



ACTION N°3.4 : DEVENIR DES MICROPOLLUANTS PIEGES DANS LES SUBSTRATS - INTERACTIONS DIVERSITE MICROBIENNE ET BIODÉGRADABILITE DES MICROPOLLUANTS ORGANIQUES

RAPPEL DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS

Le comportement des micropolluants organiques piégés dans le sol des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales (accumulation, dégradation, relargages possibles) reste encore peu documenté (DiBlasi et al., 2009; Le Fevre et al., 2015). De rares études ont été menées sur la biodégradation des hydrocarbures et des HAP dans le sol des ouvrages de filtration/infiltration (LeFevre et al., 2012a, 2012b; Leroy et al., 2015). Elles soulignent le lien existant entre la nature du couvert végétal, la diversité et les fonctionnalités des communautés microbiennes en place et le devenir des polluants organiques.

L'importance de ce phénomène de biodégradation pour différents micropolluants organiques, l'analyse des facteurs qui le conditionnent, et ses conséquences en termes de transfert du polluant ciblé ou de ses produits de dégradation restent insuffisamment documentés à ce jour. Une meilleure connaissance des communautés microbiennes se développant dans les ouvrages et une meilleure compréhension des processus microbiens en jeu sont pourtant indispensables pour améliorer la conception et la gestion de ces ouvrages.

L'objectif de cette action est d'évaluer le potentiel de dégradation de micropolluants organiques issus des ruissellements urbains par les communautés microbiennes autochtones présentes dans les sols/substrats des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales.

Sur la base d'expérimentations en batch et en colonnes de laboratoires, complétées par de l'acquisition de données en site réel, cette action doit permettre de paramétrer un modèle de transport réactif de micropolluants organiques afin d'évaluer le devenir sur le long terme (accumulation, dégradation, transfert) de ces polluants dans le sol des ouvrages.

STRUCTURATIONS DU TRAVAIL, REALISATIONS ET PRINCIPAUX RESULTATS

STRUCTURATIONS DU TRAVAIL ET REALISATIONS

L'essentiel des travaux réalisés dans le cadre de cette action s'inscrivent dans le cadre de la thèse d'Andréa Oudot (2020-2024) intitulée « **Devenir des micropolluants organiques dans les sols des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales : interactions diversité microbienne et biodégradabilité des micropolluants** ». D'autres travaux réalisés dans le cadre de stages de Master 2 (Julia Roux, 2019 ; Elodie Bettembos, 2022) sont venus compléter le travail effectué.

L'objectif principal des investigations d'Andréa Oudot est d'étudier le potentiel de biodégradation de micropolluants organiques (BPA et Alkylphénols) par les microorganismes du sol de différents ouvrages. Les ouvrages étudiés sont des ouvrages de filtration/infiltration de ruissellements urbains qui ont été sélectionnés en fonction de la texture de leur sol, de leur durée de mise en service, du type de polluants auxquels ils sont soumis. Ce travail visait donc à mettre en lien ces capacités de biodégradation avec les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols des ouvrages et notamment la structure et la diversité des communautés microbiennes autochtones.

Le travail de thèse qui a servi de base à ce document de synthèse est organisé en quatre chapitres. Le **premier chapitre** consistait en un travail conséquent de synthèse bibliographique s'articulant autour de quatre parties essentielles. La première partie fait le point sur les micropolluants, en particulier les micropolluants organiques. La deuxième partie décrivant les ouvrages, leur diversité, leur fonctionnement. La troisième partie fait le point sur la microbiologie avec un rappel sur ses méthodes d'études et une synthèse des travaux regroupant l'étude des microorganismes ayant un potentiel de biodégradation des micropolluants, avec la diversité génétique des communautés impliquées. Enfin la quatrième partie est consacrée aux mécanismes de biodégradation des micropolluants, des exemples de voies de biodégradation et les paramètres biotiques et pédoclimatiques pouvant l'influencer.

Le **deuxième chapitre** se focalise sur la méthodologie analytique utilisée ainsi que sur le descriptif des différentes expérimentations réalisées. Trois grandes parties constituent ce chapitre. La première concerne les analyses physico-chimiques des sols (étude du pH, de la matière organique, de la texture, de la capacité d'échange cationique, de la capacité au champ), la deuxième concerne la partie microbiologique (étude de la biomasse, de l'activité et des diversités microbiennes fonctionnelles et génétiques), la dernière partie concerne les cinétiques de biodégradation de 3 micropolluants organiques représentatifs des eaux de ruissellement (BPA, NP et OP) en batch liquide et en colonnes réalisées à partir des sols des ouvrages étudiés dans des conditions simulant celles rencontrées sur le terrain.

Le **troisième chapitre** de la thèse est dédié aux résultats. Il décrit d'une part l'efficacité des microorganismes des sols des différents ouvrages de à biodégrader le BPA, le NP et l'OP. Une première partie traite des capacités de biodégradation de microorganismes extraits des sols étudiés lors de cinétiques dans des réacteurs batch liquide et la deuxième partie lors de cinétiques en colonnes où les microorganismes ont été maintenus dans leur environnement sol. Un autre volet de ce chapitre est consacré à un ouvrage particulier, le site de Compans. L'ensemble des résultats obtenus sur ce site au cours du temps et en fonction des saisons ont été regroupés afin de monter l'évolution des propriétés physicochimiques et biologiques des substrats et leur impact éventuel sur les performances de biodégradation de micropolluants. Des préconisations quant au diagnostic de l'état fonctionnel de cet ouvrage ainsi que les modes de sa gestion ont constitué également un objectif à atteindre.

UNE SELECTION DES PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS

Biodégradation des micropolluants organiques (BPA, 4-NP et OP) par les communautés microbiennes autochtones dans les sols des ouvrages de gestion des eaux pluviales

Ce volet de l'étude aborde le devenir des micropolluants organiques (MP) dans les sols des ouvrages de gestion des eaux pluviales et explore l'interaction entre les populations microbiennes autochtones et la biodégradation des MP. Trois sites ont été choisis (Campans, Dourdan, Vitry) en fonction de la composition du sol, de la proximité des eaux de ruissellement, de l'âge de la structure et de la couverture végétale.

Cette première étude cinétique menée en conditions contrôlées a permis de comparer les capacités de biodégradation du bisphénol A, du nonylphénol et de l'octylphénol en utilisant des micro-organismes autochtones extraits des sols étudiés. Les résultats obtenus ont révélé des efficacités de biodégradation variables entre les sols d'un même site pour un micropolluant (MP) donné. Pour les sols du site de Vitry, la biodégradation du BPA varie de 20% à 100% et pour les sols du site de Compans, la biodégradation du NP et de l'OP varie de 0% à 100%. Les pourcentages de biodégradation diffèrent également d'un site à l'autre, le site de Dourdan en amont présentant une biodégradation du BPA de 99 %, tandis que la rigole du site de Compans n'atteint que 54 %. Sur le plan microbiologique, la cinétique a montré une diminution de la diversité de la communauté bactérienne dans les sols enrichis en MP par rapport aux témoins. Les familles de bactéries méthylophiles ont dominé en présence de MP. La biodégradation effective des MP est corrélée à la dominance des Alphaproteobacteria et Betaproteobacteria (par exemple Methylophilaceae, Methylocystaceae...), tandis que les sols à faible biodégradation sont dominés par les Gammaproteobacteria et Actinobacteria (par exemple la famille Methylobacteriaceae). Les MPs ajoutés au milieu permettent une croissance microbienne qui diffère des contrôles après 4/7 jours, selon le sol. En ce qui concerne la diversité fonctionnelle, des différences d'activité sont également visibles entre les sols amendés en micropolluants et les sols témoins. Les microorganismes des sols tests de Dourdan sont les plus actifs, avec un AWCD de 2. Deux tendances peuvent être observées pour les sols de Vitry : BFS1 avec un AWCD moyen de 1 et BFS2 avec un AWCD de 2. Pour les sols de Compans, l'AWCD est d'environ 1,2. Pour la plupart des sols, l'activité des sols témoins est inférieure à celle des microorganismes des sols testés.

Ces résultats soulignent l'influence de l'âge de la structure, de la proximité du flux d'eau pluviale et de la végétation sur l'efficacité de la biodégradation des particules dans les sols d'ouvrages de gestion des eaux pluviales.

Évolution des paramètres physico-chimiques et des propriétés biologiques au fil du temps dans les substrats d'un ouvrage de gestion des eaux pluviales

L'un des objectifs de ce volet est de comparer les propriétés de plusieurs structures de gestion des eaux pluviales en termes de propriétés et de fonctionnalité. Une étude détaillée de plusieurs structures sur un même site permettant de comparer des paramètres clés comme la texture du sol, sa composition, la nature de la végétation ainsi que l'âge du

dispositif. La situation hydrologique est également un élément à considérer. L'autre objectif est de suivre dans le temps et au fil des saisons l'évolution de ces paramètres et leurs conséquences sur les communautés microbiennes et leurs fonctionnalités.

Le site d'étude choisi est situé à Campans (près de Paris) et comprend 3 structures (2 bandes enherbées, dont une avec un substrat filtrant, et une noue de biorétention contenant un substrat filtrant). Les 2 bandes enherbées ont été nivelées en juin 2020, c'est-à-dire que les 10 cm de terre supérieurs ont été enlevés et laissés tels quels. Quatre campagnes d'échantillonnage ont été réalisées pour étudier ces sols : avril 2019, Juin 2021, Février 2021 et Juillet 2022, soit 1 et 2 ans après le décompactage. Les échantillons issus des bandes enherbées ont également été séparés en fonction du lieu d'entrée des eaux de ruissellement de la route. Cinq sols ont donc été étudiés (4 provenant des bandes enherbées et un représentatif de la totalité de la noue).

Un fort impact du nivellement de 2020 sur le sol est visible dans les données de 2019/2021, tant au niveau des aspects physico-chimiques que biologiques. Les résultats pour 2021 montrent une nette différence entre les bandes enherbées et la noue. Le pH est supérieur à 8,5, la MO ne représente que 5% du sol et l'activité FDA (représentant l'activité enzymatique totale) est de 5 µg/gSS/h pour les bandes enherbées, alors que la noue a un pH inférieur à 8,5, une teneur en MO de 10% et une activité FDA de 20 µg/gSS/h. Les résultats d'analyses obtenus pour les échantillons 2022 montrent une évolution de tous les paramètres des sols étudiés : le pH de chaque sol diminuant vers des valeurs neutres, la quantité de MO augmentant et les activités enzymatiques augmentant également (20 à 60 µg/gSS/h). Nos travaux ont montré que la qualité biologiques des 5 sols étudiés s'améliore dans le temps et qu'un délai un minimum de 2 ans est nécessaire pour retrouver des fonctionnalités optimales.

Nos résultats montrent que dans le dispositif de traitement des eaux de ruissellement de Campans des différences dans les qualités chimiques et biologiques des substrats sont observées entre les bandes et la noue avec un impact très probable sur la performance épuratoire de ces sections et notamment en termes de potentiels de biodégradation de micropolluants. Une évolution positive de ces qualités entre 2020 et 2022 a été observée notamment grâce à un retour d'une densité et d'une diversité fonctionnelle microbienne optimales.

Les modes de gestion actuels de ces dispositifs montrent un impact négatif immédiat sur leurs performances avec un délai minimum de deux ans pour retrouver une fonctionnalité biologique optimale. Une réflexion doit être engagée avec les opérationnels pour optimiser les modes de gestion de ces structures et conserver la durabilité des fonctions épuratoires et des services écosystémiques.

CONCLUSION

Au moment au ce rapport de synthèse est rédigé, une dernière partie de la thèse d'Andréa Oudot est en cours de correction et de validation. Cette partie non présentée dans ce document consiste d'une part en un projet d'article, dont la rédaction est bien avancée, portant sur l'analyse physico-chimique et biologique comparative des sols des 3 sites étudiés (Campans, Dourdan et Vitry). D'autre part les résultats de cinétiques de biodégradation de micropolluants en colonnes utilisant les sols de la Noue de Compans et le sol amont de Dourdan, ont été également valorisés et leurs confrontation aux cinétiques batch menées en début de thèse est actuellement en cours de validation.

Le rapport de thèse d'Andréa Oudot devrait être finalisé dans les semaines à venir et sa thèse devrait être soutenue en octobre 2024 au plus tard.

CONTACTS

Nouredine Bousserhine bousserhine@u-pec.fr

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

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Oudot A. (2024). Devenir des micropolluants organiques dans les sols des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales : interactions diversité microbienne et biodégradabilité des micropolluants. Rapport de thèse. Université Paris Est Créteil (UPEC). Ecole doctorale SIE.

Oudot A. (2023). Becoming of micropollutants in the soil of stormwater management structures: interaction of microbial diversity and biodegradation of micropollutants. Journée Doctorales en Hydrologie Urbaine (JDHU)

Oudot A. (2023). Becoming of micropollutants in the soil of stormwater management structures: interaction of microbial diversity and biodegradation of micropollutants. NOVATECH, Juillet 2023.

Oudot A. (2021). Devenir des micropolluants organiques dans les sols des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales : interactions diversité microbienne et biodégradabilité des micropolluants. Journée Doctorales en Hydrologie Urbaine (JDHU), 26-27 mai, distanciel.

Bettembos E. (2022). Devenir des micropolluants organiques dans les sols des ouvrages de gestion à la source des eaux pluviales : interactions diversité microbienne et biodégradabilité des micropolluants. Stage Master 2. M2 Biodiversité Ecologie Evolution, parcours Ecophysiologie Ecotoxicologie. Sorbonne université

Roux J. (2019) Caractérisation des communautés microbiennes autochtones des sols d'un ouvrage de gestion à la source des eaux pluviales, et évaluation de leur potentiel de biodégradation des micropolluants organiques. Stage Master 2 AgroParisTech. Parcours Gestion des sols et services écosystémiques.

NB : En plus de la finalisation de son rapport de thèse, Andréa est en phase de finalisation de trois articles portant sur les différents volets de sa thèse et ses expérimentations. Un quatrième article dédié au fonctionnement des ouvrages en mode colonne est également en projet.

Articles en cours de finalisation :

- 1- **Biodegradation of organic micropollutants (BPA, 4-NP and OP) by indigenous microbial communities in the soils of stormwater management facilities.** Andréa Oudot, Elodie Bettembos, Vanessa Alphonse, Lila Boudahmane, Emilie Caupos, Mohamed Barakat², Wafa Achouak², Marie-Christine Gromaire¹ and Nouredine Bousserhine.
- 2- **Physical, chemical and biological changes over time in a stormwater management facility.** Andréa Oudot, Vanessa Alphonse, Alexandre Livet, Mohamed Barakat², Wafa Achouak², Marie-Christine Gromaire¹ and Nouredine Bousserhine
- 3- **Physical, chemical and biological changes over time in campans stormwater management facility.** Andréa Oudot, Vanessa Alphonse, Alexandre Livet, Mohamed Barakat², Wafa Achouak², Marie-Christine Gromaire¹ and Nouredine Bousserhine

MOYENS HUMAINS

Doctorant : Andréa Oudot (2020-2024)

Master 2 : Julia Roux (2019-2020)

Master 2 : Elodie Bettembos (2021-2022)

Chercheurs/Enseignant-chercheurs : Nouredine Bousserhine, Marie-Christine Gromaire, Samir Abbad, Julien le Roux

Support technique : Vanessa Alphonse, Alexandre Livet, Emilie Caupos, Lila Boudahmane