

## RECHERCHE DE CANDIDAT

### Thèse sur les Microplastiques dans l'Environnement

Années universitaires 2024-2026

#### 1. LABORATOIRE DE RECHERCHE

*Nom* : Environnements, Dynamiques, Territoires de la Montagne (EDYTEM)

*Domaine* : Sciences de l'Environnement

*Encadrant de thèse* : David Gateuille

#### 2. ENTREPRISE

*Nom* : Envisol

*Domaine* : Conseil & Ingénierie en Sites et Sols Pollués

*Encadrant de thèse* : Maxime Louzon

#### 3. TITRE DE LA THÈSE

**Titre** : *Intégration des microplastiques dans la démarche de gestion des sites et sols pollués.*

#### 4. RESUME

##### RESUME

Depuis leur première détection dans les années 70, les microplastiques ( $\mu\text{P}$ ) suscitent une préoccupation croissante dans l'opinion publique et parmi la communauté scientifique. Bien qu'un grand nombre d'études s'intéressent à cette contamination, les connaissances sur le devenir des  $\mu\text{P}$  dans l'environnement restent lacunaires. En particulier, la contamination des milieux aquatiques a fait l'objet de nombreux travaux mais la pollution des sols reste bien moins étudiée. Pourtant, la contamination des sols est un sujet crucial. D'une part, les  $\mu\text{P}$  dans les sols peuvent générer des effets toxiques directs ou indirects sur des organismes constitutifs de la biodiversité et modifier la dynamique d'autres polluants. D'autre part, les sols sont un réservoir de  $\mu\text{P}$  et peuvent jouer le rôle de source secondaire vers les milieux aquatiques. Il est donc impératif de mieux comprendre le devenir et l'impact des microplastiques dans les sols, et en particulier dans les sols urbains et péri-urbains qui présentent des risques élevés de forte contamination. En France, les friches en cours de réhabilitation font l'objet d'une méthodologie particulière, visant à maîtriser les pollutions et à les rendre viables pour leurs futurs usages. L'offre de thèse proposée ici s'inscrit à mi-chemin entre la recherche fondamentale et la démarche réglementaire utilisée en sites et sols pollués. La thèse se développera en trois axes : 1) Dans un premier temps, il s'agira de déterminer des ordres de grandeur de la contamination en microplastiques dans des friches. Cette partie cherchera à mettre en avant les liens potentiels entre les types d'industrie et les teneurs en plastique dans les sols. Une attention particulière sera portée afin de déterminer quelles modifications des protocoles de diagnostic en sites et sols pollués seraient nécessaires afin d'y intégrer la recherche de  $\mu\text{P}$ . 2) Dans un deuxième temps, le/la doctorant.e cherchera à comprendre les potentielles interactions entre  $\mu\text{P}$  et d'autres polluants (hydrocarbures, métaux, etc.) en fonction des propriétés physico-chimiques (pH, matière organique, CEC, etc.) des terres. En complément, le doctorant cherchera à déterminer si certains additifs des plastiques (bisphénols, phtalates) peuvent être utilisés comme indicateurs de la présence de  $\mu\text{P}$ . 3) Enfin, le doctorant mènera des tests écotoxicologiques afin de déterminer les facteurs d'influence de la biodisponibilité environnementale et toxicologique des  $\mu\text{P}$  et d'établir des valeurs seuils de contamination pouvant générer des effets délétères chez les espèces modèles utilisées en sites et sols pollués (escargots et vers de terre). L'ensemble de cette thèse s'inscrit dans une démarche tournée vers les entreprises travaillant en réhabilitation de friches industrielles et visant à proposer un cadre réglementaire afin d'intégrer les  $\mu\text{P}$  dans la démarche de sites et sols pollués.

##### ABSTRACT

Since their first detection in the 1970s, microplastics ( $\mu\text{P}$ ) have caused growing public concern. Although a large number of studies focus on this contamination, knowledge on the fate of  $\mu\text{P}$  in the environment remains very incomplete. In particular, the contamination of aquatic environments has been the subject of numerous studies, but soil pollution is much less studied. However, soil contamination is a crucial subject. On the one hand, the presence of  $\mu\text{P}$  in soils can generate direct or indirect toxic effects, via the remobilization of other pollutants. On the other hand, soils can act as a secondary source of  $\mu\text{P}$  to aquatic environments. It is therefore imperative to better understand the fate of microplastics

in soils, and in particular in urban soils which present high risks of heavy contamination. In France, industrial wastelands undergoing rehabilitation are subject to specific regulations, aimed at controlling pollution and making them viable for their future uses. The thesis offered here falls halfway between fundamental research and the regulatory approach used on polluted sites and soils. The thesis will develop in three axes: 1) Firstly, it will be a question of determining orders of magnitude of microplastic contamination in industrial wastelands. This part will seek to highlight potential links between types of industry and plastic levels in soils. Particular attention will be paid to determine what modifications to the diagnostic protocols for polluted sites and soils would be necessary in order to integrate the search for  $\mu\text{P}$ . 2) Secondly, the doctoral student will seek to understand the potential interactions between  $\mu\text{P}$  and other pollutants (hydrocarbons, metals, etc.) present in industrial soils. In addition, the doctoral student will seek to determine whether certain plastic additives (bisphenols, phthalates) can be used as indicators of the presence of  $\mu\text{P}$ . 3) Finally, the doctoral student will conduct ecotoxicological tests in order to determine the environmental and toxicological bioavailability of  $\mu\text{P}$  and to establish contamination threshold values that can generate deleterious effects in model species used in polluted sites and soils (snails and earthworms). This entire thesis is part of an approach aimed at companies working in the rehabilitation of industrial wastelands and aimed at proposing a regulatory framework in order to integrate  $\mu\text{P}$  into the approach to polluted sites and soils.

**5. CANDIDAT RECHERCHE :** Le candidat devra être titulaire d'un master en sciences de l'environnement et classé dans le premier quart de sa promotion de master 2. Il devra posséder de solides connaissances en sciences de l'environnement et en particulier en chimie de l'environnement et analytique, en géosciences, et/ou en statistiques, biologie, physiologie et écotoxicologie. Une connaissance de la méthodologie Sites et Sols Pollués sera appréciée. Il aura déjà réalisé au moins un stage dans une structure publique ou privée de recherche en sciences de l'environnement. Il aura un goût prononcé pour l'expérimentation scientifique en laboratoire et en terrain extérieur, maîtrisera les outils statistiques pour l'exploitation des données d'analyses multiples et présentera des bonnes capacités rédactionnelles. Dans le cadre de la valorisation des résultats, un bon niveau en anglais est requis.

**6. FINANCEMENT DE LA THESE :** Le candidat sera embauché en CDD par la société ENVISOL dans le cadre d'un projet de thèse CIFRE. Le candidat intégrera les équipes du Pôle Ecosystèmes sous la direction de Dr. Maxime Louzon. Des activités complémentaires d'enseignements en université peuvent être envisagées. La rémunération est à négocier en fonction du profil et est évolutive. L'environnement de la thèse a été financé par l'ADEME dans le cadre du projet IMP-SSP. Du personnel technique côté ENVISOL (un ingénieur écotoxicologue et un technicien écotoxicologue) est disponible pour appuyer le candidat dans les expérimentations.

## 7. CONTACTS :

Pour candidater, merci d'envoyer CV, relevés de notes, liste de deux contacts référents et lettre de motivation aux adresses suivantes :

Nom prénom : GATEUILLE David

Tél : +33 (0)4 79 75 88 39

Email : [david.gateuille@univ-smb.fr](mailto:david.gateuille@univ-smb.fr)

Nom prénom : LOUZON Maxime

Tél : +33 (0)4 74 83 62 16

Email : [m.louzon@envisol.fr](mailto:m.louzon@envisol.fr)

## 8. SUJET DETAILLE

### Contexte

La consommation mondiale de plastiques connaît un accroissement exponentiel depuis la généralisation de ces composés dans les années 1930 jusqu'à atteindre environ 400 millions de tonnes produites en 2020. L'omniprésence des matériaux plastiques, associée à une mise en place tardive de politiques de gestion spécifique a entraîné une contamination globale des socio-écosystèmes par des particules plastiques de taille micrométrique (dites microplastiques :  $\mu\text{P}$ ), au point qu'aujourd'hui, elles ont été détectées au sommet de l'Everest<sup>1</sup>, dans la fosse des Mariannes<sup>2</sup> et dans les glaces des pôles<sup>3</sup>. Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) a ainsi appelé à davantage de recherches sur les effets de la pollution microplastique dans l'environnement et en particulier dans les sols. En effet, ces derniers pourraient être un puits de  $\mu\text{P}$  des plus importants. Il est ainsi estimé que la quantité de plastique piégée annuellement dans les sols serait 4 à 23 fois supérieure à celle rejetée dans le milieu marin<sup>4</sup>. Les recherches menées jusqu'à présent montrent que les impacts de l'intégration des  $\mu\text{P}$  sont multiples et vont de changements de propriétés physico-chimiques des sols à des effets délétères sur la faune, en passant par l'émission et la modification des dynamiques des polluants (cf. partie suivante). Malgré les risques liés aux  $\mu\text{P}$  et à leurs interactions avec d'autres polluants (organiques, métaux, etc.), ils ne sont, à ce jour, pas intégrés dans les démarches de Sites et Sols Pollués (SSP). Il est donc nécessaire de rendre des préconisations pour intégrer les  $\mu\text{P}$  dans les procédures de diagnostic, d'évaluation des risques environnementaux et sanitaires et de réhabilitation des contaminations. Considérant également le Green Deal Européen, cette problématique est d'autant plus importante dans un contexte où la lutte contre les effets néfastes des activités humaines sur l'environnement apparaît comme prépondérante. Cette lutte passe en outre par la démarche ZAN qui vise à arrêter l'artificialisation des surfaces dès 2050. Cet objectif ne pourra être atteint que par la requalification de friches industrielles comme le montrent les fonds « Friches » successifs (3ème fonds en 2022 pour un total de 750 M€ mobilisés) mis en place par le gouvernement. Or ces sites localisés à proximité des sources potentielles de pollutions plastiques sont susceptibles de présenter des teneurs en  $\mu\text{P}$  plus importantes et doivent, par conséquent, être étudiés en priorité.

### Etat de l'art scientifique

La pollution microplastique dans le sol a été abordée pour la première fois par Rillig<sup>5</sup> en 2012 ouvrant la porte à un nombre croissant d'études soulignant la complexité et l'importance de cette problématique<sup>6-10</sup>. Les  $\mu\text{P}$  peuvent entrer dans les sols par de nombreuses voies comme l'amendement avec des boues d'épuration ou du compost, l'irrigation, la fragmentation de macrodéchets plastiques ou les dépôts atmosphériques<sup>11</sup>. Les contributions relatives de ces différentes sources sont susceptibles de varier d'une friche à l'autre, en particulier pour celles ayant accueillies des processus industriels d'usinage de plastique. Une fois dans le sol, l'accumulation de  $\mu\text{P}$  peut provoquer des effets en cascade. Les  $\mu\text{P}$  peuvent, par exemple, altérer la qualité du sol en modifiant les propriétés physiques<sup>12</sup> et ainsi diminuer sa fertilité et perturber les communautés microbiennes fonctionnelles en place<sup>13-16</sup>. Les MP peuvent aussi être la source de polluants vers les sols, soit en relarguant les additifs qu'ils contiennent, soit en transférant d'autres polluants adsorbés sur leur surface<sup>17</sup>. De plus, de nombreuses études ont simulé la possibilité d'un transport abiotique des  $\mu\text{P}$  à l'aide d'expériences sur colonne de sol<sup>18-20</sup>. La migration des particules de plastique au sein du sol entraîne ainsi le transfert des contaminants adsorbés et génère un risque écotoxicologique accrue<sup>21</sup>.

### Caractère innovant du projet

La courte bibliographie présentée montre l'étendue des processus mis en jeu par la contamination des sols par les  $\mu\text{P}$ . Si ces études ont l'avantage de visibiliser les risques liés à ces polluants, aucune n'a été réalisée dans le but spécifique d'étudier l'intégrabilité des suivis microplastiques dans les méthodes de diagnostic en SSP, encore moins dans le contexte législatif français. Ce projet de thèse s'inscrit dans cette démarche spécifique en associant la recherche fondamentale portée par le laboratoire de recherche [EDYTEM](#) et la recherche industrielle portée par le bureau d'étude spécialisé en SSP [ENVISOL](#).

La thèse se propose ainsi de répondre aux questions de recherche fondamentales ou appliquées suivantes :

- Quelles sont les valeurs seuils de teneurs en plastiques dans les sols français permettant de distinguer les zones peu contaminées des zones très contaminées ? Quels liens peuvent être établis entre les teneurs en plastiques et les activités industrielles passées du site ?
- Est-ce que les additifs (en particulier les phtalates et les bisphénols) peuvent être des prédictors des teneurs en plastiques dans les sols ?

- Est-ce que la présence de plastiques dans les sols est de nature à modifier la dynamique des polluants (hydrocarbures aromatiques et aliphatiques, métaux et métalloïdes) dans les sols ? Si oui, ces modifications doivent-elles être prises en compte dans la modélisation des transferts dans les phases du sol et les scénarios d'exposition notamment dans le cadre des évaluations de risques sanitaires ?
- Quelles sont les valeurs seuils de teneurs en plastiques dans les sols français susceptibles de générer des effets néfastes vis-à-vis d'espèces modèles utilisées en écotoxicologie du sol ?

Cette thèse fait partie du projet IMP-SSP (financement ADEME) visant à étudier les dynamiques et les interactions des  $\mu\text{P}$  dans les sols urbains et industriels. Elle s'inscrit également en parallèle du projet CANOPE (financement ANSES/ADEME) porté par EDYTEM, CRISALID, le laboratoire Chrono-Environnement (Université de Franche-Comté/CNRS) et une ONG pour étudier les liens géostatistiques entre micro et macro déchets plastiques dans les sols en fonction des usages, des moyens de prévention et de dépollution, et des politiques locales en place.

## Méthodologie

### Etats des lieux de la contamination dans les friches urbaines et industrielles

Le doctorant, après une formation aux techniques de prélèvement d'échantillons environnementaux à des fins d'analyses microplastiques, accompagnera des techniciens d'ENVISOL chargés de faire les prélèvements *in situ*. Le doctorant utilisera le matériel et les méthodes déjà développées à EDYTEM pour les prélèvements environnementaux. Ces travaux se focaliseront sur la matrice sol mais des prélèvements seront aussi réalisés sur l'eau et l'air du sol pour une sélection de sites équipés de piézomètres et de piézaires. Les échantillons collectés seront analysés pour déterminer les abondances de différents polluants et en particulier des  $\mu\text{P}$  et de certains additifs fréquemment trouvés dans les plastiques comme les phtalates et les bisphénols. Pour les microplastiques, les échantillons seront analysés, après traitement, par microscopie infrarouge (Spotlight 400 couplé à un Spectrum 3). Les polluants organiques seront extraits des échantillons, purifiés sur des cartouches SPE (solid phase extraction) et analysés selon différentes méthodes (HPLC-fluo, GC-MS ou LC-MS/MS) en fonction de la famille de composés recherchés. Pour les métaux, les échantillons seront analysés par ICP-MS après digestion acide. Pour l'ensemble de ces analyses, une procédure de contrôle qualité est mise en place via l'analyse fréquente de blancs et d'échantillons standardisés. Pour les polluants organiques, les composés deutérés permettent le suivi échantillon par échantillon des rendements analytiques. Les données générées sur les différents sites d'étude permettront de modéliser la distribution spatiale des MP et ainsi de répondre à plusieurs questions majeures concernant la variabilité de la contamination en surface, les liens potentiels avec la présence de macrodéchets plastiques et les changements de teneurs avec la profondeur. Ces approches géostatistiques et statistiques seront réalisées avec divers logiciels dont GstatEval et EnviRisk® (logiciels développés par ENVISOL) et R.

### Suivi des flux de microplastiques et de polluants associés

Sur l'ensemble des sites choisis, un suivi des flux de microplastiques sera mis en place. Pour cela, des prélèvements seront réalisés, pour différentes conditions hydrologiques (temps humide, temps sec), dans les eaux de ruissellements et dans les eaux d'infiltrations. Ces prélèvements seront réalisés selon la méthodologie déjà décrite, par pompage et filtration *in situ*. Les dépôts atmosphériques constituant une source significative, une part importante des microplastiques, piégés en surface, sont susceptibles d'être remobilisés à la faveur d'évènements pluvieux. En complément, un suivi de la remobilisation éolienne des microplastiques sera mis en place par le déploiement de collecteurs atmosphériques sous abri (protégé des dépôts atmosphériques régionales) qui permettront de mieux cerner le risque d'exposition par inhalation. Ces collecteurs sont fabriqués au laboratoire intégralement en aluminium afin d'éliminer le risque de contamination.

### Approche écotoxicologique opérationnelle

Sur des échantillons de sols diversement contaminés en  $\mu\text{P}$  et par d'autres polluants, des tests de transferts *ex situ* en 28 jours vers les escargots selon ISO 24032 (annexe essais laboratoire) seront effectués et transposés aux vers de terre (*Aporrectodea caliginosa*). Les  $\mu\text{P}$  bioaccumulés dans les tissus seront analysés à EDYTEM. L'influence des propriétés physico-chimiques des sols et des multi-contaminations sur les transferts des MP vers ces organismes à la base des chaînes alimentaires sera analysée. Ensuite, des estimations d'exposition des herbivores et des prédateurs seront effectuées par modélisation trophique. Ces transferts *ex situ* à l'escargot seront comparés à des tests *in situ*. L'objectif étant de vérifier l'impact des conclusions des essais *ex situ* en considérant le sol comme unique source d'exposition dans un contexte

d'évaluation des risques environnementaux et d'identifier les intérêts et les limites des approches *ex situ* et *in situ* pour l'évaluation des transferts de MP vers des bioindicateurs d'accumulation engagés. Ces travaux seront complétés par des tests écotoxicologiques en laboratoire : croissance et maturité sexuelle escargots, croissance, maturité sexuelle et reproduction vers de terre, croissance végétaux, embryotoxicité escargots, induction de micronoyaux sur *Vicia faba*, escargots (hémocytes), vers de terre (coelomocytes), stress oxydant (MDA) pour les escargots et les vers de terre. Ensuite, des approches statistiques seront mises en œuvre pour modéliser les liens entre les concentrations en contaminants biodisponibles (transférées aux organismes) et l'induction d'effets écotoxiques vis-à-vis des organismes modèles. Les seuils d'écotoxicité définis à partir de ces modèles pourront servir de premières valeurs guides de références pour appuyer les gestionnaires dans l'interprétation des concentrations en microplastiques retrouvés dans les sols.

## Référence

1. Napper et al., (2020). Reaching New Heights in Plastic Pollution—Preliminary Findings of Microplastics on Mount Everest. *One Earth*, 3(5), 621-630. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.020>
2. Peng et al., (2018). Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochemical Perspectives Letters*, 1-5. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>
3. Citterich et al., (2023). A plastic world: A review of microplastic pollution in the freshwaters of the Earth's poles. *Science of The Total Environment*, 869, 161847. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161847>
4. Horton et al., (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of The Total Environment*, 586, 127-141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>
5. Rillig (2012). Microplastic in Terrestrial Ecosystems and the Soil? *Environmental Science & Technology*, 46(12), 6453-6454. <https://doi.org/10.1021/es302011r>
6. Chae & An, (2018). Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review. *Environmental Pollution*, 240, 387-395. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.05.008>
7. De Souza Machado et al., (2018). Impacts of Microplastics on the Soil Biophysical Environment. *Environmental Science & Technology*, 52(17), 9656-9665. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b02212>
8. Hurley & Nizzetto, L. (2018). Fate and occurrence of micro(nano)plastics in soils: Knowledge gaps and possible risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 6-11. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.10.006>
9. Helmberger et al., (2020). Towards an ecology of soil microplastics. *Functional Ecology*, 34(3), 550-560. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13495>
10. Rillig et al., (2017). Microplastic Incorporation into Soil in Agroecosystems. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1805. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>
11. Bläsing & Amelung, W. (2018). Plastics in soil : Analytical methods and possible sources. *Science of The Total Environment*, 612, 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.086>
12. Li et al., (2022). Microplastic effects on soil system parameters: A meta-analysis study. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(8), 11027-11038. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18034-9>
13. Awet et al., (2018). Effects of polystyrene nanoparticles on the microbiota and functional diversity of enzymes in soil. *Environmental Sciences Europe*, 30(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0140-6>
14. De Souza Machado et al., (2019). Microplastics Can Change Soil Properties and Affect Plant Performance. *Environmental Science & Technology*, 53(10), 6044-6052. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01339>
15. Wan et al., (2019). Effects of plastic contamination on water evaporation and desiccation cracking in soil. *Science of The Total Environment*, 654, 576-582. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.123>
16. Zhu et al., (2018). Exposure to nanoplastics disturbs the gut microbiome in the soil oligochaete *Enchytraeus crypticus*. *Environmental Pollution*, 239, 408-415. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.017>
17. Gateuille & Naffrechoux, E. (2022). Transport of persistent organic pollutants: Another effect of microplastic pollution? *WIREs Water*, 9(5), e1600. <https://doi.org/10.1002/wat2.1600>
18. Alimi et al., (2018). Microplastics and Nanoplastics in Aquatic Environments: Aggregation, Deposition, and Enhanced Contaminant Transport. *Environmental Science & Technology*, 52(4), 1704-1724. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05559>
19. He et al., (2018). Influence of Nano- and Microplastic Particles on the Transport and Deposition Behaviors of Bacteria in Quartz Sand. *Environmental Science & Technology*, acs.est.8b01673. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01673>



20. O'Connor et al., (2019). Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles. *Environmental Pollution*, 249, 527-534. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.092>

21. Guo et al., (2020). Source, migration and toxicology of microplastics in soil. *Environment International*, 137, 105263. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105263>