

Fiche de synthèse – actions de recherche R3.5 – OPUR5

Évaluation de l'évolution temporelle des propriétés hydrodynamiques d'un média filtrant dans une noue de bio-rétention d'eaux pluviales

Auteurs :

Santiago Sandoval santiago.sandoval-arenas@enpc.fr

Marie-Christine Gromaire marie-christine.gromaire@enpc.fr

Introduction

La gestion intégrée du cycle de l'eau est reconnue comme un aspect essentiel du développement de villes durables. Dans ce contexte, une série de solutions techniques ont été développées, visant à gérer le ruissellement urbain à travers des systèmes décentralisés (c'est-à-dire qui cherchent à reproduire les conditions hydrologiques avant le développement urbain). Les systèmes de biorétention composés d'un milieu solide filtrant restent parmi les solutions les plus étudiées et préconisées. Les avantages hydrologiques des systèmes de biorétention ont été largement évalués (p.e. réduction de débits de pointe volumes totaux de ruissellement), en particulier au cours des premières années de fonctionnement. Cependant, moins d'études se sont concentrées sur l'évaluation de l'évolution potentielle des propriétés hydrologiques de ces systèmes à long terme (après > 5 ans de fonctionnement) (Wang et al., 2021). Pour ce faire, un aspect fondamental à aborder reste l'évolution du milieu solide qui compose les systèmes de biorétention. Cette évolution peut être une fonction de plusieurs facteurs contrastés, notamment : (i) le colmatage par l'apport de Matières en Suspension MES dans les eaux de ruissellement, (ii) le tassement du sol, (iii) la croissance de la végétation ou (iv) l'activité microbiologique. Pour étudier ces impacts à long terme, le suivi en continu à l'aide de capteurs de sol (p.e. teneur en eau volumétrique -VWC-, le potentiel matriciel -MP-) installés *in situ* semble être une stratégie prometteuse en termes d'augmentation de la représentativité spatio-temporelle des mesures, par rapport à l'échantillonnage de sols à partir de prélèvements. Les objectifs de cette étude sont les suivants (i) évaluer l'évolution des propriétés hydrodynamiques du milieu solide dans une baissière de bio rétention au moyen d'un suivi en ligne et de données *in situ*, et (ii) relier l'évolution de ces propriétés du milieu solide à des changements potentiels dans la performance hydrologique du système.

Site de Compans et jeu de données

Le cas d'étude est une noue de bio rétention pour la gestion du ruissellement routier située en région parisienne (France), construite en 2016. La longueur et la largeur de la noue sont respectivement de 32m et 0,7m. La noue est végétalisée avec des carex en surface, elle comprend une couche de 0,48 m d'épaisseur de sol filtrant (40 % v/v de sol naturel mélangé à 60 % v/v de sable) qui est drainée au fond, et étanché par une géomembrane imperméable (voir p.e. Kanso et al., 2018). Le milieu filtrant (substrat) de la noue de bio rétention a été instrumenté avec des capteurs de VWC et MP, dans quatre sections transversales équipées (A, B, C, D) à des profondeurs de 15cm, 25cm et 45cm (Figure 1). L'instrumentation comprenait neuf capteurs EC5, six capteurs Decagon 5TE (METER Group, Inc. USA) de capacitance et cinq capteurs tensiométriques T8 (UMS, Munich, Allemagne) pour mesurer en continu le VWC et le MP, respectivement. Les données des capteurs VWC et MP ont été enregistrées avec un pas de temps de 30 minutes, au cours de deux périodes de mesure d'un an et demi : Période 2016-2018 (du 2016-10-01 au 2018-05-12) et Période 2022-2023 (du 2022-01-01 au 2023-10-11). Les capteurs ont été calibrés à l'aide d'échantillons de sol *in situ* prélevés en 2016, selon la procédure décrite dans Kanso et al. (2020). Des données complémentaires provenant d'échantillons de sol

élémentaires, ainsi que des séries chronologiques de précipitations, de débit du drain et de surverse ont été employées pour développer l'analyse.

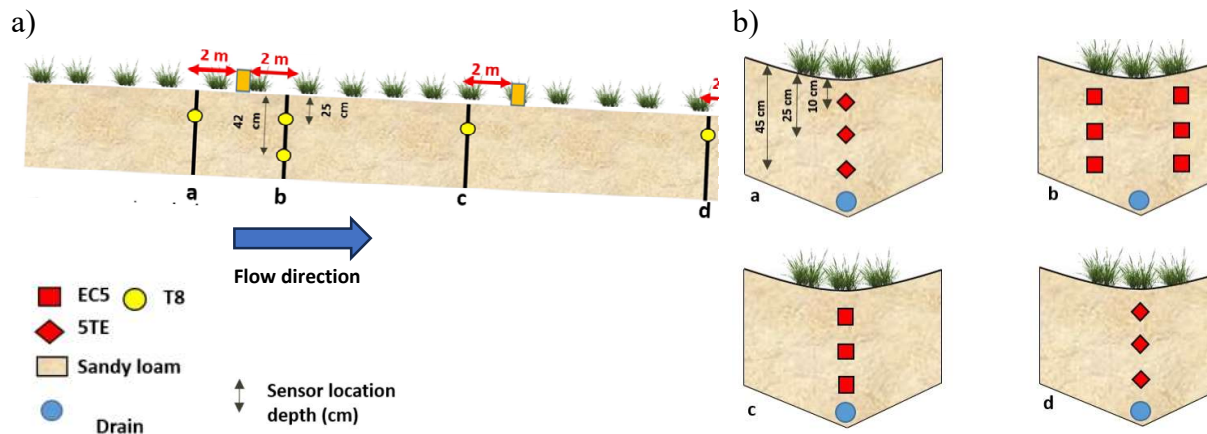


Figure 1. Schéma d'installation des capteurs de VWC and PM dans la noue de bio-rétention (adapté de Kanso et al., 2018).

Méthodologie : analyse des données

Les chroniques enregistrées par les différents dispositifs de mesure ont été validées en employant des méthodes similaires à celles proposées dans Métadier et Bertrand-Krajewski, 2012 (filtre de données, imputation des valeurs manquantes et attribution des incertitudes). L'étape de validation des données comprenait également la comparaison entre les différents capteurs et l'élimination des données non fiables. Afin d'extraire des caractéristiques générales des 15 chroniques de VWC validées (mesurées en 15 points différents, voir figure 1), une stratégie de regroupement est adoptée, basée sur une ANOVA à mesures répétées à deux voies appliquées sur des fenêtres temporelles. Cette méthode consiste à comparer, sur différentes fenêtres temporelles, la variance des VWC mesurés expliquée par le regroupement de signaux à l'aide d'un facteur catégorique, par rapport à la variance totale des mesures de VWC. Pour cette application, les facteurs de regroupement analysés, ou variables explicatives, ont été définis comme la position horizontale et verticale des capteurs VWC ("Section" et "Profondeur", respectivement). Les étiquettes de chaque variable catégorique ont été définies comme suit : "surface, milieu et fond" pour la variable "profondeur" (10 cm, 25 cm et 45 cm) et "A, B1, B2, C et D" pour la variable "section" (chaque section transversale, la section B étant divisée en B1 et B2 car les capteurs sont doublés) (figure 1). Les résultats permettent de quantifier la contribution relative de la "Section" et de la "Profondeur" en tant que variables explicatives de la variance totale des VWC individuellement, ainsi que leur interaction ("Profondeur-Section"), la quantité de variance inexpliquée par l'une ou l'autre des variables ("Unexpl. Var."), et la contribution relative des incertitudes de mesure du VWCs ("Meas. Uncer.").

Sur la base de l'identification du facteur de regroupement le plus approprié (expliquant le pourcentage le plus élevé de la variance totale), les séries temporelles VWC "moyennes" sont estimées en appliquant un filtre médian (e.g. Justusson, 2006) au sein de chaque groupe, ce qui permet de produire des courbes de capacité de rétention d'eau (WHCC) "globales" du système. Les implications de ces résultats sont discutées par des comparaisons entre les périodes 2017-2018 et 2022-2023, principalement basées sur la courbe de probabilité de dépassement (PEC) des VWC, WHCC et des bilans de masse du système. Les résultats de la densité apparente BD et de la Conductivité à saturation Ks des échantillons de sol élémentaire prélevés au cours des deux périodes sont également inclus dans les analyses. Ces valeurs de BD et Ks ont été estimées

principalement à l'aide de la méthode *Beerkan estimation soil transfer* « BEST », où deux versions ont été retenues et moyennisées pour les analyses : "BEST-intercept" et "BEST-steady" (voir Yilmaz et al., 2010 ; Bagarello et al., 2014). Des bilans de masse constitués à l'aide des chroniques ont été effectués pour évaluer les variations hydrologiques du système.

Résultats et discussion

L'application de l'ANOVA à mesures répétées à deux voies sur la série temporelle VWC conduit aux résultats de la figure 2. La figure 2 montre que les valeurs VWC sont plus similaires (c'est-à-dire qu'elles présentent une variance plus faible) lorsqu'elles sont regroupées par "profondeur" (bleu) que par "section" (vert), pendant la majeure partie des périodes 2016-2018 et 2022-2023. Ce résultat suggère que le substrat est fortement stratifié, ce qui est conforme aux études précédentes sur le même site (p.e. Kanso et al., 2018). Cependant, cet effet de stratification dans les VWC semble être moins prononcé pendant les étés de 2022-2023 (potentiellement en raison de taux d'évapotranspiration plus élevés). Par conséquent, les facteurs catégoriques "Profondeur" ou "Section" restent indiscernables en termes de leur capacité explicative de la variance totale pendant ces périodes très sèches de 2022-2023, car les capteurs ont enregistré des valeurs de VWC très similaires (inférieures à 5%), y compris au "Fond" du substrat (c'est-à-dire à des profondeurs de 45cm). De telles conditions de sécheresse n'ont pas été observées en 2016-2018.

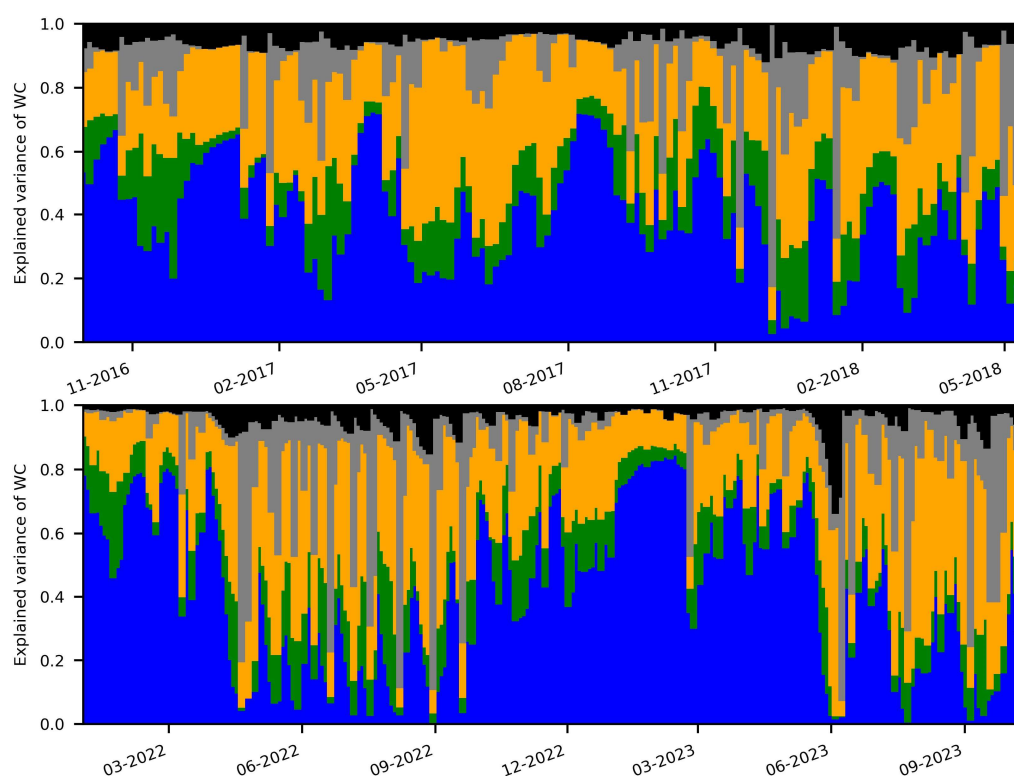


Figure 2. Percentage of VWC variance explained by categorical factors: “Depth” (blue), “Section” (green) interactions “Depth-Section” (yellow), unexplained variance “Unexpl. Var.” (grey) and measurement uncertainty “Meas. Uncer.” (black).

Les résultats montrent également que la variance des VWC expliquée par les variables "Profondeur", "Section" ou les interactions "Profondeur-Section" est majoritairement

supérieure à la variance résiduelle inexpliquée (en gris), ainsi qu'à la variance liée aux incertitudes de mesure (en noir) (Figure 2).

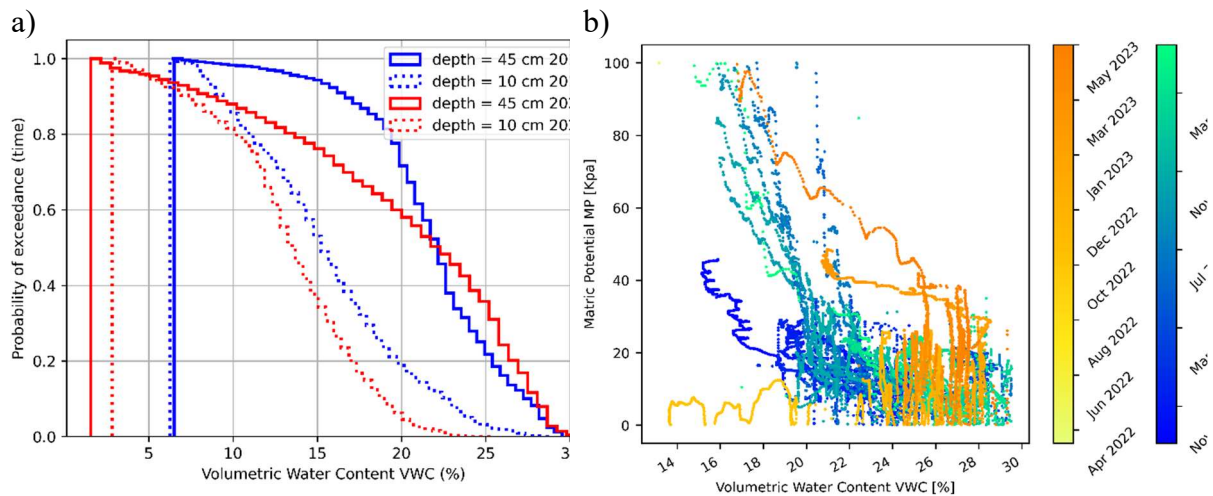


Figure 3. a) PECs of VWCs at a depth of 10cm and 45cm and b) evolution of the WHCC at depth of 45cm

D'après les résultats de la figure 2, une stratégie basée sur le regroupement des données des capteurs en fonction de leur emplacement vertical (c'est-à-dire à des profondeurs de 10 cm, 25 cm et 45 cm) est retenue. L'application d'un filtre médian pour fusionner les signaux de capteurs situés à la surface et au fond du substrat (c'est-à-dire à 10 cm et 45 cm, respectivement) a permis d'obtenir les résultats suivants : i) les PEC des valeurs de VWC à une profondeur de 10 cm et 45 cm (figure 3a) et ii) l'évolution du WHCC global au fond du substrat (profondeur de 45 cm) (figure 3b). Le WHCC n'est indiqué que pour le fond du substrat, car le capteur tensiométrique installé à une profondeur de 45 cm (Figure 1) a présenté les mesures les plus complètes et les plus fiables de MP pour 2017-2018 et 2022-2023.

Les résultats présentés dans la figure 3a pour la couche superficielle du substrat (profondeurs de 10 cm) permettent d'observer un déplacement vers la gauche des PEC des VWC, en comparant la période 2017-2018 à la période 2022-2023. Une explication de cette réduction pourrait être une augmentation assez homogène de la taille des macropores à la surface (par exemple, liée au développement des racines et/ou à l'augmentation de la teneur en matière organique), favorisant un drainage plus rapide de la couche. Ceci peut être confirmé par des tests de densité apparente (BD) et de conductivité à saturation (Ks) effectués sur des échantillons de sol prélevés à des profondeurs variant de 2 cm à 25 cm. Les résultats montrent une diminution moyenne de la BD entre les deux périodes 2017-2018 et 2022-2023 : de 1,7 g/cm³ (en 2017-2018) à 1,42 g/cm³ (en 2022-2023) en surface (prof < 20 cm), et bien moins prononcé de 1,94 g/cm³ (en 2017-2018) à 1,72 g/cm³ (en 2022-2023) vers des profondeurs intermédiaires. La valeur de Ks paraît augmenter de manière générale dans l'ouvrage en surface. Cela n'a pas pu être constaté en profondeur. Une augmentation de teneur en matière organique a également été constatée entre les deux périodes 2017-2018 à 2022-2023, concernant les couches superficielles de l'ouvrage, ce qui indique une augmentation de l'activité biologique dans cette zone.

En ce qui concerne la couche "Bottom" (à des profondeurs de 45 cm), des analyses de BD et Ks n'ont pas été menés pour les deux périodes d'analyse, mais des PEC élevées (>25%) sont observées pour des VWC la plupart du temps (Figure 3a). Les différences entre 2017-2018 et 2022-2023 dans cette couche "Bottom" pourraient s'expliquer par les sécheresses de 2022 (<https://www.brgm.fr/fr/actualite/article/secheresse-sans-precedent-cet-ete-2022>). En effet, les

valeurs d'évapotranspiration potentielle (ETP) (fournie par les données climatiques) et d'évapotranspiration réelle (ETR) (estimée à l'aide de capteurs de teneur en eau) restent plus élevées en 2022-2023 par rapport à 2017-2018, indiquant que les facteurs climatiques (c-à-d ETP) ont une influence dominante sur l'ETR par rapport à la disponibilité d'eau dans le substrat (teneur en eau), et qui paraît être garanti par la rétention d'eau dans les couches plus profondes. Cela voudrait dire que l'ouvrage de bio-rétention ne présente pas des périodes de stress hydriques importantes, malgré les conditions extrêmes de température et sécheresse observées en 2022-2023.

Les analyses proposées du WHCC dans la figure 3b suggèrent une évolution du milieu solide, augmentant sa capacité de rétention d'eau au cours des périodes analysées 2017-2018 et 2022-2023 et entre ces périodes, particulièrement dans la couche "Bottom" en profondeur. Ce résultat pourrait être la conséquence d'un ensemble de facteurs en interaction. D'une part, une réduction de la taille des pores pourrait avoir lieu dans la couche inférieure, causée par une précipitation potentielle de CaO_3 lixivié des sables calcaires dans les couches supérieures, ainsi qu'une migration des matières en suspension totales provenant du ruissellement routier et/ou une migration des particules d'argile des couches supérieures du sol, ce qui reste cohérent avec des études antérieures sur le même site (Kanso et al., 2018). Cependant, ce processus de migration pourrait ne pas obstruer complètement les pores dans le fond du substrat, car des mécanismes biophysiochimiques compensatoires peuvent contribuer à limiter la réduction des pores, en augmentant également la teneur en matière organique, ce qui conduit à la fin à des VWC plus élevés pour des MP similaires (figure 3b).

De ce point de vue, la réduction des fréquences de dépassement des VWC entre 2017-2018 et 2022-2023 peut probablement être attribuée à une augmentation des taux d'évapotranspiration due à un développement complet de la végétation, qui à son tour pourrait empêcher le colmatage des pores. Néanmoins, ces changements dans les propriétés du milieu filtrant solide peuvent avoir un impact sur la courbe d'étalonnage des capteurs VWC, pour lesquels il est recommandé de procéder à une vérification des capteurs et à un éventuel réétalonnage au cours des longues durées d'opération pour des prochaines expériences.

Dans l'objectif d'évaluer des potentiels changements dans le comportement hydrologique du système entre les périodes 2017-2018 et 2022-2023, des différences analysées sur la base de bilans de masse ont été proposées pour les deux périodes. Pour ce faire, des chroniques suivantes ont été employées : débits drainés à la sortie du système, débits de surverse, ETR et la pluie. Les chroniques ont été agrégées à un pas de temps journalier pour ces analyses. Un bilan de masse global est fourni dans la Figure 4. Les pertes sont calculées comme la différence entre le volume total d'entrée (pluie) et le volume total de sortie (ETR, drain et surverse).

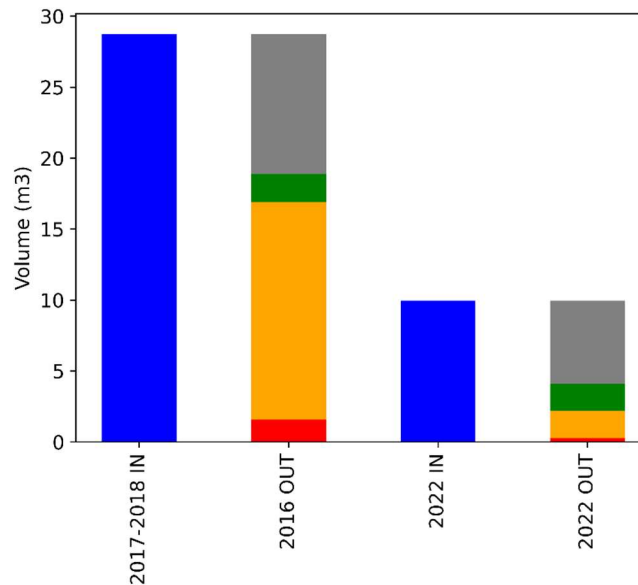


Figure 4. Bilan de masse global pour les périodes 2017-2018 et 2022-2023

La Figure 4 permet d'apprécier que les volumes de sortie du drain restent visiblement plus importants dans les bilans de masse par rapport aux autres sorties (ETR, drain ou surverse), même si les pertes restent majoritaires (possibles déversements latéraux dans le système). Nous pouvons également remarquer que le volume total d'entrée dans le système concernant la période 2017-2018 reste environ 3 fois supérieur au volume enregistré durant la période 2022-2023, dû à la différence de longueur entre les deux périodes (1.5 années pour 2017-2018 et 10 mois pour 2022-2023) et les sécheresses de 2022.

Deux constats supplémentaires peuvent être fournis : les pertes et l'ETR ont augmenté entre la période 2017-2018 et la période 2022-2023. Les pertes ont pu être reliées avec la pluie, où le taux de pertes en fonction du volume total de pluie paraît bien plus élevé en 2022-2023 par rapport à 2017-2018. Ceci probablement dû au développement de la végétation entre les deux périodes et donc la perte de capacité de stockage superficiel de la noue, ce qui finalement incite davantage les déversements latéraux par rapport à la surverse du système en aval.

Le bilan de masse dans la Figure 4 permet également de constater qu'une augmentation relative des volumes de drain par rapport aux surverses a eu lieu. C-à-d, mise à part les pertes et le déversement latéraux non-recensés, la distribution d'eau en sortie paraît avoir une tendance à se produire plus par le drain que par la surverse en aval du système, au fur à et mesure que le système vieillit. Cela peut également s'expliquer par la croissance et le développement de la végétation, qui en plus d'augmenter la capacité d'infiltration de l'ouvrage en superficie par l'augmentation de la macroporosité (donc de recharge des couches profondes et finalement de volumes drainés), peut ralentir le ruissellement dans la direction longitudinale de la noue vers la sortie en aval par surverse, en favorisant également cette infiltration en surface. Par la suite, les couches profondes, avec une capacité de rétention d'eau bonne Figure 3b, ont favorisé les flux d'évapotranspiration associées à la sécheresse de l'été 2022.

Conclusions et travaux futurs

Au cours des 7 années d'exploitation d'une noue de bio rétention destinée à traiter les eaux de ruissellement des routes, on a constaté des changements importants dans les propriétés du milieu solide et du comportement hydrologique du système. Un drainage plus rapide dans les couches supérieures (probablement dû au développement des racines) et une légère augmentation de la capacité de rétention d'eau au fond du substrat a été constaté. Ces

changements produisent des différences considérables sur le fonctionnement hydrologique du système, en termes de débits drainés, surverses et pertes d'eau. Cette étude montre le potentiel des suivis continue pour évaluer l'évolution des propriétés hydrodynamiques du milieu filtrant dans les systèmes de biorétention des eaux pluviales. Les études futures seront orientées vers la vérification des hypothèses proposées dans ce travail par d'autres approches expérimentales et de modélisation.

Références

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J. L. (2005). FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 131(1), 2-13.
- Bagarello, V., Di Prima, S., & Iovino, M. (2014). Comparing alternative algorithms to analyze the Beerkan infiltration experiment. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 724–736.
- Justusson, B. I. (2006). Median filtering: Statistical properties. *Two-Dimensional Digital Signal Processing II: Transforms and Median Filters*, 161-196.
- Kanso, T., Gromaire, M. C., Ramier, D., Dubois, P., Chebbo, G. (2020). An investigation of the accuracy of EC5 and 5TE capacitance sensors for soil moisture monitoring in urban soils-laboratory and field calibration. *Sensors*, 20(22), 6510.
- Kanso, T., Tedoldi, D., Gromaire, M. C., Ramier, D., Saad, M., 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.
- Métadier, M., Bertrand-Krajewski, J. L. (2012). The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes. *Water research*, 46(20), 6836-6856.
- Wang, M., Zhang, D., Wang, Z., Zhou, S., Tan, S.K., (2021). Long-term performance of bioretention systems in storm runoff management under climate change and life-cycle condition. *Sustain. Cities Soc.* 65, 102598.
- Yilmaz, D., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R., Deneele, D., & Legret, M. (2010). Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. *Vadose Zone Journal*, 9, 107–116.