

Nouveau système végétalisé de traitement des eaux de chaussées (SMACC) : développement et test *in situ* de la performance

New green runoff waters treatment system (SMACC): *in situ* monitoring of the performance

Bruno Spahni¹, Ana Slijepcevic¹, Manuel Froidevaux¹, Jean-Marc Ribl¹, Pascal Boivin², Véronique Guiné², Fabienne Favre Boivin^{1*}.

¹ Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg, Pérolles 80, CP 32, 1705 Fribourg, Suisse. (fabienne.favre@hefr.ch)

² Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture de Genève, Route de Presinge 150, 1254 Jussy, Suisse.

*Auteur correspondant

RÉSUMÉ

La densification des zones urbaines pousse à optimiser les éco-fonctions de l'espace disponible. Un nouveau système de traitement des eaux de chaussée sous forme de mur végétalisé modulable, appelé SMACC, formé de 10 cassettes installées en série, a été développé dans cet esprit. En plus d'épurer les eaux de ruissellement de chaussée, il contribue à l'amélioration du climat urbain, à l'ornementation de la ville et à la rétention des eaux. Son substrat épurateur est réalisé avec des déchets verts pyrolysés (biochars). Un suivi des performances du système est réalisé *in situ* en grandeur réelle sur une année sur une chaussée de 300m² parcourue par 16'000 véhicules par jour en moyenne: les capacités épuratives (f_{abat}) et hydrauliques (η_{hyd}), la résistance de la végétation et l'évolution des performances au cours du temps sont mesurées. η_{hyd} est quantifiée par des mesures de débits et de stockage d'eau, f_{abat} par turbidimétrie. L'évolution des performances au cours du temps est analysée, en particulier par les mesures de perméabilité du substrat. Il apparaît que les résultats tant hydrauliques qu'épuratifs sont proches des valeurs limites légales et que les performances du système de traitement sont conservées au cours du temps, bien que la perméabilité à saturation du substrat diminue dans les modules en tête de série.

ABSTRACT

Urban densification prompts us to optimize the eco-functions of the space available. With that in mind, a new runoff water treatment system called SMACC was developed in the form of a modular green wall consisting of 10 cassettes disposed spatially in series. In addition to contributing to runoff water treatment, it improves the urban climate, the ornamentation of the city as well as water retention. The purifying substrate is made of pyrolyzed organic waste (biochars). Full-scale monitoring of the system's performance is conducted *in situ* over a one-year period on a 300-square-meter surface traveled by an average of 16'000 vehicles a day: purification (f_{abat}) and hydraulic (η_{hyd}) capacities, vegetation resistance, and changes in performance over time are measured. η_{hyd} is quantified by measuring flow rates and water storage, while f_{abat} is quantified by turbidimetry. Changes in performance over time are analyzed, in particular by measuring the substrate's permeability. It appears that both hydraulic and purification results are close to the legal limits and that the treatment system's performance is maintained over time although the substrate's saturation permeability decreases in the first modules.

MOTS CLÉS

Biochars, suivi *in situ*, technosol végétalisé épurateur, traitement des eaux de chaussée, turbidimétrie

1 INTRODUCTION

L'infiltration et le traitement des eaux de chaussées dans des sols biologiquement actifs fait partie des directives imposées par la Confédération Suisse (OFEV 2002 et OFROU 2013), or en milieu urbain, ni sols, ni surfaces d'infiltration ne sont disponibles. Proposer une infiltration sur des structures verticales et végétalisées permet de garantir le traitement des eaux de ruissellement dans des sites exigus mais aussi d'offrir des prestations ornementales appréciables en milieu dense.

La mise au point d'un technosol porteur, épurateur (réactivité chimique et physique), infiltrant (perméabilité élevée) et végétalisable fait partie des enjeux du développement de ces nouveaux systèmes de traitement des eaux de chaussées.

Le système SMACC est développé pour répondre à ces différentes exigences. Il permet d'améliorer le climat urbain grâce à sa végétation tout en traitant les eaux de chaussées et de valoriser des déchets verts grâce à l'utilisation de biochars et de compost. Les différentes fonctions – substrat de végétaux et haute perméabilité par exemple – peuvent entrer en contradiction et une optimisation dans le développement du substrat et du système est nécessaire.

Un banc d'essai a été construit *in situ* sur un axe de trafic important pour un test en grandeur nature d'une année. Cette étude présente la performance hydraulique et de dépollution du système ainsi que leurs évolutions au cours du temps. L'aspect ornemental et le comportement de la végétation sont également passés en revue. La qualité épurative du système est basée sur la mesure de la turbidité en continu ainsi que sur des prélèvements réguliers pour mesurer les matières en suspension (MES).

2 MATERIEL ET METHODE

2.1 Système SMACC

Le système épuratif SMACC est constitué de modules sous formes de cassettes végétalisées (*Figure 1*) qui peuvent être réalisées en bois, béton ou inox et contiennent un substrat filtrant constitué d'un mélange novateur de biochar (connus pour leur forte réactivité et leur large spectre poral) et de compost. Le compost est composé de 15% de compost déjà mûr (originaire d'un précédent andain), 25% de fumier de vache et 60% de déchet vert, herbe et paille. Le biochar est ajouté et composté durant au moins 8 semaines.

Les critères de sélection des plantes ont été : robustesse, faible entretien et enracinement profond de façon à entretenir la structure du substrat. Elles n'ont pas de propriétés de phytoextraction, le traitement de l'eau est effectué par le substrat.



Figure 1. Cassettes végétalisées.

Le substrat est composé de plus de 30% d'éléments grossiers (>2mm) et la texture des éléments fins correspond à celle d'un sol sablo-limoneux. Les propriétés physiques obtenues par l'analyse du retrait montrent une porosité supérieure à 70%, une teneur en air à saturation supérieure à 10% et une réserve en eau utile pour les végétaux de plus de 25%.

Les propriétés hydrodynamiques du substrat sont évaluées en laboratoire par traçage des écoulements de l'eau au KBr (0.2 mg/L en entrée) et analysées en sortie par électrode spécifique ISE Br 60 (Schott Instruments) sur des colonnes emplies de substrat et soumises à une charge d'eau constante. Les courbes de percée obtenues montrent que la part des écoulements préférentiels est inférieure à 10%. Le temps de séjour mesuré sur ces colonnes est supérieur à 10 minutes, temps suffisant pour assurer les réactions d'adsorption entre le substrat et les polluants routiers. La conductivité hydraulique à saturation évaluée directement sur les cassettes à partir d'un dispositif double-anneau indique une valeur initiale très rapide supérieure à 3600 mm/h.

L'évolution de la perméabilité du substrat est mesurée en laboratoire sur colonnes. Une eau de chaussée artificielle reconstituée à partir de boues prélevées dans les sacs de route (40% des particules dont le diamètre est inférieur à 20 μm ; 40% dont le diamètre est compris entre 20 et 60 μm et 20% dont le diamètre est compris entre 60 et 125 μm) est infiltrée sur les colonnes.

Les faces des cassettes sont végétalisées pour à la fois favoriser une bonne structuration du substrat ainsi qu'un aspect ornemental. L'eau s'y écoule par le dessus avec une mise en charge suivant le débit et en ressort épurée par la face inférieure.

2.2 Mise en œuvre du système

Les eaux de ruissellement d'un bassin versant de 300m² d'une route accueillant 16'000 véhicules/jour sont conduites gravitairement sur 10 cassettes (C1 à C10) positionnées en série. Le substrat est composé à 30% de biochars dans les cassettes impaires et à 50% dans celles paires. Les cassettes d'une dimension de 150x20x50cm sont végétalisées sur leurs deux grandes faces latérales et du gravier recouvre leur surface pour éviter la mise en suspension du substrat. Les petites faces (amont et aval) sont étanches alors que les grandes faces (latérales) sont réalisées en caillebottis doublé d'un géotextile perméable destiné à retenir le substrat tout en étant traversé par la végétation. La surface d'infiltration est de 0.3m² par cassette (3m² au total). Le fond est recouvert d'une couche de 2cm de billes d'argile expansée. L'eau est déversée à la surface de la première cassette (Figure 2), si le débit entrant est supérieur à la capacité d'infiltration de celle-ci, l'eau monte en charge de 4.5 cm puis déborde dans la seconde, ainsi de suite avec un débit croissant. La perméabilité du substrat étant très élevée, l'eau s'écoule verticalement dans les cassettes. Les cassettes contiennent une végétation et un substrat différents afin de tester plusieurs configurations et atteindre l'optimum des différentes fonctions.

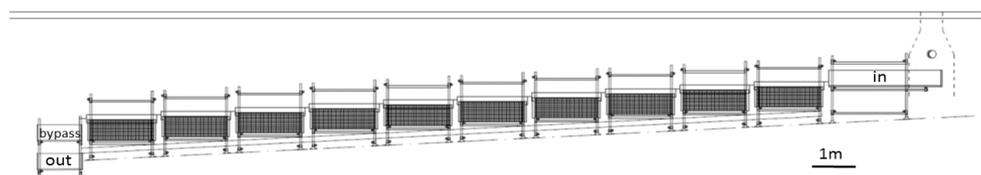


Figure 2. Vue en coupe du système (cassettes en cascade). L'eau s'écoule de droite à gauche.

2.3 Instrumentation de mesure

La pluviométrie est mesurée à l'aide d'un pluviomètre à augets basculant PluvioMADD. Le début et la fin des événements sont déterminés selon la méthodologie Bertrand-Krajewski *et al.* (2000). Les débits entrants, sortants et surversés sont mesurés par sondes à ultrason (PiL) sur des déversoirs triangulaires à paroi mince. La mesure est enregistrée toutes les 10s et une moyenne glissante appliquée sur 5 minutes. Le débit est ensuite calculé selon la formule de Kindsvater et Carter (1957).

$$Q = \mu \cdot \frac{8}{15} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \sqrt{2g} \cdot (h + K_h)^{5/2}$$

Avec $\mu = 0.7552$ et $K_h = 1.775$ mm (Selon AFNOR NF X 10-311. 1983).

La teneur en eau des cassettes ($\Theta(h)$) est estimée par sonde Watermark positionnée au centre de chaque cassette. $\Theta(h)$ est approximée par la formule de Van Genuchten (1980).

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$

Avec h = pression de succion d'eau, n = mesure adimensionnelle de la taille des pores, θ_r = teneur en eau résiduelle, α = inverse de la charge capillaire critique et θ_s = teneur en eau à saturation.

Durant chaque événement, la différence entre la valeur initiale et la valeur finale du stock d'eau des cassettes est sommée pour obtenir le stock total. Ce mode de calcul peut surestimer ou sous estimer le stock d'eau en fonction de l'importance des volumes écoulés. En effet, le substrat au centre de la cassette n'est pas forcément au même taux d'humidité qu'à la surface ou qu'au fond de la cassette, en particulier pour les événements pluvieux générant de petits volumes de ruissellement.

La mesure de la turbidité pour déterminer en continu la concentration en MES est fiable selon Lacour *et al.* (2010). Elle est mesurée avec des sondes (CUS51D Endress+Hauser) placées en entrée, sortie et surverse du système selon la méthodologie présentée par Bertrand-Krajewski *et al.* (2010) et Favre Boivin *et al.* (2013). Ces sondes mesurent la teneur en particules par néphélométrie à l'aide d'un rayonnement à 860 nm selon la norme AFNOR EN ISO 7027. Les sondes sont placées horizontalement, perpendiculaires à l'écoulement et maintenues en permanence dans la lame d'eau. Afin d'amenuiser leur encrassement, de l'air est soufflé devant les capteurs toutes les 20 minutes. Les sondes ont été calibrées à l'aide d'un standard certifié (Amco Clear) deux fois au cours de l'étude, elles sont nettoyées manuellement toutes les deux semaines. On quantifie l'encrassement des capteurs en les plongeant successivement encrassés puis propres dans l'eau distillée.

Le traitement du signal est basé sur la méthode décrite par Aumond *et al.* (2006). Les filtres suivants sont appliqués dans l'ordre : 1. Soustraction de la valeur de l'encrassement (linéairement entre deux nettoyages) ; 2. Remplacement des valeurs par la médiane si le minimum glissant est inférieur de 1.5 FNU à la médiane glissante sur 5 minutes ; 3. Minimum glissant sur 5 minutes ; 4. Médiane glissante sur 5 minutes ; 5. Suppression des événements où l'encrassement est supérieur à 10 FNU.

Parallèlement au mesurage en continu de la turbidité, un échantillonnage est réalisé pour corréler celle-ci à la MES. L'échantillonnage asservi à la pluviométrie est réalisé en entrée et en sortie durant les événements dans 24 bouteilles en PE-HD au moyen de préleveurs automatiques ISCO 6712. Les échantillons sont récupérés dans les 24 heures et filtrés à l'aide de filtres en cellulose mixte d'une porosité de 0.45 μm (Whatman N° 10401612). Les filtres sont séchés 24 heures à 105°C et la pesée du filtrat permet de calculer la teneur en MES en fonction du volume filtré.

2.4 Calcul des performances

2.4.1 Calcul de la performance hydraulique

La capacité hydraulique (η_{hyd}) du système est calculée par la formule suivante et permet de vérifier le potentiel d'infiltration pour le bassin versant étudié.

$$\eta_{hyd} = 1 - \frac{\sum V_{bypass}}{\sum V_{in}}$$

Où V_{bypass} est le volume n'ayant pas pu être traité par le système lors d'un événement et V_{in} le volume entrant pour ce même événement.

2.4.2 Calcul de la performance de dépollution

L'efficacité du traitement f_{abat} est calculée par différence entre la masse de pollution entrante et sortante du système en 10 secondes (Δt), normée par la quantité de pollution entrante. La masse de pollution se calcule en multipliant la concentration en MES entrante ou sortante $MES_{in/out}$ par $Q_{in/out}$ sur Δt . La concentration en continu de la MES est déterminée par une relation entre la MES des échantillons et la turbidité au moment du prélèvement.

$$f_{abat} = \frac{\sum MES_{in} \cdot Q_{in} \cdot \Delta t - \sum MES_{out} \cdot Q_{out} \cdot \Delta t}{\sum MES_{in} \cdot Q_{in} \cdot \Delta t}$$

3 RESULTATS

3.1 Statistiques des événements pluvieux enregistrés

Le suivi du système commencé en avril 2015 a permis d'enregistrer 67 événements pluvieux jusqu'à octobre 2015. Ils couvrent une gamme étendue d'intensités, de durées et de périodes antécédentes sèches. Ils offrent ainsi un panel de conditions représentatif d'une année météorologique.

3.2 Efficacité hydraulique

Lors de la conception du système, celui-ci a été dimensionné pour pouvoir traiter au minimum 90% du volume annuel d'eau entrant. Sur les 67 événements pluvieux observés, seuls deux n'ont pu être entièrement traités durant lesquels respectivement 31 et 6 litres ont surversés. La capacité hydraulique globale du système se monte à 99.96%. Leur intensité dépassait 20mm/h. Bien que l'eau s'écoule dans la plupart des cas verticalement, des chemins préférentiels par les faces végétalisées ont pu être observés.

3.3 Efficacité dépollutive

3.3.1 Relation Turbidité – MES

Une régression linéaire permet d'établir la relation entre la turbidité et la MES. L'ordonnée à l'origine est forcée supérieure ou égale à zéro afin de supprimer les possibles valeurs négatives de MES. Le R^2 vaut respectivement 0.81 et 0.84 pour l'Entrée/Surverse et la Sortie.

3.3.2 Bilan durant un événement pluvieux

L'étude de la pluie de fin d'été (n°56) d'intensité moyenne et de durée importante permet d'illustrer la réactivité et l'efficacité du système durant un événement. La diminution de la turbidité entre l'entrée et la sortie du système est de l'ordre de deux tiers. Il y a un écrêtage des pointes de débit et un décalage de l'ordre de 3 minutes entre les débits de pointe en entrée et en sortie. La *Figure 3* permet de comparer le flux de MES en entrée et en sortie du système. L'abattement de MES est ici de 71.9%.

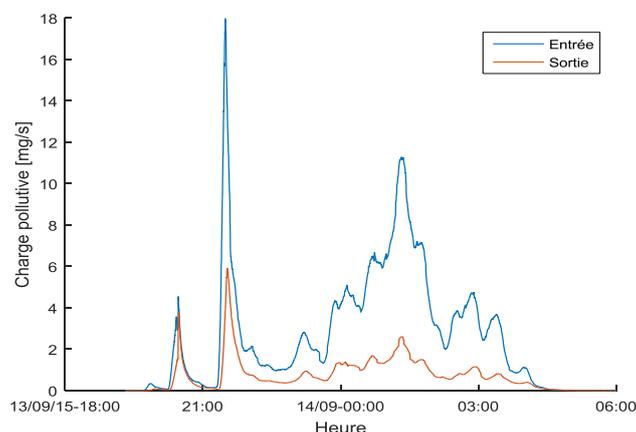


Figure 3. Charge polluante en entrée et sortie du système, pluie n°56

3.4 Evolution des performances au cours du temps

3.4.1 Performance hydraulique

Les événements pluvieux relevés ne nous permettent pas de mesurer un impact du temps sur l'efficacité hydraulique du système, mais on n'observe pas d'augmentation des débordements au cours du temps.

3.4.2 Performance épurative

Le système a une efficacité moyenne d'élimination de la MES de 56%. Celle-ci varie beaucoup d'un événement à l'autre mais aucune variation tendancielle de l'efficacité du système au cours du temps n'est constatée.

3.5 Evolution du substrat et de la végétation

Des tests en laboratoire réalisés sur colonnes montrent qu'après un apport équivalent à une année d'eau de ruissellement avec une charge moyenne en MES de 500 mg/L la perméabilité à saturation reste toujours supérieure à 100 mm/h. De plus, aucun échantillon d'eau prélevé en sortie de colonne n'a révélé la présence de métaux (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb et Zn) ou de HAP et l'essentiel des métaux (de 50 à 90%) est retrouvé dans les 10 premiers centimètres des colonnes.

Conformément aux résultats de laboratoire, la perméabilité *in situ* diminue dans les premières cassettes, les plus sollicitées (*Tableau 1*).

Tableau 1. Evolution du Ksat des cassettes après neuf mois de mise en place du système.

Date	Volume écoulé [m ³]	Ksat [mm/h]					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
01.08.2014	0	4961	3301	4892	3904	-	-
07.05.2015	152	69	161	236	493	5142	4500

Les espèces de plantes suivantes ont été implantée avec succès sans nécessité d'entretien : *Aster alpinus*, *Geranium sanguineum*, *Luzula silvatica*, *Carex morrowii* et *Sedum kamtschaticum*.

4 CONCLUSION

Le système SMACC montre une bonne efficacité de traitement des volumes et de la pollution. De plus, le substrat développé permet l'implantation durable de divers types de végétations ne nécessitant pas d'entretien. Au cours du temps, la capacité d'infiltration des quatre premières cassettes diminue, mais le système utilisé en série permet de traiter plus du 90 % des événements pluvieux. Une amélioration de la performance d'épuration est envisageable en forçant le chemin préférentiel de l'eau par le centre du substrat. De plus il est possible de retrouver la capacité d'infiltration initiale des cassettes en remplaçant les 10 premiers centimètres de substrat lors d'un curage.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR. Mesure de débit de l'eau dans les canaux découverts au moyen de déversoirs en mince paroi. NF X 10-311, Septembre 1983, 37p.
- AFNOR Qualité de l'eau : Détermination de la turbidité, NF EN ISO 7027, (2000-03).
- Aumond, M., & Joannis, C. (2006). Mesure en continu de la turbidité sur un réseau séparatif eaux usées: mise en œuvre et premiers résultats. Houille blanche, 4, 121.
- Bertrand-Krajewski, J. L., Joannis, C., Chebbo, G., Ruban, G., Métadier, M., & Lacour, C. (2010). Comment utiliser la turbidité pour estimer en continu les concentrations en MES et/ou DCO. Techniques Sciences Méthodes, 105(1/2), 36-46.
- Bertrand-Krajewski, J. L., Laplace, D., Joannis, C., & Chebbo, G. (2000). Mesures en hydrologie urbaine et assainissement. Tec et Doc, Paris, France, 794 p. ISBN 2-7430-0380-4.
- Favre Boivin, F., Ribi, J. M., Moreillon, L., & Rast, M. (2013). Méthode de Test de la performance d'installations ponctuelles de traitement des eaux de ruissellement de chaussée par turbidimétrie. NOVATECH 2013.
- Lacour, C., Chebbo, G., & Joannis, C. (2010). Évaluation de flux de polluants dans un réseau unitaire à partir de mesures en continu de turbidité. Techniques Sciences Méthodes, (1/2), 47-53.
- OFROU, 18005f, (2013 V1.30), Traitement des eaux de chaussée des routes nationales, 94p.
- OFEV, (2002). Instructions - Protection des eaux lors de l'évacuation des eaux des voies de communication. Berne: Office fédérale de l'environnement et du paysage, 57p