

Transfert de microplastiques via le réseau d'assainissement unitaire : des dépôts au sein du réseau aux rejets urbains de temps de pluie

Microplastic in combined sewer networks: from sewer deposit to combined sewer overflows

■ M.T. NGUYEN¹, R. DRIS¹, S. GUÉRIN², B. TASSIN¹, J. GASPERI^{3*}

¹ Laboratoire Eau, Environnement et Systèmes Urbains (Leesu) – ENPC, Institut Polytechnique de Paris – Université Paris Est Créteil – Marne-la-Vallée

² Syndicat interdépartemental pour l'assainissement de l'agglomération parisienne (Siaap) – Direction Innovation – Colombes

³ Université Gustave Eiffel – Laboratoire Eau Environnement (LEE) – Bouguenais

Mots-clés :

Microplastiques
Réseau d'assainissement unitaire
Dépôts de réseau
Rejets urbains de temps de pluie

RÉSUMÉ

S'il est reconnu dans la littérature que les eaux résiduaires urbaines véhiculent une charge en microplastiques (MP) importante, la contamination des dépôts de réseaux d'assainissement et des rejets urbains de temps de pluie restait jusqu'alors inexplorée, malgré une contamination potentiellement importante. Les concentrations observées pour les dépôts (entre 5×10^3 et 178×10^3 particules/kg de sédiment sec) témoignent en effet qu'une partie des microplastiques véhiculés par les eaux usées peut sédimerter. Indépendamment du polymère considéré, la sédimentation d'une partie des microplastiques au sein du réseau pourrait être liée aux conditions d'écoulement, mais aussi aux interactions avec les autres particules des eaux usées, et/ou à la formation d'hétéro-agrégats avec d'autres particules minérales ou organiques revêtues ou non de biofilm. Ces phénomènes conduisent à la formation d'un stock important au sein du réseau, et au risque associé de transfert lors d'événements pluvieux en raison de la remise en suspension de ces sédiments. Les concentrations en MP dans les rejets urbains de temps de pluie (RUTP) fluctuent entre 67 et 392 particules/L, et aucune relation claire entre la concentration en MP et la proportion d'eaux usées ou d'eaux pluviales dans les RUTP, ni avec d'autres paramètres physico-chimiques n'a pu être mise en évidence. Cela suggère que la contamination des MP dans les RUTP est complexe et peut dépendre de nombreux autres facteurs. Parmi ces facteurs, la remise en suspension des dépôts au sein du réseau pourrait jouer un rôle clé. En considérant que 21 millions de m³ de RUTP sont déversés en Seine chaque année et les concentrations minimales et maximales, un flux annuel de particules a été estimé entre 1,4 et $8,2 \times 10^{12}$ particules/an, flux relativement conséquent au regard des flux rejetés par les stations d'épuration (entre $2,4 \times 10^{11}$ et $2,3 \times 10^{13}$ particules/an) ou à l'aval de l'agglomération parisienne ($1,1 \times 10^{13}$ particules/an).

Keywords:

Microplastics
Combined sewer
Sewer deposits
Combined sewer overflows

ABSTRACT

Although it is recognized in the literature that urban wastewater carries a significant load of microplastics (MP), the contamination of deposits in sewer networks and combined sewer overflows (CSO) has remained unexplored until now, despite potentially significant contamination. Concentrations of between 5×10^3 and 178×10^3 particles/kg of dry sediment were observed in deposits, indicating that some of the microplastics carried by wastewater settle. Irrespective of the polymer considered, the sedimentation of some of the microplastics within the network could be linked to wastewater flow conditions, but also to interactions with other particles in the wastewater, and/or to the formation of hetero-aggregates with other mineral or organic particles, whether or not coated with biofilm. These phenomena lead to the formation of a large stock within the network, and the associated risk of transfer during rainy events due to the resuspension of these sediments. MP concentrations in the CSO fluctuate between 67 and 392 particles/L, and no clear relationship between MP concentration and the proportion of wastewater or stormwater or with other physico-chemical parameters, was demonstrated. This suggests that the contamination of CSO is complex and may depend on many other factors. Among these factors, the resuspension of deposits within the network could play a key role. Considering that 21 million m³ of CSO are discharged into the Seine every year and the minimum and maximum concentrations, an annual flow of particles was estimated at between $1,4 \times 10^{12}$ and $8,2 \times 10^{12}$ particles/year, a relatively large flow compared with the flows discharged by wastewater treatment plants (from $2,4 \times 10^{11}$ to $2,3 \times 10^{13}$ particles/an or downstream of the Paris conurbation ($1,1 \times 10^{13}$ particles/an)).

Introduction

Le Laboratoire Eau Environnement et Systèmes urbains (LEESU) et la direction Innovation du service public de l'assainissement francilien (Siaap) s'intéressent depuis

2013 aux sources et flux de microplastiques (< 5 mm) en milieu urbain et à l'échelle du bassin de la Seine. Les travaux engagés visent, d'une part, à appréhender la contamination en microplastiques des eaux urbaines dans le continuum réseau d'assainissement – station d'épuration – eaux de surface. Ils visent également à proposer des premiers bilans de masse à l'échelle du bassin de la Seine.

* Auteur correspondant – Courriel : johnny.gasperi@univ-eiffel.fr

Les travaux de thèse de Minh Trang Nugyen (2020–2023), doctorante dans le cadre du projet européen Limnoplast, du programme OPUR et de la programmation MeSeine InnEAUvation, se sont focalisés sur le continuum réseau – station d'épuration et ont exploré la contamination des eaux usées, des dépôts de réseaux d'assainissement, des rejets de station d'épuration, des rejets urbains de temps de pluie (RUTP), et des boues résiduaires urbaines.

Dans le présent article, un focus sur les dépôts de réseaux d'assainissement et les RUTP est présenté. Alors que des données sont acquises à travers le monde depuis déjà quelques années sur les eaux résiduaires urbaines brutes ou traitées, ainsi que sur les boues de station d'épuration, celles sur les dépôts de réseaux et les RUTP demeurent très originales, malgré une probable contamination importante.

Il est en effet reconnu dans la littérature que les eaux usées transfèrent des quantités importantes de microplastiques [LIU *et al.*, 2021 ; XU *et al.*, 2021 ; KRISHNAN *et al.*, 2023]. Selon la gamme de taille considérée et les microplastiques pris en considération, les concentrations fluctuent fortement, de quelques particules/L à plusieurs centaines voire milliers de particules/L. À l'instar des autres particules véhiculées par les eaux usées, et selon le dimensionnement et la configuration des réseaux d'assainissement (pente faible, faible écoulement des eaux usées entraînant une faible turbulence, etc.), la première hypothèse qui a été formulée était qu'une partie des microplastiques pouvait sédimerter au cours du transfert des eaux usées et être séquestrée dans les dépôts de réseau. Explorer la qualité des dépôts de réseaux, au sein du réseau d'assainissement parisien, a permis de vérifier cette hypothèse et d'en préciser son étendue.

Dans le cas des réseaux d'assainissement unitaire, lors d'événements pluvieux, ces dépôts peuvent être remobilisés. Des études précédentes ont démontré que la remise en suspension des dépôts de réseaux pouvait constituer jusqu'à 80 % de la charge particulaire des RUTP [GASPERI *et al.*, 2010; PASSERAT *et al.*, 2011]. La remise en suspension de ces dépôts, s'ils s'avèrent fortement contaminés par les microplastiques, pourrait de manière similaire conduire à la remobilisation de quantité importante de microplastiques et de facto conduire à des concentrations importantes dans les RUTP. C'est dans ce contexte, et pour répondre à cette seconde hypothèse, que les RUTP collectés au niveau de deux principaux déversoirs d'orage du système d'assainissement parisien ont été étudiés.

1. Matériels et méthodes

1.1. Sites et procédure d'échantillonnage

1.1.1. Échantillonnage des dépôts de réseaux

Douze échantillons de dépôts ont été prélevés manuellement dans différentes chambres à sable situées au sein du réseau d'assainissement parisien, de mars à août 2021. Des échantillons composites au sein de la chambre ont été prélevés et mélangés pour constituer un échantillon représentatif. Ils proviennent de collecteurs primaires (P1, P2 et P3, « a » et « b » indiquant les échantillons provenant du même collecteur) ou secondaires (S1 à S7) (figure 1). Les sédiments des chambres à sable ont été considérés puisqu'ils sont plus facilement collectés au sein du réseau. Ils montrent, d'une part, des caractéristiques similaires aux dépôts formés au sein des collecteurs trouvés le long du réseau et, d'autre part, des niveaux de contamination en métaux et hydrocarbures relativement comparables à ceux des dépôts des collecteurs [ROCHER *et al.*, 2004].

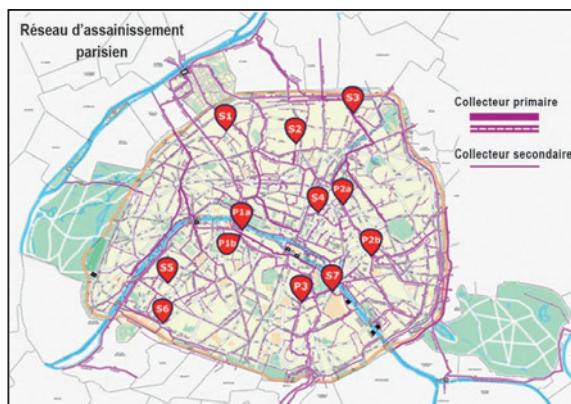


Figure 1. Localisation des dépôts étudiés au sein du réseau d'assainissement parisien

Une fois prélevés, ces échantillons ont été conservés dans des bocaux en verre à 5 °C avant d'être analysés. Les dépôts collectés sont très hétérogènes ; certains ayant des teneurs très importantes en matières organiques, d'autres au contraire très faibles. Les échantillons ont été lyophilisés puis tamisés à 5 mm pour éliminer les éléments de tailles importantes. Un sous-échantillon de 0,5 g a ensuite été considéré pour l'analyse des microplastiques.

1.1.2. Échantillonnage des rejets urbains de temps de pluie

L'échantillonnage des RUTP a été réalisé au niveau des deux principaux déversoirs d'orage de l'agglomération parisienne, à savoir La Briche et celui de Clichy. Ces

échantillons ont été prélevés au moyen de préleveurs automatiques, asservis au débit de déversement, afin d'obtenir un échantillon moyen représentatif du déversement. Pour La Briche, des campagnes menées entre avril et octobre 2022 ont permis de prélever 16 échantillons de RUTP lors de différents épisodes pluvieux (LB1 à LB16). Sept échantillons ont également été prélevés en parallèle à Clichy pendant les événements 1, 5, 6, 7, 10, 11 et 16 à des fins de comparaison. Sur l'ensemble des événements, les paramètres physico-chimiques de qualité des eaux (matières en suspension, conductivité, carbone organique, etc.) ont été analysés. Les déversements échantillonnés correspondent à différentes intensités de pluie, comme l'illustrent les volumes déversés variant entre 4 291 et 61 230 m³ (moyenne à 100 800 m³) et les débits maximaux enregistrés au cours du déversement variant entre 2,3 et 67,2 m³/s (moyenne à 16,0 m³/s).

1.2. Analyse des microplastiques (MP)

1.2.1. Analyse des dépôts de réseaux

Le sous-échantillon de sédiments de 0,5 g de poids sec a été tamisé à 500 µm, puis a été soumis à une oxydation chimique par H₂O₂ à 30 % à 45 °C pendant 24 heures pour éliminer la matière organique. L'échantillon a ensuite été filtré sur un filtre métallique de 10 µm et le matériel restant a été soumis à une séparation densimétrique en utilisant une solution d'iodure de sodium (>1,6 g/cm³) pendant 24 heures avant de passer par une seconde étape d'oxydation par H₂O₂. Le protocole de prétraitement pour isoler les MP est résumé figure 2. Un triplicat a été effectué pour le site S6. Après traitement, les échantillons ont été déposés sur des filtres d'alumine Anodisc (Ø 25 mm ; porosité de 0,2 µm) avant d'être analysés par imagerie infra-rouge (μ -FTIR) automatisée en mode transmission (Nicolet iN10 MX, Thermo Scientific, avec un pixel de 25 × 25 µm). Le traitement des données a été effectué ultérieurement avec le logiciel siMPle (version 1.1.β, développé par l'Université d'Aalborg,

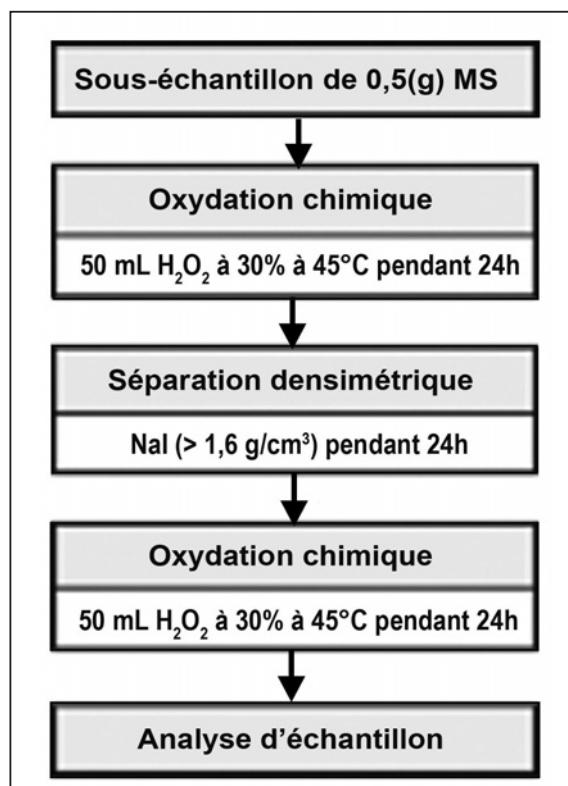


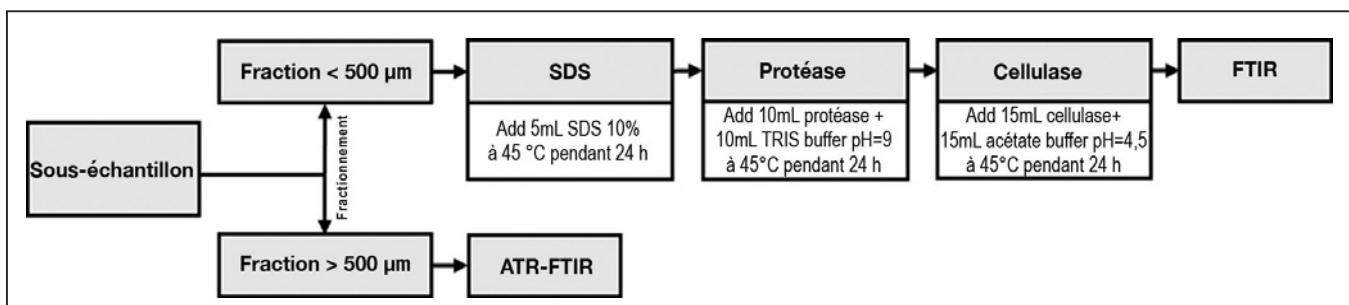
Figure 2. Protocole d'analyse des microplastiques dans les dépôts de réseau

Danemark et l'Institut Alfred Wegener, Allemagne) afin d'identifier la composition en polymères des particules.

1.2.2. Analyse des RUTP

Après une homogénéisation manuelle vigoureuse, un litre des échantillons de RUTP a été filtré à travers une maille métallique de 500 µm pour le fractionnement. La maille contenant la fraction > 500 µm a été conservée dans une boîte de Petri, tandis qu'un sous-échantillon de la fraction inférieure a été conservé et concentré sur un filtre métallique de 10 µm. Ces deux fractions ont ensuite été traitées séparément (figure 3).

La fraction > 500 µm a été inspectée au stéréomicroscope (Leica M125C, grossissement 8-100×). Les particules de



SDS : sulfate de dodécyle de sodium, ATR-FTIR : spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier à réflectance totale atténuée.

Figure 3. Protocole d'analyse des microplastiques dans les RUTP

plastique suspectées ont été photographiées et leur forme et leur taille ont été documentées à l'aide du logiciel Histolab (version 11.5.1). La composition chimique de ces particules a ensuite été analysée à l'aide de la spectroscopie infrarouge classique (IRTF). La mesure a été effectuée sur un spectromètre Nicolet iS5 (Thermo Scientific) couplé à un accessoire iD7 ATR-Diamond. Le logiciel OMNIC (Thermo Fischer Scientific) a été utilisé pour comparer les spectres obtenus à la base de données de référence. Une particule est considérée comme identifiée avec succès lorsque le score de ressemblance entre le spectre obtenu et celui de la base de données est supérieur à 70.

Concernant la fraction < 500 µm, et étant donné les niveaux de matière organique présents dans nos échantillons, le prétraitement des échantillons a dû être adapté. Ce dernier est constitué non plus de digestion chimique comme ce qui a été opéré pour les dépôts du réseau, mais d'une première étape avec l'ajout de SDS pour dénaturer les protéines, et deux étapes successives mettant en œuvre les enzymes protéase et cellulase. Après ce traitement, les échantillons sont filtrés sur filtres Anodisc et les microplastiques analysés selon la même méthodologie que celle décrite pour les dépôts de réseau.

1.3. Précautions contre la contamination des échantillons

Plusieurs précautions ont été prises pour éviter toute contamination des échantillons. Pendant l'échantillonnage, les équipements en plastique ont été évités et le matériel d'échantillonnage des microplastiques a été conservé dans une boîte en aluminium avec un couvercle. Les ouvertures des seaux, entonnoirs ou bouteilles ont été recouvertes de papier d'aluminium afin d'éviter le dépôt de microplastiques sur les surfaces en contact avec l'échantillon. Les sources potentielles de microplastiques sur le site d'échantillonnage et pendant l'échantillonnage, telles que la couleur et le matériau des vêtements des personnes présentes sur le site, ont été documentées. Des vêtements en matériaux naturels ont été portés dans la mesure du possible. Le matériel d'échantillonnage a été nettoyé avant d'être utilisé en laboratoire à l'aide d'éponges et de brosses entièrement fabriquées à partir de matériaux naturels (sans plastique). Au laboratoire, les mesures de prévention de la contamination suivantes ont été également prises. Toute la verrerie a été calcinée (2 h à 525 °C) avant d'être utilisée. Les filtres en acier inoxydable utilisés à toutes les étapes du protocole ont également tous été calcinés. Une blouse de laboratoire en coton était toujours portée, les gants synthétiques étaient évités lorsqu'ils n'étaient pas

nécessaires pour des raisons de sécurité (uniquement nécessaires pour le traitement au H₂O₂). Toutes les étapes du traitement ont été effectuées sous une hotte à flux laminaire. Toutes les surfaces de travail ont été nettoyées avant utilisation avec un essuie-tout en coton en utilisant de l'eau du robinet filtrée et de l'éthanol filtré. Pour les dépôts de réseaux ou les RUTP, plusieurs blancs terrains et laboratoire ont été réalisés pour contrôler la contamination potentielle pendant le traitement en laboratoire. De manière générale, les blancs sont généralement très peu contaminés. Au maximum trois microplastiques (le plus souvent du polyéthylène – PE) peuvent être détectés ; contamination très négligeable comparativement au nombre de microplastiques comptés pour les échantillons et prises d'essai considérés.

2. Résultats et discussions

2.1. Microplastiques dans les dépôts du réseau d'assainissement

2.1.1. Teneurs en microplastiques

Les microplastiques (entre 25 µm et 500 µm) ont été détectés dans tous les échantillons de dépôts du réseau. Les teneurs fluctuent entre 5×10^3 et 178×10^3 particules/kg de sédiment sec (figure 4), avec une concentration médiane estimée à 44×10^3 particules/kg. On peut observer que le niveau de contamination par les MP dans les sédiments varie entre les différents sites d'échantillonnage, indépendamment de leur localisation sur des collecteurs primaires ou secondaires. Si les eaux usées peuvent être considérées comme relativement homogènes et de qualité similaire au sein du réseau parisien, la variabilité des teneurs en MP dans les dépôts de réseaux pourrait être liée à des processus de sédimentation et piégeages différents au sein du système. Cette accumulation dépend généralement de différents facteurs tels que le débit et donc l'écoulement

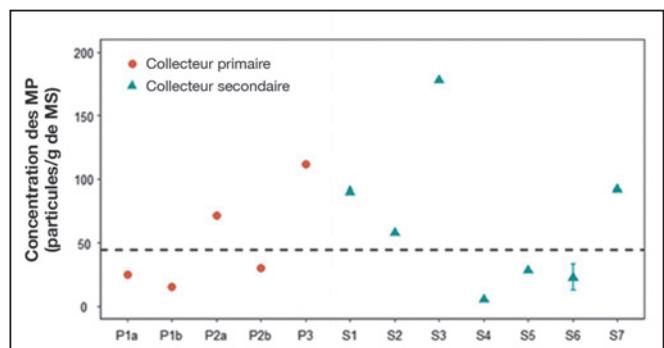


Figure 4. Teneurs en microplastiques (10^3 particules/kg) dans les dépôts de réseaux pour les collecteurs primaires (point rouge) et secondaires (triangle bleu). Concentration médiane en pointillé. La barre bleue représente les valeurs min-max enregistrées pour l'échantillon S6, analysé en triplicat

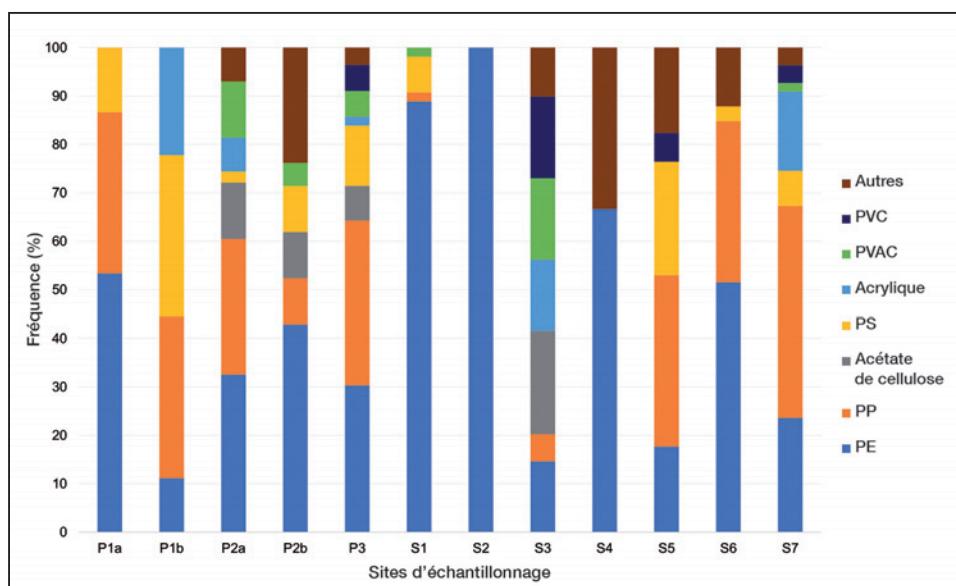
des eaux usées, la structure du collecteur et la fréquence de curage. Ne disposant pas des valeurs de débits des eaux usées au sein des collecteurs, le lien entre la teneur en MP et le débit des eaux usées n'a pas été exploré. La teneur en MP n'a montré aucune relation avec le carbone organique total mesuré dans les sédiments.

Alors que dans la littérature, les boues de station sont généralement considérées comme les matrices environnementales les plus contaminées, il est intéressant d'observer des niveaux du même ordre de grandeur entre les boues de station d'épuration et les dépôts au sein du réseau d'assainissement (tableau I). La contamination des dépôts grossiers au sein du réseau d'assainissement n'a jamais été jusqu'à présent investiguée ; cette contamination pourrait être liée à la sédimentation et au piégeage des microplastiques lors du transit des eaux usées des habitations aux stations d'épurations, dont la contamination a été mise en évidence dans plusieurs

études. Indépendamment du polymère considéré, la sédimentation d'une partie des microplastiques au sein du réseau pourrait être liée aux interactions avec les autres particules des eaux usées, et/ou à la formation d'hétéro-agrégats avec d'autres particules minérales ou organiques, et/ou à la formation de biofilm. En d'autres termes, les résultats de cette étude montrent un stock important de microplastiques dans ces dépôts et le risque associé de transfert lors d'événements pluvieux en raison de la remise en suspension de ces sédiments. Si ces résultats sont originaux, nous ne disposons pas à ce jour d'éléments permettant d'évaluer la proportion de microplastiques présents dans les eaux usées et qui sédimentent au sein du réseau.

2.1.2. Polymères et distributions de taille

Douze types de polymères différents ont été trouvés dans les dépôts (figure 5). Le polyéthylène (PE) est le plus abondant, présent dans tous les échantillons, allant de 11 % à 100 %. Le polypropylène (PP) et le polystyrène



PVC : polychlorure de vinyle, PVAC : polyacétate de vinyle, PS : polystyrène, PP : polypropylène, PE : polyéthylène.

Figure 5. Nature des microplastiques dans les dépôts de réseau. La fréquence a été calculée sur la base du nombre de particules de chaque polymère par rapport au nombre total de particules dans chaque échantillon. Le groupe "Autres" comprend l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), le polyamide (PA), les polyesters (PEST), le polyuréthane (PU) et le copolymère de vinyle (VC)

Pays	Type d'échantillon	Contamination (10^3 particules/kg)	Référence
France	Dépôts de réseau	5 - 178	Cette étude
Grande-Bretagne	Boues brutes	107,5	HARLEY-NYANG <i>et al.</i> [2022]
Italie	Boues primaires	1,67	PITTURA <i>et al.</i> [2020]
	Boues secondaires	5,3	
Espagne	Boues brutes	133 ± 59	EDO <i>et al.</i> [2019]

Tableau I. Contamination en microplastiques (MP) dans quelques boues brutes des stations d'épuration en Europe. Les valeurs sont présentées sous forme de min-max ou de moyenne avec des écarts types en fonction des données disponibles

(PS) sont également abondants et fréquemment observés, présents dans 10 et 9 échantillons respectivement. L'acétate de cellulose est abondant dans S3, jusqu'à 21 %, alors qu'il est absent de la plupart des échantillons. Le même phénomène a été observé pour l'acrylique, l'acétate de polyvinyle (PVAC) et le chlorure de polyvinyle (PVC). D'autres polymères étaient moins fréquemment présents, ne représentant que 7 % de toutes les particules de plastique détectées ($n = 424$). La composition des polymères diffère d'un échantillon à l'autre. Alors que certains échantillons (par exemple, P2a, P3, S3) contenaient 8 à 9 polymères différents, S2 était composé exclusivement de PE. Des recherches sur les boues d'épuration ont également trouvé du PE et du PP en abondance, ce qui est cohérent avec les résultats de cette étude [VOLLERTSEN et HANSEN, 2017; LI et al., 2018; LIU et al., 2019; EL HAYANY et al., 2022]. Cependant, ces auteurs ont également trouvé une grande quantité de PA ou de nylon dans les boues, ce qui pourrait provenir de l'activité de blanchisserie des textiles. Dans cette étude, le PA était présent dans les sédiments, mais seulement dans 4 des 12 échantillons, représentant moins de 2 % du total des particules détectées. Outre le PP, le PE et le PA, qui sont considérés comme des polymères de faible densité, des polymères de haute densité tels que le PEST, l'acétate de cellulose et le PVC ont été parfois détectés dans les sédiments, ce qui diffère de la composition en polymères des boues d'épuration. Cette différence peut être attribuée à une sédimentation de ces derniers au sein du réseau avant leur arrivée en station d'épuration et/ou au manque d'harmonisation de la méthodologie. Par exemple, certaines études effectuent une caractérisation chimique uniquement sur une sous-population de particules suspectées en raison des limites technologiques actuelles [GIES et al., 2018; LI et al., 2018]. D'autres études ont utilisé du NaCl (1,2 g/cm³) pour la séparation des densités, solution moins dense que la solution ici utilisée (NaI, 1,6 g/cm³), ce qui ne permet pas de récupérer la même fraction de polymères [LI et al., 2018; LIU et al., 2019].

La distribution de la taille des particules trouvées dans cette étude montre une prédominance des particules de petite taille (20 % inférieures à 100 µm et la plupart d'entre elles inférieures à 300 µm). Ces résultats sont en accord avec des études antérieures [LIU et al., 2019; EL HAYANY et al., 2022].

2.2. Microplastiques dans les rejets urbains de temps de pluie

2.2.1. Fraction supérieure à 500 µm

L'analyse de la fraction de taille > 500 µm a permis de détecter des MP dans 11 des 23 échantillons de RUTP.

Au total, 14 particules ont été identifiées comme des microplastiques. Le nombre de particules variait de 1 à 3 MP par échantillon, ce qui correspondait à une concentration de MP > 500 µm entre 0,9 et 3,2 particules/L. Les particules détectées étaient transparentes ou de couleur verte, rouge, noire et jaune. La taille des particules variait de 1200 à 4700 µm, la forme la plus courante étant celle de fragments. Plusieurs fibres ont également été observées enchevêtrées sur les mailles du filet, ce qui a rendu impossible le tri des fibres individuelles en vue de leur identification chimique.

2.2.2. Fraction < 500 µm

2.2.2.1. Niveaux de concentrations

Au total, 1973 MP ont été détectés dans les RUTP, sur l'ensemble des échantillons. Les concentrations par déversement sont illustrées figure 6. Sur l'ensemble des événements et pour les deux sites, la concentration moyenne est de 178,6 particules/L et une concentration médiane de 156,2 particules/L. La concentration la plus élevée de MP a été enregistrée à La Brèche lors de l'événement du 17 octobre 2022 avec 391,5 particules/L. Cette concentration est près de 6 fois supérieure à celle de l'événement du 17 octobre 2022. Elle est près de 6 fois supérieure à la valeur la plus faible documentée à Clichy le 30 juin 2022 avec 67,7 particules/L.

À ce jour, une seule étude a été publiée sur les niveaux de contamination des RUTP par les microplastiques. Cette étude, qui a été réalisée à Shanghai (Chine) et qui a adopté une méthodologie relativement proche de celle déployée dans cette étude, rapporte des concentrations de MP allant jusqu'à 8 500 particules/L dans les RUTP [CHEN et al., 2020], ce qui est presque deux ordres de grandeur plus élevés que les résultats de la présente étude. Les auteurs précisent que le réseau unitaire de la ville de Shanghai reçoit non seulement une grande quantité d'eaux usées domestiques provenant

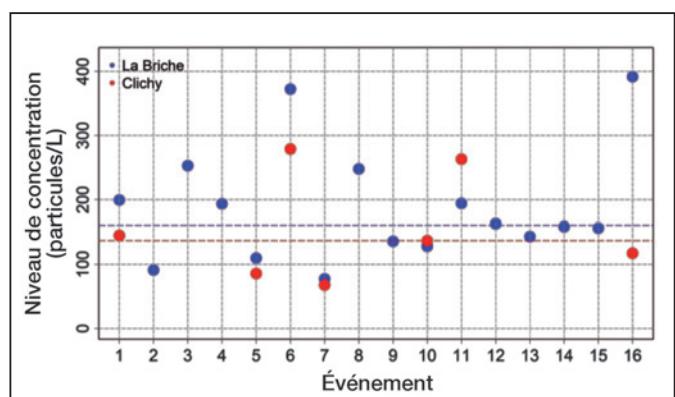


Figure 6. Concentrations de MP (25-500 µm) dans les RUTP (ligne pointillée : valeur médiane ; unité : particule/L)

de plus de 24 millions d'habitants, mais aussi des eaux usées industrielles, ce qui n'est pas le cas de la région parisienne.

2.2.2.2. Composition des microplastiques

Au total, 14 types de polymères différents ont été détectés dans les RUTP (figure 7). Le PE et le PP étaient les polymères les plus abondants, représentant respectivement 45 % et 38 % des particules totales. Le PEST et le PS ont été détectés à une fréquence beaucoup plus faible. D'autres polymères ont également été détectés, mais avec une occurrence bien moindre. Ces polymères sont regroupés dans la catégorie "autres", qui représente 6 % des particules totales. Le profil général des polymères est cohérent avec ce qui peut être observé dans les dépôts de réseau, ou plus classiquement dans les eaux résiduaires urbaines.

2.2.2.3. Distribution de taille

Les particules inférieures à 300 µm représentent la plus grande proportion de MP dans les RUTP. La plupart de ces particules se situent dans une fourchette de 25 à 100 µm. Il existe des similitudes dans la distribution de la taille des particules trouvées sur les deux sites étudiés. Malgré la différence de méthodologie, l'abondance des particules de moins de 500 µm a également été observée par SUN et al. [2023].

2.2.3. Relation entre concentrations en MP et proportion d'eaux usées et d'eaux pluviales

La proportion d'eaux de ruissellement et d'eaux usées dans les RUTP a été estimée pour chaque événement sur la base de la conductivité électrique. Cette estimation a été réalisée selon l'hypothèse que la conductivité des eaux usées varie de 1050 à 1170 µS/cm, tandis que celle des eaux pluviales varie de 80 à 150 µS/cm [GASPERI et al., 2010]. Selon cette hypothèse, la proportion d'eaux usées dans les RUTP variait entre 15 et 90 %. Aucune relation claire entre la concentration en MP et

la proportion d'eaux usées ou d'eaux pluviales dans les RUTP, ni avec d'autres paramètres physico-chimiques, n'a pu être mise en évidence. De même, aucune relation n'a pu être établie entre les concentrations en MP dans les RUTP, les débits moyens ou les débits maximaux au cours du déversement. Cela suggère que la contamination des MP dans les RUTP est complexe et peut dépendre de nombreux autres facteurs. Parmi ces facteurs, la remise en suspension des dépôts au sein du réseau pourrait jouer un rôle clé. Un lien entre concentrations en MP dans les RUTP et les débits pourrait exister, mais plus de données sont ici nécessaires pour l'explorer.

2.2.4. Flux de microplastiques rejetés par les RUTP à l'échelle de la métropole parisienne

En considérant que 21 millions de m³ de RUTP sont déversés en Seine chaque année par temps de pluie et les concentrations minimales et maximales observées dans cette étude, un flux annuel de particules a été estimé entre $1,4 \times 10^{12}$ et $8,2 \times 10^{12}$ particules/an. Ce flux peut être comparé à deux niveaux, le premier au regard des apports liés aux stations d'épuration, le second comparativement aux flux transitant en Seine.

Pour ce qui concerne les rejets de station d'épuration, n'ayant pas effectué de mesures avec la méthodologie récemment développée dans cette étude, des flux ont été estimés en considérant la charge de MP par habitant que l'on peut trouver dans la littérature. Selon ces estimations, des flux compris entre $2,4 \times 10^{11}$ et $2,3 \times 10^{13}$ particules/an pourraient être déversés dans les milieux récepteurs depuis les stations d'épuration. Ces flux apparaissent globalement du même ordre de grandeur que les flux liés aux RUTP. Alors que les rejets des stations d'épuration sont réguliers et présentent des concentrations relativement faibles, les RUTP sont intermittents, se déversent sur une courte durée, mais présentent des concentrations plus élevées. Des études

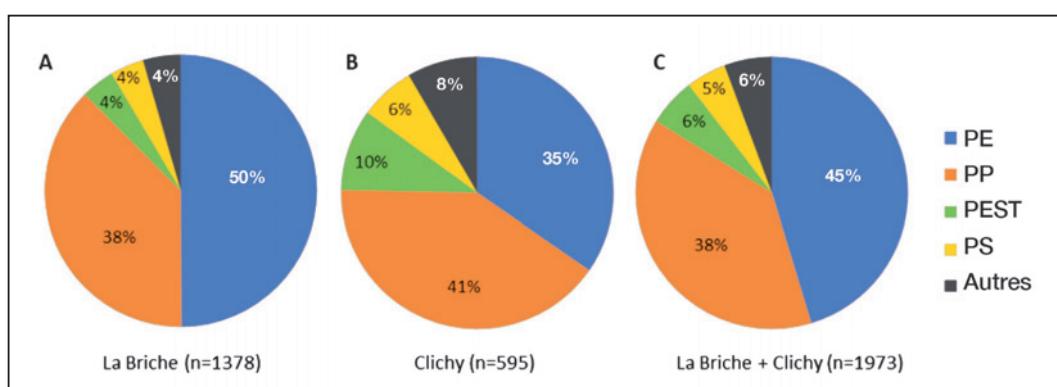


Figure 7. Nature des microplastiques observés dans les RUTP
Se reporter à la figure 5 pour la signification des abréviations.

récentes ont également souligné l'importance des flux déversés par les RUTP comparativement aux effluents de stations d'épuration. Par exemple, CHEN et al. [2020] ont rapporté que le flux de MP déversés par les RUTP était significativement plus élevé que celui rejeté par les effluents des stations d'épuration à Shanghai (Chine) ($8,5 \times 10^{14}$ particules/an contre $1,43 \times 10^{14}$ particules/an). Dans une autre étude réalisée à Nanning (Chine), ZHOU et al. [2023] indiquent que les flux pour les déversoirs d'orage sont 10 fois supérieurs à ceux liés aux effluents de stations.

En Seine, à l'aval de l'agglomération parisienne, le flux annuel de MP pour la colonne d'eau a été estimé à environ $1,1 \times 10^{13}$ particules/an, témoignant de l'importance des RUTP sur les flux transitant en Seine. Ces derniers pourraient contribuer jusqu'à 70 % des flux observés en Seine.

Conclusions et perspectives

Cet article s'est focalisé sur la contamination en microplastiques des dépôts de réseaux d'assainissement et sur les RUTP. Les résultats ont permis de démontrer qu'une partie des microplastiques véhiculés par les eaux résiduaires urbaines peut sédimentter au sein du réseau lors du transfert de ces eaux jusqu'aux stations d'épuration. Si ces résultats sont originaux, nous ne disposons pas à ce jour d'éléments permettant d'évaluer la proportion de microplastiques présents dans les eaux usées et qui sédimentent au sein du réseau. Une première perspective de ce travail pourrait être de mieux étudier la sédimentation de ces particules au sein des réseaux, soit au regard des conditions d'écoulement et à l'hydraulique des sites, soit en fonction des interactions avec les autres particules. Ces phénomènes conduisent à la formation d'un stock important au sein du réseau, et au risque associé de transfert lors d'événements pluvieux en raison de la remise en suspension de ces sédiments.

À l'instar de ce qui peut être observé pour les matières en suspension, aucune relation claire ne peut être établie entre concentrations en MP dans les RUTP, la proportion d'eaux usées et d'eaux pluviales, ou les débits moyens ou maximaux suggérant que la contamination des MP dans les RUTP est complexe et peut dépendre de nombreux autres facteurs. Parmi ces facteurs, la remise en suspension des dépôts au sein du réseau pourrait jouer un rôle clé. Préciser ce rôle constitue une seconde perspective à ce travail. Cette dernière pourrait explorer le lien entre débits et remobilisation des MP depuis les dépôts.

En considérant que 21 millions de m³ de RUTP sont déversés en Seine chaque année et les concentrations minimales et maximales, un flux annuel de particules a été estimé entre 1,4 et $8,2 \times 10^{12}$ particules/an, flux relativement conséquent au regard des flux rejetés par les stations d'épuration ou à l'aval de l'agglomération parisienne. Affiner ces bilans, en disposant de données pour les effluents de station d'épuration, apparaît nécessaire pour confirmer ces conclusions.

Remerciements

La thèse de doctorat de Trang Minh-Nguyen a été menée dans le cadre du projet européen LimnoPlast – Microplastics in Europe's Freshwater Ecosystems: from sources to solutions – projet financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, dans le cadre de la convention de subvention n° 860720 (European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 860720). L'accès au Micro-FTIR a été accordé par la plateforme Prammics de l'OSU-Efluve. Les échantillonnages des dépôts de réseau ont été réalisés par la section Assainissement de la Ville de Paris et nous remercions Monsieur Thomas Gillet.

Bibliographie

CHEN H., JIA Q., ZHAO X., LI L., NIE Y., LIU H., YE J. (2020) : « The occurrence of microplastics in water bodies in urban agglomerations: Impacts of drainage system overflow in wet weather, catchment land-uses, and environmental management practices ». *Water Research*; 183 : 116073.

EDO C., GONZÁLEZ PPLEITER M., LEGANÉS F., FERNÁNDEZ-PIÑAS F., ROSAL R. (2019) : « Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge ». *Environmental Pollution*; 259 : 113837.

EL HAYANY B., RUMPEL C., HAFIDI M., EL FELS L. (2022) : « Occurrence, analysis of microplastics in sewage sludge and

their fate during composting: A literature review ». *Journal of Environmental Management*; 317 : 115364.

GASPERI J., GROMAIRE M.C., KAFI M., MOILLERON R., CHEBBO G. (2010) : « Contributions of wastewater, runoff and sewer deposit erosion to wet weather pollutant loads in combined sewer systems ». *Water Research*; 44(20) : 5875-86.

GIES E.A., LENOBLE J. L., NOËL M., ETEMADIFAR A., BISHAY F., HALL E.R., ROSS P.S. (2018) : « Retention of microplastics in a major secondary wastewater treatment plant in Vancouver, Canada ». *Marine Pollution Bulletin*; 133 : 553-61.

- HARLEY-NYANG D., MEMON F.A., JONES N., GALLOWAY T. (2022) : « Investigation and analysis of microplastics in sewage sludge and biosolids: A case study from one wastewater treatment works in the UK ». *Science of the Total Environment*; 823 : 153735.
- KRISHNAN R.Y., MANIKANDAN S., SUBBAIYA R., KARME-GAM N., KIM W., GOVARTHANAN M. (2023) : « Recent approaches and advanced wastewater treatment technologies for mitigating emerging microplastics contamination – A critical review ». *Science of the Total Environment*; 858 : 159681.
- LI X., CHEN L., MEI Q., DONG B., DAI X., DING G., ZENG E. (2018) : « Microplastics in sewage sludge from the wastewater treatment plants in China ». *Water Research*; 142 : 75-85.
- LIU X., YUAN W., DI M., LI Z., WANG J. (2019) : « Transfer and fate of microplastics during the conventional activated sludge process in one wastewater treatment plant of China ». *Chemical Engineering Journal*; 362 : 176-82.
- LIU W., ZHANG J., LIU H., GUO X., ZHANG X., YAO X., et al. (2021) : « A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms ». *Environment International*; 146 : 106277.
- PASSERAT J., OUATTARA N.K., MOUCHEL J.-M., ROCHER V., SERVAIS P. (2011) : « Impact of an intense combined sewer overflow event on the microbiological water quality of the Seine River ». *Water Research*; 45(2) : 893-903.
- PITTURA L., FOGLIA A., AKYOL Ç., CIPOLLETTA G., BENEDETTI M., REGOLI F., et al. (2020) : « Microplastics in real wastewater treatment schemes: Comparative assessment and relevant inhibition effects on anaerobic processes ». *Chemosphere*; 262 : 128415.
- ROCHER V., GASPERI J., AZIMI S., CELAUDON T., MOILLE-RON R., CHEBBO G. (2004) : « Hydrocarbures et métaux lourds associés aux sédiments de stations de relevage de l'agglomération parisienne ». *La Houille Blanche*; 2 : 22-30.
- SUN X., JIA Q., YE J., ZHU Y., SONG Z., GUO Y., CHEN H. (2023) : « Real-time variabilities in microplastic abundance and characteristics of urban surface runoff and sewer overflow in wet weather as impacted by land use and storm factors ». *Science of the Total Environment*; 859(Part 2) : 160148.
- VOLLERTSEN J., HANSEN A. (2017) : « Microplastic in Danish wastewater: Sources, occurrences and fate ». *Environmental Project*; N° 1906. Danish Environmental Protection Agency, 55 p.
- XU Z., BAI X., YE Z. (2021) : « Removal and generation of microplastics in wastewater treatment plants: A review ». *Journal of Cleaner Production*; 291 : 125982.
- ZHOU Y., LI Y., YAN Z., WANG H., CHEN H., ZHAO S., et al. (2023) : « Microplastics discharged from urban drainage system: Prominent contribution of sewer overflow pollution ». *Water Research*; 236 : 119976.