

## Elaboration de particules modèles dopées et étude de leurs interactions dans des effluents urbains en temps de pluie dans le cadre du projet TRANSPLAST

Design of doped model particles and study of their interactions in urban effluents during rainfall as part of the TRANSPLAST project

L. Davy<sup>1,2</sup>, R. Bayard<sup>1</sup>, V Massardier-Nageotte<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INSA Lyon, UR7429 Laboratoire DEEP

<sup>2</sup>INSA Lyon, CNRS UMR 5223, Ingénierie des Matériaux Polymères

### RÉSUMÉ

Les déversoirs d'orage (DO) constituent une source majeure de pollution aquatique, notamment en microplastiques (MPs), car ils rejettent des eaux non traitées lors des épisodes pluvieux.<sup>[1]</sup> Avec l'augmentation attendue des précipitations intenses, ces rejets joueront un rôle croissant dans la dispersion de MPs dans les écosystèmes aquatiques.<sup>[2]</sup> La gestion de ces derniers est donc cruciale pour réduire les émissions anthropiques urbaines et la propagation des MPs dans les rivières et océans.<sup>[3]</sup> Le projet TRANSPLAST vise à étudier des émissions des MPs au niveau de DO en proposant une approche multidisciplinaire. La mutualisation de compétences de cinq laboratoires (DEEP, IMP, LEHNA, LMFA, LMI) permet de mener des études de terrain sur une sélection de DO de la métropole lyonnaise, des essais en laboratoire avec des particules modèles dopées ainsi que des simulations numériques sur le transfert des MPs dans les DO. Chaque tâche apporte des informations qui alimentent les autres. L'ensemble de ces résultats aidera à la conception de stratégies innovantes pour l'interception des MPs rejetés par les DO. La conception des particules modèles démontre un dopage homogène et un contrôle des dimensions, indispensables à l'étude de leur comportement durant les essais. Les essais batch évaluent l'effet du type de particules et du ratio de dilution eaux usées/eaux pluviales, afin d'identifier les conditions favorisant la sédimentation des MPs dans un réseau unitaire en temps de pluie. Enfin, le protocole VICAS est adaptée aux MPs pour mesurer leurs vitesses de chute.

### ABSTRACT

Combined sewer overflows (CSOs) are a major source of aquatic pollution, particularly microplastics (MPs), as they release untreated water during rainfall events.<sup>[1]</sup> With the expected increase of more intense precipitation, these emissions will play an increasing role in the dispersion of MPs in aquatic ecosystems. <sup>[2]</sup> Managing these discharges is therefore crucial to reducing urban anthropogenic emissions and the spread of MPs in rivers and oceans.<sup>[3]</sup> The TRANSPLAST project aims to study MP emissions from CSOs by proposing a multidisciplinary approach. The teamwork of five laboratories (DEEP, IMP, LEHNA, LMFA, LMI) enables field studies to be carried out on a selection of CSOs in the Lyon metropolitan area, laboratory tests with doped model particles and numerical simulations on MPs transfer in CSOs. Each task provides information that feeds into the others. All of these results will help to design innovative strategies for intercepting MPs discharged by CSOs. The design of the model particles demonstrates homogeneous doping and dimensional control, which are essential for studying MPs behaviour during testing. Batch tests evaluate the effect of particle type and the wastewater/rainwater dilution ratio in order to identify the conditions that promote MPs sedimentation in a combined sewer system during rainfall. Finally, the VICAS protocol is adapted to MPs to measure their settling velocities.

### KEY WORDS

Déversoirs d'orage, Eaux urbaines, Microplastiques, Sédimentation, Agrégation, Microparticules modèles

Combined sewer overflows, Urban waters, Microplastics, Sedimentation, Aggregation, Model microparticles

---

# 1 ETAT DE L'ART ET POSITIONNEMENT DU PROJET

## 1.1 Contexte

### 1.1.1 Définitions et historique de recherche

La pollution plastique constitue aujourd'hui un enjeu environnemental et sanitaire majeur. Son ubiquité est particulièrement préoccupante : quels que soient les milieux étudiés, des traces de plastiques y sont systématiquement détectées.<sup>[4]</sup> Cette omniprésence s'explique par la diversité de leurs usages (agroalimentaire, construction, transport, ...), correspondant à une production mondiale de 436 Mt en 2023.<sup>[5]</sup> Conçus pour offrir des propriétés modulables selon les besoins, les plastiques présentent des caractéristiques qui complexifient leur gestion en fin de vie : diversité des polymères, présence d'additifs, durabilité. Leur persistance nécessite de minimiser leur présence dans les différents compartiments du milieu naturel. Cette contamination se caractérise par un caractère diffus et multi-échelle, notamment en raison de la présence de microplastiques (MPs), particules de 1µm et 5mm.<sup>[6]</sup> Ceux-ci peuvent être primaires, lorsqu'ils sont directement intégrés à des produits, par exemple les capsules de détergent, ou secondaires, lorsqu'ils résultent de la fragmentation d'objets plastiques, comme les sacs ou les bouteilles. Si l'attention scientifique s'est d'abord portée sur les milieux marins, les sources majeures d'émission sont intrinsèquement anthropiques, plaçant les villes au cœur de la problématique.

### 1.1.2 Le cas des réseaux unitaires

Les connaissances demeurent encore limitées dans le contexte urbain. Si le devenir des MPs dans les stations d'épuration ont été largement étudiées sur les 10 dernières années<sup>[7]</sup> et démontrent une capacité significative de rétention des microplastiques dans les boues, l'épandage de ces dernières contribue néanmoins à la contamination des sols agricoles.<sup>[8]</sup> Par ailleurs, les eaux de ruissellement lessivent de multiples surfaces et mobilisent un large spectre de contaminants.<sup>[9]</sup> Lors d'épisodes pluvieux intenses en zones urbanisées, les déversoirs d'orage (DO) rejettent vers le milieu récepteur des flux d'eaux non traitées. Or, ces ouvrages ont été peu investigués jusqu'à présent. Au regard des quantités de MPs détectées dans les eaux usées et dans les eaux de ruissellement<sup>[10]</sup>, leur rôle potentiel en tant que sources directes d'émission apparaît majeur et nécessite une évaluation approfondie.

## 1.2 Verrous techniques et interdisciplinarité

### 1.2.1 Objectifs et verrous techniques

Pour mieux comprendre l'émission de MPs depuis les DO, le projet s'articule autour de quatre axes majeurs :

1. Identifier et quantifier les microplastiques (MPs) circulant au sein du réseau unitaire de la métropole lyonnaise ;
2. Etudier leurs interactions avec les fractions organiques et inorganiques des eaux urbaines, afin d'appréhender les mécanismes d'agrégation, de sédimentation et de mesurer les vitesses de chute associées ;
3. Simuler les trajectoires des MPs lors d'un événement de déversement, puis valider ces modélisations à l'aide d'expérimentations à l'échelle pilote ;
4. Développer et évaluer des solutions d'interception, en combinant approches numériques et validations expérimentales.

Chaque objectif soulève un ensemble de défis scientifiques et méthodologiques, notamment :

- L'obtention d'échantillons représentatifs au niveau des DO, malgré une forte variabilité temporelle des flux et ratio eaux de pluie / eaux usées ;
- La quantification massive fiable des MPs dans des effluents urbains particulièrement complexes ;
- La sélection de modèles d'étude pertinents et représentatifs des conditions environnementales, tant pour les MPs étudiés que pour les effluents utilisés dans les expérimentations de laboratoire.

### 1.2.2 Approche multi et interdisciplinaire

Pour appréhender la complexité du transfert des MPs en réseau unitaire, une approche multi et interdisciplinaire est nécessaire. Les campagnes de terrain fournissent une caractérisation qualitative et quantitative des MPs circulant dans les DO, tandis que la modélisation numérique permet d'identifier les zones représentatives pour l'échantillonnage et d'explorer les trajectoires de particules lors des épisodes pluvieux. La cohérence de ces simulations repose sur l'intégration de paramètres physico-chimiques décrivant les interactions des microplastiques avec les matrices liquides et solides, paramètres obtenus grâce à des essais contrôlés en laboratoire sur des particules modèles inspirées des échantillons environnementaux. Cette articulation étroite

entre terrain, expérimentation et modélisation permettra d'étudier les processus d'agrégation, de flottabilité et de sédimentation, chaque volet du projet alimentant et renforçant les autres comme illustré sur la Figure 1.

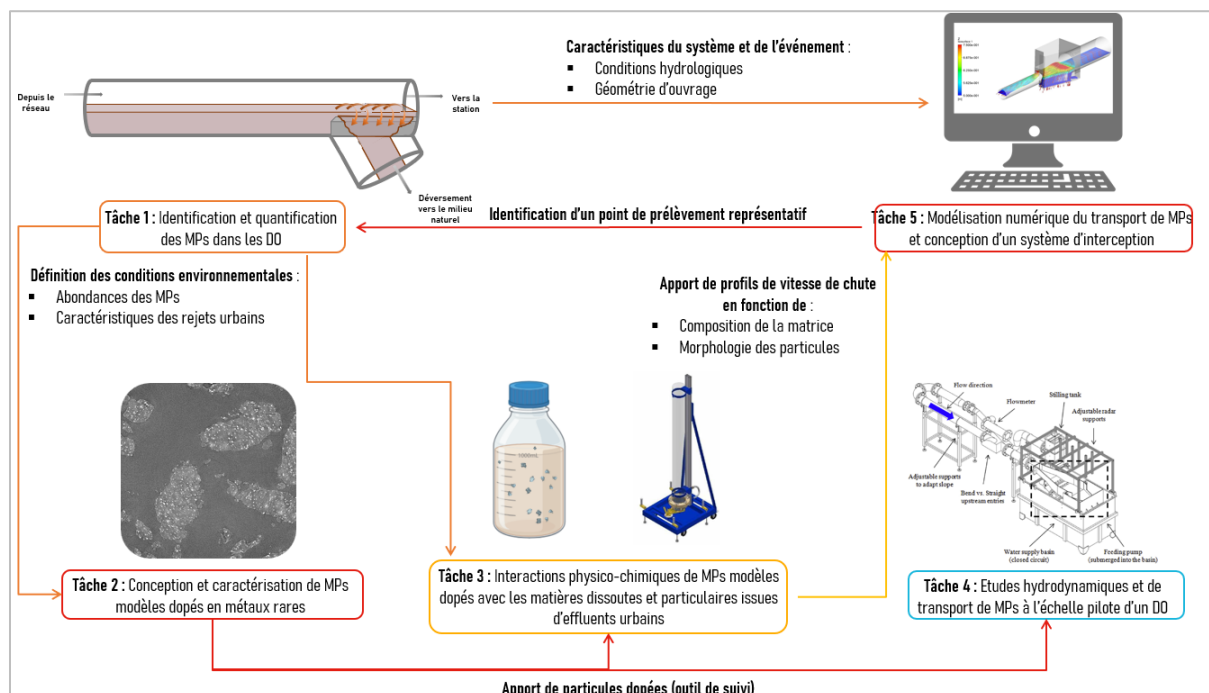


Figure 1 : Tâches et laboratoires associés au projet TRANSPLAST

## 2 FOCUS SUR LES TACHES 2 ET 3

### 2.1 Pertinence du dopage, choix des modèles et des effluents

L'utilisation du dopage métallique permet de disperser un traceur et d'en mesurer la teneur par ICP-MS pour s'affranchir des contraintes analytiques de pré-traitement chronophage des échantillons et améliorer la sensibilité.<sup>[11]</sup> En effet, les techniques courantes d'analyse des MPs (microscopie FTIR, pyrolyse GC-MS) nécessitent de retirer la matière organique et inorganique, sans pour autant dégrader les MPs, afin que ces composés n'interfèrent pas avec les méthodes de détection. Ces opérations sont d'autant plus longues pour des matrices complexes comme les effluents urbains. Le choix du traceur métallique repose sur différents critères : la spécificité, qui suppose de vérifier sa présence à faible concentration dans les effluents urbains, une taille permettant la fabrication de particules micrométriques, et la possibilité de l'analyser à l'aide de l'ICP-MS. Des oxydes de terres rares ont donc été sélectionnés et dispersés dans les polymères. Les types de polymères ont été choisis en fonction des abondances répertoriées dans la littérature, la sélection incluant la variabilité de la densité car elle affecte la flottabilité. Par la suite, le souhait d'étudier une diversité de formes a conduit à la sélection de quatre formes distinctes (sphères, films, fibres et fragments), avec une limite supérieure de taille de 500 µm, une fois encore inspirée par l'analyse des données disponibles dans la littérature et comparée aux résultats de la tâche 1. Afin d'étudier l'influence des caractéristiques physico-chimiques des effluents constitués d'eaux usées et d'eau de ruissellement, le choix s'est porté sur des matrices de référence extrêmes et leur dilution. D'une part, il s'agit d'examiner les conditions météorologiques sèches, avec uniquement des eaux usées, et d'autre part, les eaux de pluie. Lorsqu'il pleut, les eaux de pluie sont considérées comme diluant les eaux usées, et ce taux de dilution est déterminé en fonction de la conductivité. Les différents taux de dilution sélectionnés sont basés sur l'analyse de séries chronologiques de précipitations, entre 2007 et 2010 dans le DO situé dans la commune d'Ecully, département du Rhône, France.

### 2.2 Elaboration de particules modèles en vue de l'étude de leur transport

Le Tableau 1 précise les techniques utilisées et les caractéristiques des particules modèles fabriquées. La qualité de ces dernières est validée pour des dimensions maîtrisées et surtout avec une dispersion homogène du traceur à l'échelle de la microparticule puisqu'il sert de proxy pour quantifier les MPs. La teneur en traceur dans les MPs

est quantifiée par ICP-MS en 6 répliqués, après digestion acide et solubilisation des échantillons et complétée par des analyses en tomographie X. La taille des MPs est mesurée par microscopie optique ou par granulométrie laser et la densité des polymères dopés est obtenue avec un pycnomètre.

Tableau 1. Fabrication des microparticules modèles et leurs caractéristiques

Polymère-traceur (forme)	Polystyrène-Indium (sphère)	Polyéthylène Basse Densité - Gadolinium (film)	Polypropylène - Yttrium (fragment)	Acide polylactique-Ytterbium (fibre)
<b>Technique de dopage</b>	Dispersion par solvant [12]	Extrusion master batch	Extrusion master batch	Extrusion master batch
<b>Teneur massique en traceur (%)</b>	0,70±0,03	2,44±0,17	2,19±0,09	0,66±0,03
<b>Traitement additionnel</b>	Non nécessaire	UV et abrasion	Cryo-broyage + tamisage	Impression 3D + découpe au cryostat[13]
<b>Taille [µm]</b>	30-350	80-350	100-250	Diamètre : 33±9 Longueur : 100 ; 200 ; 300
<b>Densité [g/cm<sup>3</sup>]</b>	Pas mesurée	0,9407	0,9167	1,2592

L'eau usée est collectée à l'entrée de la station d'épuration de la Feyssine, commune de Villeurbanne, département du Rhône, France. Pour éviter la contrainte météorologique d'échantillonnage, l'eau pluviale est composée de sédiments de bassin de rétention préalablement séchés à 40°C puis remis en suspension par agitation magnétique dans de l'eau potable dont le chlore a été évaporé. La concentration en sédiment est comprise entre 0,020 et 0,050g/L de matière en suspension.

Le protocole expérimental débute par des essais en batch pour évaluer les fractions surnageantes et celles ayant décanté. Les échantillons sont prélevés à différents intervalles de temps afin d'évaluer les temps de contact nécessaires à la formation d'agrégats qui permettent la sédimentation pour les particules dont la densité est inférieure à celle de l'eau. L'évaluation de la réversibilité fait partie de ces essais puisqu'il est possible que l'écoulement lors du déversement casse la configuration des agrégats. Les résultats des tests batch permettent de sélectionner les conditions dans lesquelles les mesures de la vitesse de chute seront effectuées à l'aide du protocole VICAS.<sup>[14]</sup>

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. Shafi *et al.*, « Are we underestimating stormwater? Stormwater as a significant source of microplastics in surface waters », *J. Hazard. Mater.*, vol. 465, p. 133445, mars 2024, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.133445.
- [2] C. Pyke *et al.*, « Assessment of low impact development for managing stormwater with changing precipitation due to climate change », *Landsc. Urban Plan.*, vol. 103, n° 2, p. 166-173, nov. 2011, doi: 10.1016/j.landurbplan.2011.07.006.
- [3] J. Woodward, J. Li, J. Rothwell, et R. Hurley, « Acute riverine microplastic contamination due to avoidable releases of untreated wastewater », *Nat. Sustain.*, vol. 4, n° 9, p. 793-802, sept. 2021, doi: 10.1038/s41893-021-00718-2.
- [4] R. C. Thompson, W. Courtene-Jones, J. Boucher, S. Pahl, K. Raubenheimer, et A. A. Koelmans, « Twenty years of microplastic pollution research—what have we learned? », *Science*, vol. 386, n° 6720, p. eadl2746, sept. 2024, doi: 10.1126/science.adl2746.
- [5] « Mettre fin à la pollution plastique : pourquoi le commerce est important | ONU commerce et développement (CNUCED) ». Consulté le: 1 décembre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://unctad.org/fr/news/mettre-fin-la-pollution-plastique-pourquoi-le-commerce-est-important>
- [6] N. B. Hartmann *et al.*, « Are We Speaking the Same Language? Recommendations for a Definition and Categorization Framework for Plastic Debris », *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, n° 3, p. 1039-1047, févr. 2019, doi: 10.1021/acs.est.8b05297.
- [7] M. Bodzek, A. Pohl, et C. Rosik-Dulewska, « Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Characteristics, Occurrence and Removal Technologies », *Water*, vol. 16, n° 24, p. 3574, janv. 2024, doi: 10.3390/w16243574.
- [8] F. Corradini, P. Meza, R. Eguluz, F. Casado, E. Huerta-Lwanga, et V. Geissen, « Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal », *Sci. Total Environ.*, vol. 671, p. 411-420, juin 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.368.
- [9] M. Teixidó, D. Schmidlin, J. Xu, L. Scheiber, M. J. Chesa, et E. Vázquez-Suñé, « Contaminants in Urban Stormwater: Barcelona case study », in *Advances in Geosciences*, Copernicus GmbH, mars 2023, p. 69-76. doi: 10.5194/adgeo-59-69-2023.
- [10] Z. Iannuzzi, B. Mourier, T. Winiarski, G. Lipeme-Kouyi, P. Polomé, et R. Bayard, « Contribution of different land use catchments on the microplastic pollution in detention basin sediments », *Environ. Pollut.*, vol. 348, p. 123882, mai 2024, doi: 10.1016/j.envpol.2024.123882.

- [11] D. M. Mitrano, A. Beltzung, S. Frehland, M. Schmiedgruber, A. Cingolani, et F. Schmidt, « Synthesis of metal-doped nanoplastics and their utility to investigate fate and behaviour in complex environmental systems », *Nat. Nanotechnol.*, vol. 14, n° 4, p. 362-368, avr. 2019, doi: 10.1038/s41565-018-0360-3.
- [12] O. Mostefaoui *et al.*, « Quantitative study of microplastic degradation in urban hydrosystems: Comparing *in situ* environmentally aged microplastics vs. artificially aged materials generated via accelerated photo-oxidation », *J. Hazard. Mater.*, vol. 486, p. 137087, mars 2025, doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.137087.
- [13] M. Cole, « A novel method for preparing microplastic fibers », *Sci. Rep.*, vol. 6, n° 1, p. 34519, oct. 2016, doi: 10.1038/srep34519.
- [14] G. Chebbo, M. C. Gromaire, et E. Lucas, « Protocole VICAS – mesure de la vitesse de chute des MES dans les effluents urbains », *Tech. Sci. Méthodes*, vol. 12, p. 39-49, 2003.