 : Schéma de l'ouvrage à Compans

L'accotement végétalisé, large d'environ 1,9 m avec une pente de 3%, reçoit directement les eaux de ruissellement de la voirie. Cet élément assure un prétraitement de l'eau par filtration-décantation à travers la végétation en surface et une réduction du volume d'eau du fait de l'infiltration d'une partie de l'eau dans le sol. Cet accotement présente une texture essentiellement limoneuse (18,9% argile, 74,4% limon, 6,7% sable). Les résultats présentés ci-après sont les premiers travaux de caractérisation de cette partie de l'ouvrage.

L'eau ruisselle ensuite vers un fossé filtrant. Le fossé est divisé en biefs de 50 m séparés par des redans d'une hauteur de 0,5 m qui favorisent la mise en charge et l'infiltration au fond du fossé. Le sol originel du fossé a été remplacé par un massif filtrant composé de haut en bas par 0,2 m d'un mélange de terre végétale et de sable, un géotextile puis une couche de 0,2 m de graviers. L'eau arrivée dans le fossé percole à travers ce filtre avant de s'infiltrer dans le sol naturel. Lors de la conception de l'ouvrage, une attention particulière a été apportée au choix des plantes dans le fossé afin d'optimiser les processus de dépollution dans le substrat filtrant. Cependant, au bout de plusieurs mois de fonctionnement, les plantes présentes dans le fossé ne se développent pas de façon optimale.

Par ailleurs, alors que la plupart des modèles destinés à simuler le fonctionnement des bandes enherbées considèrent un profil de sol uniforme, dans notre cas, la réalisation d'une tranchée met en évidence des inclusions (> 1,5 m à partir de l'enrobé) de la structure de la chaussée, (constituée d'une couche de liaison, d'une couche et base et d'une couche de limon traité) sous

l'accotement. Cette structure ne fait pas partie de l'ouvrage en soi mais joue très certainement un rôle important dans la circulation de l'eau infiltrée. La géométrie exacte de cette structure est assez mal connue, sa réalisation étant susceptible de différer de la coupe théorique et de varier longitudinalement.

2.2 Présentation de méthodes employées

2.2.1 Tests d'infiltration

Des essais d'infiltration ont été menés sur l'accotement en sol limoneux selon trois méthodes différentes : la méthode BEST (Lassabatère et al., 2006), la méthode du perméamètre de Guelph (Reynolds and Elrick, 1985) et la méthode du double anneau (Scotter et al., 1982). Pour chaque méthode, un essai a été réalisé, à l'exception de la méthode BEST pour laquelle deux essais ont été effectués. Pour comparaison, une valeur de conductivité hydraulique a été estimée par le programme Rosetta (PC-Progress) qui utilise des fonctions de pédotransfert à partir de la granulométrie et la densité du sol (Schaap et al., 2001). Les essais BEST et le double anneau permettent une mesure en surface, sans altération de la structure du sol. La mesure au Guelph a été réalisée à une profondeur de 8 cm.

2.2.2 Cartographies de teneur en eau

Une cartographie de teneur en eau a été effectuée en utilisant une sonde de teneur en eau (FieldScout TDR 100 Soil Moisture Sensor avec pointes de 12cm, Spectrum Technologies). Des mesures ont été prises tous les 5 m sur la longueur de l'accotement et tous les 0,5 m sur la largeur, ce qui génère un quadrillage de 9 points en longueur par 4 points en largeur. La cartographie a été effectuée deux fois, dans des conditions climatiques différentes : une période plutôt sèche (26 mai 2015, 1,6 mm de pluie dans la semaine précédant la mesure) et une période plutôt humide (15 septembre 2015, 31,6 mm de pluie dans la semaine précédant la mesure). L'appareil n'a pas été étalonné sur le sol en place.

2.2.3 Capteurs hydrologiques

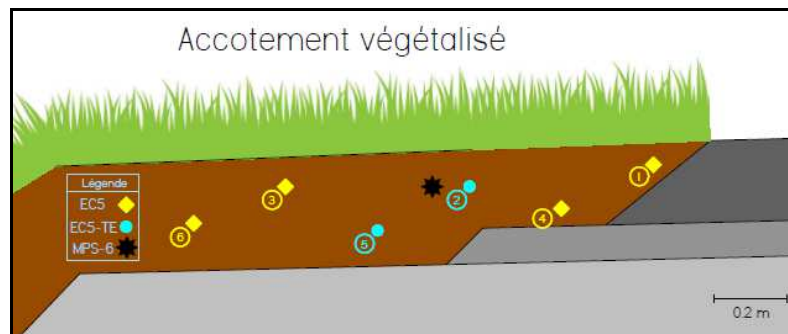


Figure 2 : Schéma de l'emplacement des capteurs dans l'accotement

Outre les mesures ponctuelles réalisées sur le terrain, un suivi en continu (selon un pas de 30 minutes) par capteurs de teneur en eau (EC-5 et EC5-TE, Decagon) et tensiométrique (MPS-6, Decagon) est réalisé depuis le 20 février 2015. Des courbes d'étalonnage de teneur en eau ont été établies en laboratoire pour chaque type de capteur pour le sol du site. La position des 6 capteurs de teneur en eau et du capteur tensiométrique installés sur l'accotement avec sol limoneux est représentée dans la Figure 2. L'installation d'un capteur de teneur en eau à proximité immédiate d'un capteur tensiométrique permet une estimation *in-situ* de la courbe de rétention du sol.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les mesures mettent en évidence un fonctionnement réel du système bien plus complexe que celui prévu lors de sa conception. On observe notamment des hétérogénéités importantes des caractéristiques hydrodynamiques du sol et des écoulements. La discussion se limite par la suite au fonctionnement d'une partie de l'ouvrage : l'accotement végétalisé.

3.1 Tests d'infiltration

La première observation porte sur la variabilité importante de la conductivité hydraulique à saturation (K_s , cf. Tableau 1). La seule méthode ayant plus d'une mesure est celle de la méthode BEST, qui montre des conductivités hydrauliques variant d'un facteur deux entre les deux essais. Les valeurs mesurées par l'essai double anneau et calculées par BEST sont proches et proches des valeurs attendues pour ce type de sol estimées par Rosetta.

La mesure par la méthode Guelph est inférieure aux autres mesures in situ d'un facteur 20-40. La méthode Guelph mesure la conductivité sous la surface, dans ce cas à une profondeur de 8 cm. Une explication pour cette différence serait qu'à cette profondeur, la mesure est influencée par la structure de la route, peu perméable, présente à une profondeur d'environ 30 cm sous l'accotement. Il est également possible que cette valeur représente une hétérogénéité du sol entre les différents emplacements ou à différentes profondeurs du fait de la présence du réseau racinaire plus dense proche à la surface qu'à une profondeur de 8 cm.

Un nombre plus important de mesures, en conditions de répétabilité pour les différentes méthodes à chaque emplacement, permettront une meilleure compréhension de la répétabilité entre méthodes et de l'hétérogénéité du milieu.

Tableau 1 : Résultats des essais d'infiltration

Méthode	Guelph	Double anneau	BEST	Rosetta
K_s (m/s)	$3,07 \cdot 10^{-7}$	$5,85 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-5}$ $5,35 \cdot 10^{-6}$	$2,05 \cdot 10^{-6}$

3.2 Cartographies de teneur en eau

Les cartographies de teneur en eau mettent en avant une distribution non-uniforme de l'eau dans l'accotement pour les deux périodes de mesure.

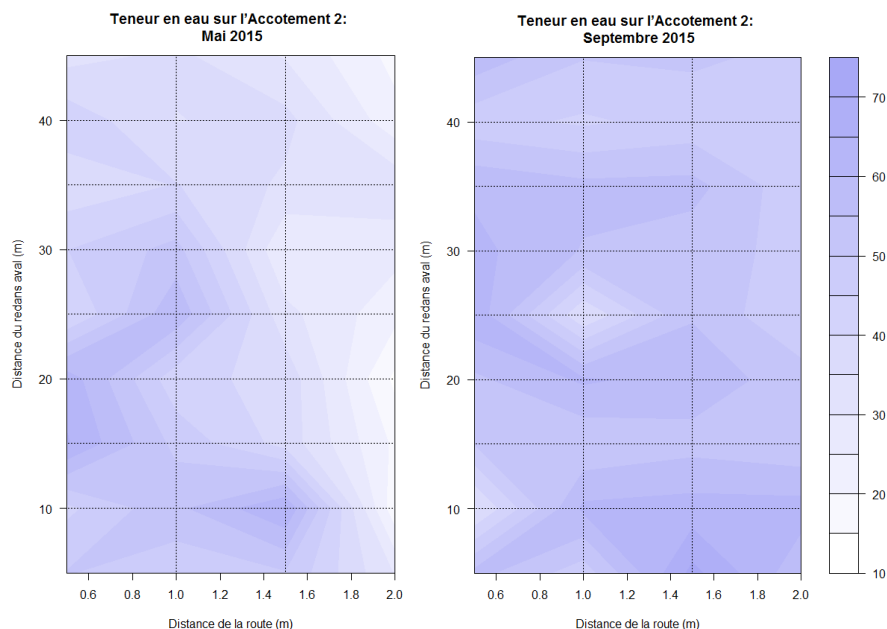


Figure 3 : Cartographies des teneurs en eau (% volumique) de l'accotement : (A) en période plutôt sèche (mai 2015), (B) en période plutôt humide (septembre 2015). Sur ce graphique, les intersections des lignes de la grille correspondent aux points de mesure.

Au mois de mai (période plutôt sèche), on observe que l'accotement est nettement plus sec à son extrémité la plus éloignée de la route. Deux explications peuvent être avancées. La première est que lors des faibles événements pluvieux précédents (0,2-2,8 mm), l'eau de la voirie a ruisselé sur l'accotement mais s'est infiltrée rapidement sans atteindre l'extrémité de l'accotement. Une autre explication pourrait être que la structure enterrée de la route s'arrête

avant la fin de l'accotement, favorisant un drainage plus efficace à ce niveau. Cet effet est moins marqué sur la cartographie de septembre, probablement en lien avec l'existence de pluies importantes (3,8-16,8 mm) au cours des trois jours précédant ainsi que le matin même de la mesure, pour lesquelles le ruissellement aurait pu atteindre l'extrémité de l'accotement.

Une répartition irrégulière de la teneur en eau est également mise en évidence sur la longueur de l'accotement. Dans la conception de ce type d'ouvrage, l'écoulement est supposé uniforme, ce qui n'est visiblement pas le cas. Cette hétérogénéité peut être imputée à de nombreux facteurs observés sur le terrain tels que l'irrégularité de la surface du terrain, la présence de dépôts de sédiment en bordure de route, de nombreux déchets pouvant gêner l'écoulement, et des trous d'animaux pouvant stocker de l'eau.

Il est à noter que les valeurs mesurées sont parfois très élevées, au point de ne pas être réalistes (s'approchant au maximum de 70% volumique). Cela vient du fait que l'appareil n'a pas été étalonné par rapport au type de sol en place. Si les valeurs ne peuvent être utilisées d'un point de vue quantitatif, elles peuvent l'être qualitativement, le sol étant de même nature sur tout l'accotement.

3.3 Données des capteurs hydrologiques

A terme, les données des capteurs hydrologiques permettront de caler le modèle hydrologique qui calculera les flux d'eau dans le sol. Dans un premier temps, ces capteurs peuvent fournir des informations sur le temps de réponse de l'ouvrage lors d'un événement pluvieux.

Pour un fonctionnement théorique, on attendrait (i) une réponse plus rapide des capteurs proches de la surface (1, 2, 3) par rapport aux capteurs plus profonds (4, 5, 6) (ii) une réponse plus marquée pour les capteurs proches de la route (1 et 4) par rapport aux capteurs les plus éloignés (3 et 6). Les courbes d'évolution de la teneur en eau sont présentées pour chaque capteur lors de deux événements pluvieux : celui du 24 mars 2015 (Figure 4a) et celui du 22 juin 2015 (Figure 4b). L'événement du 24 mars totalisait un cumul de pluie de 10 mm et faisait suite à une période sèche de près de deux semaines. Cependant cet événement étant survenu en début de printemps quand l'évapotranspiration est relativement faible, le sol demeure relativement humide sur de longues périodes (teneur en eau initiale 28-37%). L'événement du 22 juin totalisait un cumul de pluie de 5,4 mm et faisait suite à une période sèche de 18 jours en plein été, période où l'évapotranspiration est très forte; le sol est donc très sec (teneur en eau initiale 14-21%). Le sol proche de la surface est moins humide que le sol plus profond.

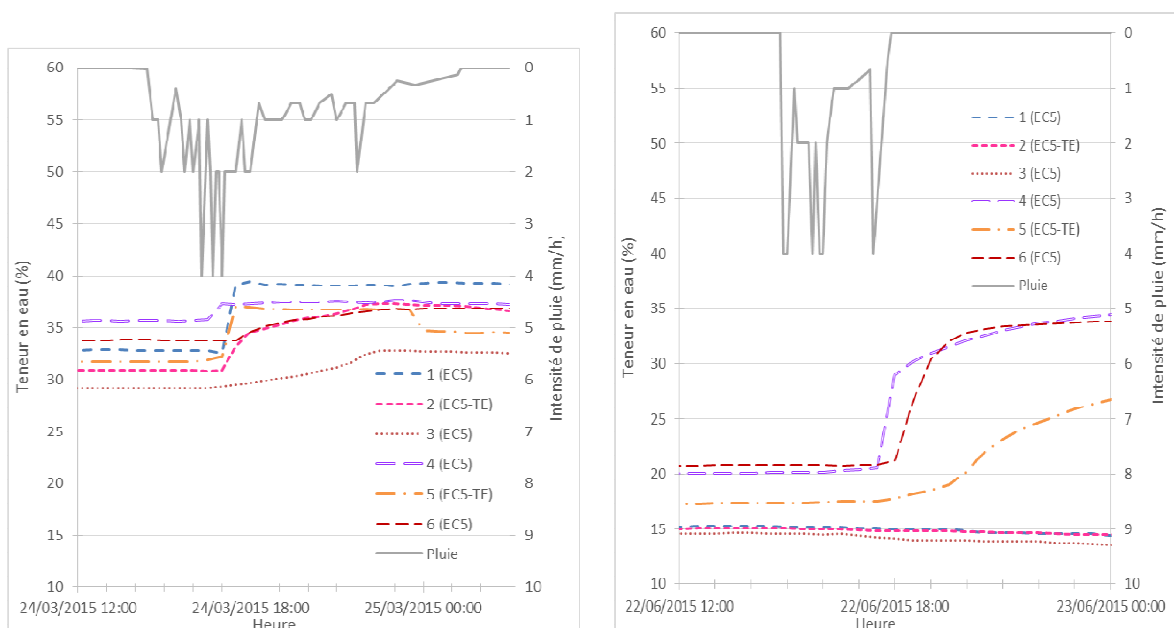


Figure 4 : Evolution de la teneur en eau au niveau des différents capteurs situés dans l'accotement lors de (a) l'événement du 24 mars 2015 et (b) l'événement du 22 juin 2015

On observe une réponse différente de l'accotement lors des deux événements. Lors de l'événement du 24 mars, l'ensemble des capteurs réagissent. L'ordre de réponse est : 4 puis 1, 2, 3, 5 puis 6. La réaction anticipée du capteur 4 par rapport au 1, plus proche à la surface, est surprenante et pourrait traduire l'existence d'un cheminement préférentiel. La pente d'augmentation des teneurs en eau est plus faible pour les capteurs 3 et 6, les plus éloignés de la route, ce qui pourrait traduire une réduction du ruissellement à l'extrémité de l'accotement. Lors de l'événement du 22 juin 2015, on observe une réponse uniquement pour les capteurs en profondeur, ce qui pourrait là également suggérer l'existence d'écoulement préférentiel au niveau de la jonction entre le sol et la structure de la route : l'eau de ruissellement suivrait la structure enterrée de la route, mouillant le sol par en dessous. L'écoulement préférentiel pourrait être lié à la présence de fissures dues à la rétractation du sol en conditions très sèches à ce niveau.

4. CONCLUSION

Les travaux initiaux de caractérisation du comportement hydrologique d'un ouvrage de filtration et infiltration des eaux pluviales montrent que le fonctionnement réel de l'ouvrage diverge de celui prévu lors de la phase de conception. Ces travaux indiquent une hétérogénéité du milieu en termes de conductivité hydraulique, et d'écoulement de l'eau dans l'ouvrage. La présence observée d'obstacles à l'écoulement (déchets, dépôt de sédiments), d'irrégularités du niveau de terrain et de multiples trous et galeries créés par les animaux peuvent expliquer ces effets. On observe, de plus, que l'écoulement de l'eau dans l'ouvrage lors d'un événement pluvial varie fortement en fonction des conditions initiales d'humidité du sol : les écoulements préférentiels au niveau de la structure de la route dominant en période sèche. Ces travaux soulignent la complexité du fonctionnement d'un tel ouvrage. Ils sont un point de départ d'une étude plus approfondie du fonctionnement hydrologique, qui devrait permettre à mieux comprendre les rôles d'infiltration et d'évapotranspiration, et du devenir de polluants dans l'ouvrage.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bäckström, M., Viklander, M., Malmqvist, P.-A., 2006** - Transport of stormwater pollutants through a roadside grassed swale. *Urban Water J.* 3, 55–67.
- Barrett, M.E., Walsh, P.M., Jr, J.F.M., Charbeneau, R.J., 1998** - Performance of vegetative controls for treating highway runoff. *J. Environ. Eng.* 124, 1121–1128.
- Chovanec, A., 2010** - Occurrence of phthalates in surface runoff, untreated and treated wastewater and fate during wastewater treatment. *Chemosphere* 78, 1078–1084.
- Davis, A.P., 2007** - Field Performance of Bioretention: Water Quality. *Environ. Eng. Sci.* 24, 1048–1064.
- Davis, A.P., Hunt, W.F., Traver, R.G., Clar, M., 2009** - Bioretention technology: Overview of current practice and future needs. *J. Environ. Eng.* 135, 109–117.
- Davis, B., Birch, G., 2010** - Comparison of heavy metal loads in stormwater runoff from major and minor urban roads using pollutant yield rating curves. *Environ. Pollut.* 158, 2541–2545.
- DiBlasi, C.J., Li, H., Davis, A.P., Ghosh, U., 2009** - Removal and Fate of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Pollutants in an Urban Stormwater Bioretention Facility. *Environ. Sci. Technol.* 43, 494–502.
- Hsieh, C., Davis, A.P., 2005** - Evaluation and Optimization of Bioretention Media for Treatment of Urban Storm Water Runoff. *J. Environ. Eng.* 131, 1521–1531.
- Hunt, W.F., Jarrett, A.R., Smith, J.T., Sharkey, L.J., 2006** - Evaluating Bioretention Hydrology and Nutrient Removal at Three Field Sites in North Carolina. *J. Irrig. Drain. Eng.* 132, 600–608.
- Kalmykova, Y., Björklund, K., Strömvall, A.-M., Blom, L., 2013** - Partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons, alkylphenols, bisphenol A and phthalates in landfill leachates and stormwater. *Water Res.* 47, 1317–1328.
- Kayhanian, M., Stransky, C., Bay, S., Lau, S.-L., Stenstrom, M.K., 2008** - Toxicity of urban highway runoff with respect to storm duration. *Sci. Total Environ.* 389, 386–406.
- Lassabatère, L., Angulo-Jaramillo, R., Soria Ugalde, J.M., Cuenca, R., Braud, I., Haverkamp, R., 2006** - Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments—BEST. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 521.

Reynolds, D., Elrick, D., 1985 - In situ measurements of field-saturated conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the Guelph Permeameter. *Soil Sci.* 140, 292–302.

Roy-Poirier, A., Champagne, P., Filion, Y., 2010 - Review of bioretention system research and design: past, present, and future. *J. Environ. Eng.* 136, 878–889.

Schaap, M.G., Leij, F.J., van Genuchten, M.T., 2001 - Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. *J. Hydrol.* 251, 163–176.

Scotter, D.R., Clothier, B.E., Harper, E.R., 1982 - Measuring saturated hydraulic conductivity and sorptivity using twin rings. *Aust. J. Soil Res.* 20, 295–304.

Stagge, J.H., Davis, A.P., Jamil, E., Kim, H., 2012 - Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff. *Water Res.* 46, 6731–6742.

Winston, R.J., Hunt, W.F., Kennedy, S.G., Wright, J.D., Lauffer, M.S., 2012 - Field Evaluation of Storm-Water Control Measures for Highway Runoff Treatment. *J. Environ. Eng.* 138, 101–111.

Zhang, K., Randelovic, A., Page, D., McCarthy, D.T., Deletic, A., 2014 - The validation of stormwater biofilters for micropollutant removal using in situ challenge tests. *Ecol. Eng.* 67, 1–10.