

RESUME

Cette thèse eut comme objet d'étude deux filtres plantés de roseaux (FPR) dans le Bois de Boulogne à Paris, construits en 2020 dans le cadre du projet LIFE-ADSORB, pour le traitement du ruissellement du boulevard périphérique parisien. Les travaux de thèse ont exploré le devenir des micropolluants organiques (MPO) et métalliques (ETM) et les communautés microbiennes se développant dans les FPR, pour perfectionner, en travers de la modélisation, le design de ce type de filtre dans le futur. Pour améliorer le traitement des polluants dissous, une couche d'un substrat innovant, le Rainclean (Rc), a été ajoutée dans l'un des deux FPR. L'approche méthodologique inclut d'une part le suivi *in-situ* de l'évolution spatio-temporelle des FPR, afin de caractériser la dynamique d'accumulation de sédiments, ETM et MPO, et la colonisation des communautés microbiennes sur deux ans. D'autre part, des essais de biodégradation en colonnes de MPO émergents sélectionnés (bisphénol A BPA, 4-nonylphénol 4-NP et 4-octylphénol 4-OP) ont été réalisés pour alimenter un modèle des FPR et comprendre le rôle des communautés bactériennes.

L'étude *in-situ* a révélé une forte hétérogénéité temporelle et spatiale (horizontale et verticale) des FPR, attribuable à une charge hétérogène d'eaux contaminées, plus importante en amont. L'accumulation de sédiments et de micropolluants particulaires et hydrophobes (Cd, Cu, Pb, Zn, 4-NP, hydrocarbures aromatiques polycycliques et indices hydrocarbures) était constatée principalement en surface et en amont des FPR. Les ETM plus mobiles (Ni, Cr) étaient plutôt accumulés en aval et en profondeur, influencés par des apports des eaux claires, qui remobilisent les ETM. Les MPO présentaient une accumulation plus faible, avec un bilan négatif sur deux ans, excepté pour le 4-NP, indiquant des processus de dégradation microbienne. Le sédiment semble adsorber les MPO lié à ses forts taux de carbone organique. Le Rc n'a pas révélé une efficacité accrue dans l'accumulation des micropolluants à l'échelle des FPR, plus de temps semble nécessaire pour conclure sur son efficacité. L'alimentation des FPR en eaux claires a significativement impacté les processus de rétention et d'élimination des ETM, l'impact était moins visible pour les MPO. Le faucardage de la végétation a un faible impact sur le flux sortant des micropolluants, ne représentant que quelques pourcents du stock au maximum. Les processus de rétention dominants dans les FPR étaient ainsi la sédimentation, la filtration, et l'adsorption (moins quantifiable pour les ETM). Les processus d'élimination des MPO étaient la biodégradation, l'absorption par les plantes et la remobilisation par les eaux claires tandis que pour les ETM, la remobilisation puis l'absorption par les plantes étaient les principaux processus.

Les apports hétérogènes ont influencé le développement des communautés microbiennes, surtout dans le sable de surface. En amont, les communautés étaient moins nombreuses ou similaires à l'aval, et présentaient un potentiel fonctionnel et une diversité génétique réduits ; elles étaient cependant métaboliquement plus actives, liées aux concentrations plus élevées de micropolluants, carbone organique et azote. Ces résultats indiquent une spécialisation des communautés microbiennes au fil du temps, en corrélation avec les apports d'eaux de ruissellement, particulièrement dans le sable de surface. Le sédiment se distinguait comme le solide le plus différencié en termes de communautés et d'activités microbiennes. La filtration des matières en suspension par le sable de surface a modifié la structure et l'activité des communautés, les rapprochant progressivement de celles du sédiment avec le temps. Enfin, l'activité microbienne était concentrée dans les premiers cm des FPR, dans le sédiment et sable de surface.

Les essais de biodégradation ont révélé que l'activité microbienne était le principal facteur de dégradation des MPO dans le sable, Rc et sédiment. Le BPA était le composé le plus rapidement dégradé avec un temps de demi-vie d'environ 3 jours, le 4-NP et 4-OP présentaient des vitesses similaires. La végétation a positivement influencé la biodégradation, augmentant les pourcentages finaux de dégradation pour le sable et Rc et réduisant les temps de demi-vie de dégradation des MPO dans le sable. Les différences physico-chimiques entre les substrats ont conduit à des communautés microbiennes distinctes, toutes capables de dégrader efficacement chaque MPO avec une faible modification de leur structure. La présence de végétation a plus fortement impacté la structure des communautés. Bien que les résultats suggèrent un faible risque d'accumulation des MPO dans les FPR en raison de leur dégradation, les sédiments et le Rc non planté présentaient des teneurs résiduelles élevées, indiquant un risque d'accumulation à long terme qui nécessite une surveillance continue.

Mots-clés : Filtre planté de roseaux, micropolluants, ruissellement urbain, biodégradation, diversité microbienne, activité microbienne.

ABSTRACT

This thesis studied two reed filters (RBF) in the Bois de Boulogne in Paris, built in 2020 as part of the LIFE-ADSORB project, to treat runoff from the Paris ring road. The thesis work explored the fate of organic (OMP) and metallic (TME) micropollutants and the microbial communities developing in RBF, to perfect, through modeling, the design of this type of filter in the future. To improve the treatment of dissolved pollutants, a layer of an innovative substrate, Rainclean (Rc), was added to one RBF. The methodological approach includes *in-situ* monitoring of the spatio-temporal evolution of the RBFs, to characterize the dynamics of sediment, TME and OMP accumulation and the colonization of microbial communities over two years. In addition, biodegradation experiments of selected emerging MPOs (bisphenol A BPA, 4-nonylphenol 4-NP and 4-octylphenol 4-OP) were carried out to feed an RBF model and understand the role of bacterial communities.

The *in-situ* study revealed strong temporal and spatial (horizontal and vertical) heterogeneity of RBF, attributable to heterogeneous load of contaminated water, greater upstream. Accumulation of sediments and particulate and hydrophobic micropollutants (Cd, Cu, Pb, Zn, 4-NP, polycyclic aromatic hydrocarbons and hydrocarbon indices) was mainly observed at the surface and upstream of RBF. More mobile TME (Ni, Cr) tended to accumulate downstream and at depth, influenced by inflows of clear water, which remobilize TME. OMP showed less accumulation, with a negative balance over two years, except for 4-NP, indicating microbial degradation processes. Sediment seems to adsorb OMP due to its high organic carbon content. The Rc did not reveal an increased efficiency in the accumulation of micropollutants at the RBF scale, more time seems necessary to conclude on its efficiency. Feeding clear water to the RBF had a significant impact on TME retention and elimination processes, while the impact was less visible for OMP. Vegetation cutting had little impact on the outflow of micropollutants, accounting for only a few percent of the stock. The dominant retention processes in RBF were sedimentation, filtration and adsorption (less visible for TME). Removal processes for OMP were biodegradation, plant uptake and remobilization by clear water, while for TME, remobilization followed by plant uptake were the main processes.

Heterogeneous inputs also influenced the development of microbial communities, especially in the surface sand. Upstream, communities were less numerous or similar to downstream, with reduced functional potential and genetic diversity; they were, however, metabolically more active, linked to higher concentrations of micropollutants, organic carbon and nitrogen. These results indicate a specialization of microbial communities over time, correlated with runoff inputs, particularly in the surface sand. Sediment was found to be the most differentiated solid in terms of microbial communities and activities. Filtration of suspended matter by the surface sand modified community structure and activity, gradually bringing them closer to those of the sediment over time. Finally, microbial activity was concentrated in the first few cm of the RBF, in the sediment and in the surface sand.

Biodegradation experiments revealed that microbial activity was the main factor in OMP degradation in sand, Rc and sediment. BPA was the most rapidly degraded compound, with a half-life of around 3 days, while 4-NP and 4-OP showed similar rates. Vegetation positively influenced biodegradation, increasing final degradation percentages for sand and Rc and reducing degradation half-lives for OMP in sand. The physico-chemical differences between the solids led to distinct microbial communities, all capable of efficiently degrading each OMP with little modification of their structure. The presence of vegetation had a greater impact on community structure. Although the results suggest a low risk of OMP accumulation in RBF due to their biodegradation, sediments and unplanted Rc showed high residual levels, indicating a long-term accumulation risk that requires continuous monitoring.

Keywords: Stormwater reed bed filter, micropollutants, biodegradation, microbial diversity, microbial activity.