RECORD

ETUDE N° 24-0338/1A

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

ETAT DES PROCEDES D'ELIMINATION DES MICROPLASTIQUES DANS LES EFFLUENTS LIQUIDES ET LES EAUX DOMESTIQUES

THE STATE OF MICROPLASTIC REMOVAL PROCESSES IN LIQUID EFFLUENTS AND DOMESTIC WATER

Avril 2026

L.ROUVIERE – Treewater
N. DUMONT– INSA de Lyon

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.
Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.
Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des structures spécialisées, publiques ou privées.

Avertissement :
Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.
Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :

  RECORD, Etat des procédés d'élimination des microplastiques dans les effluents liquides et les eaux domestiques, 2026, 272p, n°24-0338/1A

- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique) www.ademe.fr

© RECORD 2026

RESUME
Les nano- et microplastiques (N-MPs) sont aujourd'hui omniprésents dans l'environnement. Ils ont été détectés dans tous les compartiments, incluant les eaux douces et marines, les sols, l'air, les organismes vivants ainsi que dans les aliments et l'eau potable. Leur persistance, leur petite taille et leur capacité à transporter d'autres contaminants en font des polluants préoccupants. De nombreuses études ont mis en évidence leurs effets négatifs sur les écosystèmes, notamment des impacts sur la faune aquatique, la biodiversité et le fonctionnement des chaînes trophiques, ainsi que des risques potentiels pour la santé humaine liés à leur ingestion, leur inhalation et au relargage d'additifs ou de polluants adsorbés.
L'étude des N-MPs reste cependant complexe. Leur isolement et leur quantification sont rendus difficiles par la diversité des polymères, des tailles et des formes, ainsi que par l'absence de méthodes analytiques harmonisées, en particulier pour les plus petites particules. Ces limitations contribuent à une forte variabilité des données rapportées dans la littérature.
Les stations d'épuration des eaux usées jouent un rôle clé dans la gestion des microplastiques. Les traitements préliminaires, primaires et secondaires permettent d'éliminer une fraction importante des MPs, principalement par séparation physique et par transfert vers les boues. Toutefois, au regard des volumes d'eau traités quotidiennement, même une faible fraction résiduelle représente un flux significatif de microplastiques rejetés dans le milieu aquatique. De plus, ces procédés conduisent à une accumulation massive des MPs dans les boues, qui sont fréquemment valorisées en agriculture, constituant ainsi une voie de contamination des sols. De nombreuses études en laboratoire explorent actuellement des solutions innovantes pour éliminer ou dégrader les microplastiques présents dans l'eau. En revanche, les travaux consacrés spécifiquement aux boues restent encore très limités, malgré leur rôle central dans le devenir environnemental des N-MPs, ce qui souligne la nécessité de recherches approfondies sur cette matrice complexe.

MOTS CLES
Nano- et microplastiques, quantification, élimination, dégradation, analyses, boues, traitement

---

SUMMARY
Nano- and microplastics (N-MPs) are now ubiquitous in the environment. They have been detected in all compartments, including fresh and marine waters, soil, air, living organisms, food, and drinking water. Their persistence, small size, and ability to carry other contaminants make them pollutants of concern. Numerous studies have highlighted their negative effects on ecosystems, as well as potential risks to human health related to their ingestion, inhalation, and the release of additives or adsorbed pollutants.
However, the study of N-MPs remains complex. Their isolation and quantification are made difficult by the diversity of polymers, sizes, and shapes, as well as by the lack of harmonized analytical methods, particularly for the smallest particles. These limitations contribute to a high variability in the data reported in the literature.
Wastewater treatment plants play a key role in microplastic management. Preliminary, primary, and secondary treatments remove a significant proportion of MPs, mainly through physical separation and transfer to sludge. However, given the volumes of water treated daily, even a small residual fraction represents a significant flow of microplastics released into the aquatic environment. In addition, these processes lead to a massive accumulation of MPs in sludge, which is frequently used in agriculture, thus constituting a route of soil contamination. Numerous laboratory studies are currently exploring innovative solutions to remove or degrade microplastics present in water. However, research specifically devoted to sludge remains very limited, despite its central role in the environmental fate of N-MPs, highlighting the need for in-depth research on this complex matrix.

KEY WORDS
Nano and microplastics, quantification, removal, degradation, analyses, sludge, treatment

Contexte de l'étude

Les plastiques sont omniprésents dans notre environnement dû à leur coût faible de production et leurs propriétés physiques leur permettant d'être utilisés dans de nombreuses applications. En 2023, 413.8 mégatonnes de plastiques ont été produites à l'échelle mondiale selon l'étude Plastic Europe menée en 2024 (Plastics Europe 2024), et cette production ne cesse d'augmenter. Les micro- et nanoplastiques issus pour la majorité de la dégradation de macroplastiques tendent à s'accumuler dans l'environnement, ce qui conduit à une pollution persistante et donc nuisible pour l'environnement et la santé. L'augmentation du nombre de publications scientifiques autour du sujet des nano et microplastiques reflète l'ampleur de cette pollution préoccupante.

Objectifs de l'étude

Cette étude vise à identifier les méthodes d'élimination des nano- et microplastiques présents dans les eaux usées. Afin de comprendre les différents aspects du sujet, une définition des termes nano- et microplastiques est proposée. Un focus est présenté sur les réglementations actuelles mondiales européenne et française. Cette étude s'intéresse aux techniques d'analyses pour la caractérisation et la quantification des N-MPs dans les eaux propres mais aussi pour des matrices plus complexes. Cette partie de l'étude révèle les verrous actuels des recherches sur la mise en place de traitement des nano et microplastiques. Enfin l'un des principaux objectifs de l'étude est de décrire les traitements mis en place actuellement ou en développement dans les stations d'épurations. Finalement le projet conclut sur les traitements visant à éliminer cette pollution dans les boues.

Définition des N-MPs

Les nanoplastiques (NPs) et microplastiques (MPs) sont des particules de plastiques de très petite taille. Ils peuvent être produits intentionnellement, et sont alors nommés primaires, Ils peuvent aussi être issus de l'usure d'un objet ou de la dégradation de macroplastiques sous l'effet de processus environnementaux, et sont alors appelés secondaires (définitions retenues dans le cadre de cette étude).
La taille des particules fait l'objet de discussion dans la sphère scientifique. Afin de faciliter la lecture de l'étude, il a été décidé que les NPs sont compris entre 1 nm et 1 000 nm et les MPs entre 1 µm et 5 mm. Les N-MPs peuvent avoir diverses formes, elles ont été rassemblées en cinq catégories différentes : fragment, fibre, bille, granule et mousse.

Les polymères plastiques sont distingués selon le monomère utilisé pour les synthétiser. Un plastique formé avec un même monomère peut avoir des caractéristiques différentes selon la taille du polymère, la méthode de formation du plastique et les additifs ajoutés. En 2023, les cinq plastiques les plus produits dans le monde sont le polyéthylène haute et basse densité (PEHD et PEBD, 26,2%), le polypropylène (PP, 19 %), le polyéthylène téréphtalate (PET, 6,2 %), le polyuréthane (PUR, 5,3 %) et le polystyrène (PS, 5,2 %) (Plastics Europe 2024).

La dégradation des plastiques est un processus long qui se produit sous l'effet de facteurs environnementaux abiotiques et biotiques. Plusieurs paramètres peuvent l'influencer, en plus de leur composition chimique. En effet, l'ajout d'additifs peut jouer un rôle important dans cette dégradation en modifiant leurs caractéristiques physico-chimique (anti-oxydants, colorants, surfactants…). Ces additifs, peuvent représenter plus de 50 % de la masse du matériau. Certains d'entre eux sont connus pour être dangereux et toxiques pour les organismes.

Study context

Plastics are ubiquitous in our environment due to their low production cost and physical properties, which make them suitable for many applications. In 2023, 413.8 megatonnes of plastics were produced worldwide according to the Plastics Europe study published in 2024 (Plastics Europe 2024), and this production continues to increase. Micro- and nanoplastics, mainly originating from the degradation of macroplastics, tend to accumulate in the environment, leading to persistent pollution that is therefore harmful to the environment and to health. The growing number of scientific publications on nano- and microplastics reflects the magnitude of this concerning pollution.

Study objectives

This study aims to identify methods for removing nano- and microplastics present in wastewater. To address the different aspects of the topic, a definition of the terms nano- and microplastics is proposed. A focus is provided on current global, European and French regulations. The study reviews analytical techniques for the characterization and quantification of N-MPs in clean waters as well as in more complex matrices. This part highlights current bottlenecks in research aimed at implementing nano- and microplastic treatments. Finally, one of the main objectives of the study is to describe the treatments currently implemented or under development in wastewater treatment plants. The project concludes with a review of treatments aimed at removing this pollution from sludge.

Definition of N-MPs

Nanoplastics (NPs) and microplastics (MPs) are very small plastic particles. They may be intentionally produced, in which case they are referred to as primary. They may also result from the wear of an item or from the degradation of macroplastics under the effect of environmental processes; in that case they are referred to as secondary, within the scope of this study.
The size range of these particles is debated within the scientific community. To facilitate reading, this study considers NPs to range from 1 nm to 1,000 nm and MPs from 1 µm to 5 mm. N-MPs can take various shapes, grouped here into five categories: fragment, fibre, bead, pellet and foam.

Plastic polymers are distinguished by the monomer used to synthesize them. A plastic made from the same monomer can have different characteristics depending on polymer chain length, the manufacturing method and the additives used. In 2023, the five most-produced plastics worldwide were high- and low-density polyethylene (HDPE and LDPE, 26.2%), polypropylene (PP, 19%), polyethylene terephthalate (PET, 6.2%), polyurethane (PUR, 5.3%) and polystyrene (PS, 5.2%) (Plastics Europe 2024).

Plastic degradation is a slow process that occurs under the effect of abiotic and biotic environmental factors. Several parameters can influence it, in addition to chemical composition. In particular, additives can play an important role by modifying physico-chemical characteristics (antioxidants, dyes, surfactants, etc.). These additives can account for more than 50% of the material's mass, and some are known to be hazardous and toxic to organisms.

Conversely, UV radiation from sunlight induces the formation of hydrophilic chemical groups on the surface of N-MPs, thereby accelerating their deterioration.

À l'inverse, les UV issus de la lumière solaire induisent la formation de groupements chimiques hydrophiles à la surface des N-MPs, accélérant ainsi leur détérioration.

Sept sources majeures de microplastiques ont été mises en évidence par l'Union Internationale de Conservation de la Nature (UICN) : les textiles synthétiques, les pneus de voiture, les poussières urbaines, les marquages au sol, les peintures marines, les produits de soin corporel et finalement les billes de plastiques. Ainsi 1,8 et 5 millions de tonnes de microplastiques seraient libérés dans l'environnement chaque année au niveau mondial en ne prenant en compte que ces 7 sources de N-MPs.

Globalement il y a un manque de données sur la pollution des N-MPs et certaines sources sont davantage mises en avant car elles sont plus faciles à quantifier ; c'est le cas du relargage des microfibres textiles lors du lavage du linge, de l'abrasion des pneumatiques et des granulés plastiques. De plus, les nanoplastiques ne sont pas pris en compte dans les études. En effet, leur quantification reste particulièrement difficile à ce jour.

Les N-MPs, issus de la dégradation ou de l'usage direct de produits variés (textiles, pneus, cosmétiques, peintures, etc.), peuvent emprunter de multiples voies de transfert avant d'atteindre les milieux naturels. Ces voies incluent les effluents d'eaux usées (urbains et industriels), les eaux de ruissellement, ainsi que les débordements d'égouts.

La toxicité des N-MPs dans l'environnement et sur la santé humaine dépend de nombreux facteurs, notamment leur taille, leur forme, leur charge de surface, leur composition chimique et la présence d'additifs, dont les effets dits cocktails sont encore insuffisamment étudiés.
Les données actuelles sont insuffisantes pour déterminer si l'exposition aux N-MPs est associée à des pathologies chroniques.

Des réglementations dans de nombreux pays sont mises en place depuis une dizaine d'années. Ces réglementations visent principalement la réduction des microplastiques primaires présents dans les produits personnels ainsi que les plastiques à usages uniques.

Caractérisation et quantifications des micro-nanoplastiques

La caractérisation et la quantification des micro- et nanoplastiques représente un véritable défi. La Figure 1 permet de comprendre les différents choix de préparation de l'échantillon

Seven major sources of microplastics have been identified by the International Union for Conservation of Nature (IUCN): synthetic textiles, car tyres, urban dust, road markings, marine paints, personal care products, and plastic pellets. Between 1.8 and 5 million tonnes of microplastics would be released into the environment every year worldwide when considering only these seven sources of N-MPs.

Overall, there is a lack of data on N-MP pollution, and some sources are emphasized more because they are easier to quantify. In addition, nanoplastics are not accounted for in many studies, as their quantification remains particularly difficult to date.

N-MPs, resulting from the degradation of, or direct use of, various products (textiles, tyres, cosmetics, paints, etc.), can follow multiple transfer pathways before reaching natural environments. These pathways include wastewater effluents (urban and industrial), runoff waters, and sewer overflows.

The toxicity of N-MPs in the environment and for human health depends on many factors, including their size, shape, surface charge, chemical composition and the presence of additives, whose so-called "cocktail effects" are still insufficiently studied.
Current data are insufficient to determine whether exposure to N-MPs is associated with chronic diseases.

Regulations have been implemented in many countries over the past decade. These regulations mainly target the reduction of primary microplastics in personal care products as well as single-use plastics.

Characterization and quantification of micro- and nanoplastics

Characterizing and quantifying micro- and nanoplastics is a real challenge. Figure 1 helps to understand the different choices for sample preparation

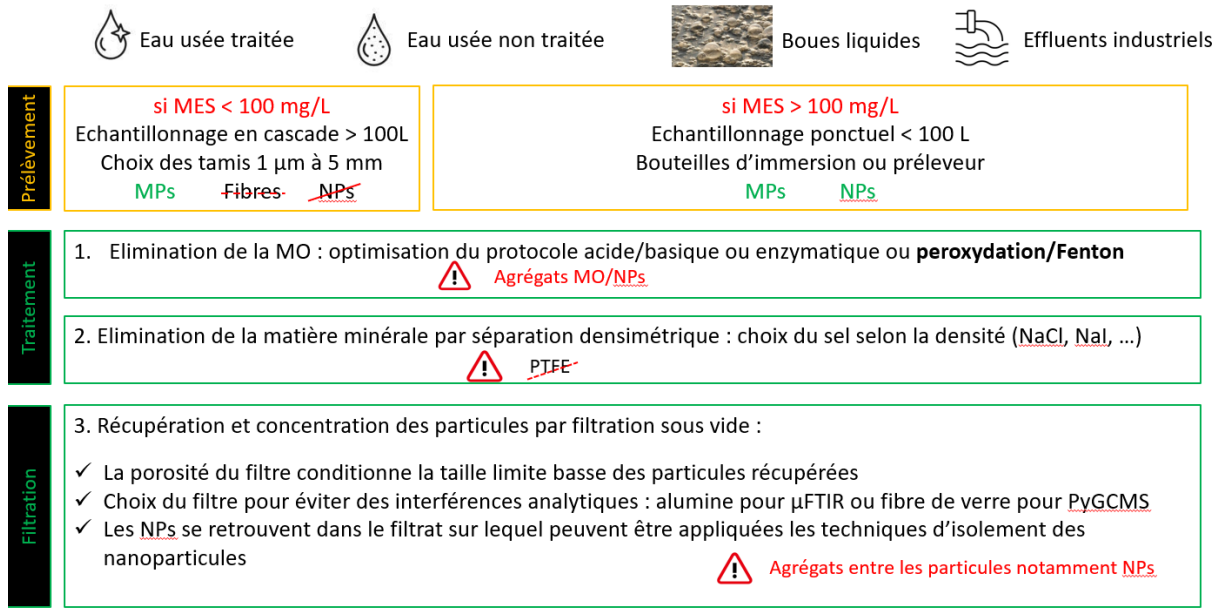


Figure 1 : Schéma de synthèse des étapes préliminaires avant analyse (RECORD, 2025)

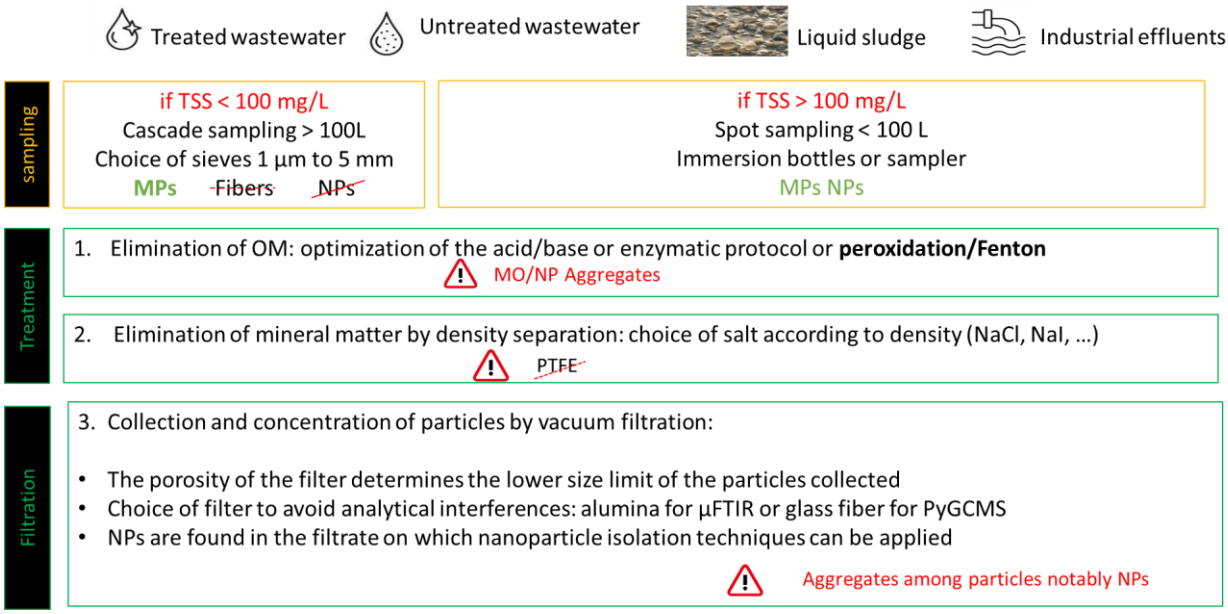


Figure 1: summary diagram of the preliminary steps prior to analysis (RECORD, 2025)

Il a été vu que plusieurs méthodes normalisées sont référencées, la Figure 2 permet d'avoir un aperçu de ces méthodes.

As noted, several standardized methods are referenced; Figure 2 provides an overview of these methods.

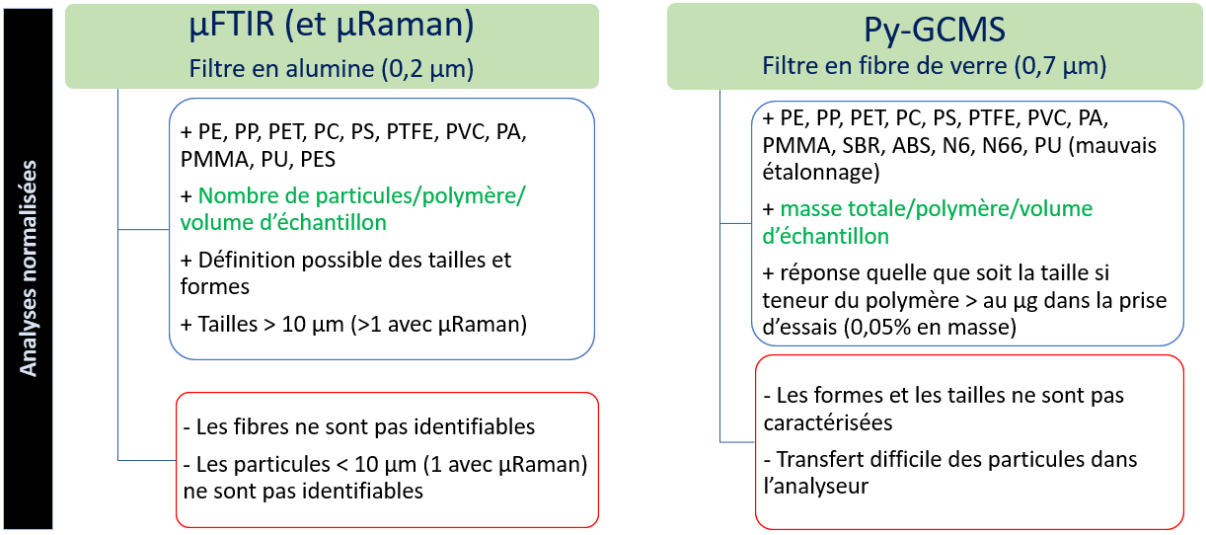


Figure 2: Techniques analytiques de caractérisation des N-MPs normalisées (RECORD,2025)

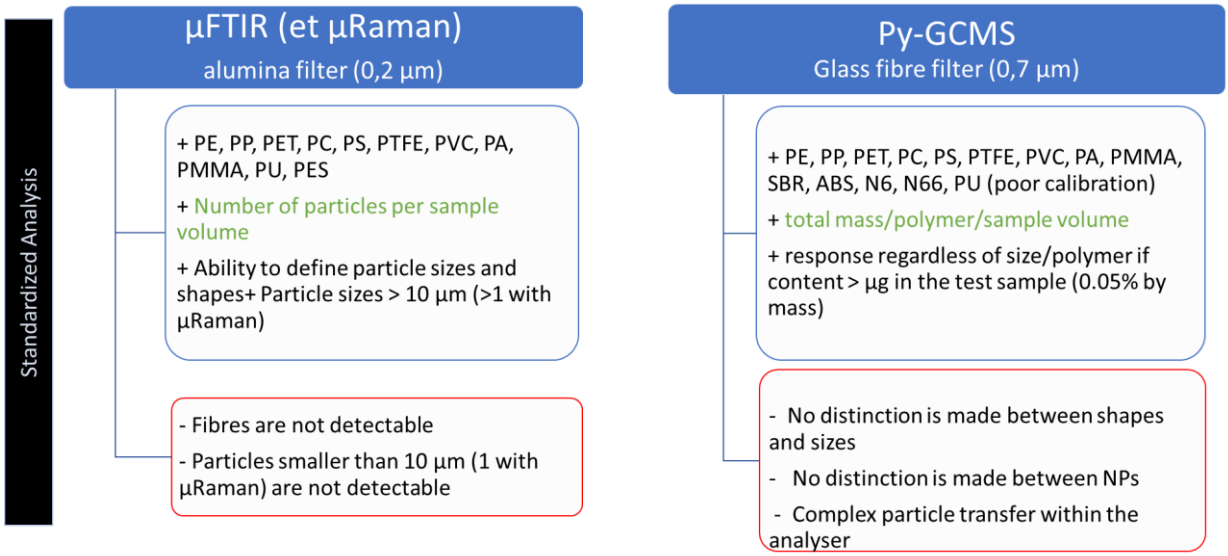


Figure 2: Standardized analytical techniques for N MP characterization (RECORD,2025)

Plusieurs points ont été mis en évidence pour mieux comprendre les enjeux des analyses. La vigilance face aux contaminations croisées et le respect rigoureux des protocoles sont essentiels pour garantir la fiabilité des résultats. En effet, chaque étape, du prélèvement au traitement des échantillons, puis à la filtration et à l'analyse, peut influencer les données obtenues, même lorsque les méthodes sont normalisées. La comparaison entre laboratoires reste donc délicate. Enfin, les différentes techniques analytiques ne fournissant pas les mêmes informations, elles doivent être considérées comme complémentaires.

Par ailleurs, la récupération et l'identification des nanoparticules (NPs) restent un défi. Les recherches sont majoritairement menées sur des matrices propres et non sur des matrices complexes, ce qui limite la représentativité des résultats. De plus, les NPs récupérées ne représentent qu'une fraction des NPs initialement présents dans l'échantillon.

Enfin, le coût des analyses, compris à ce jour entre 500 et 3000 €, dépend du traitement appliqué, lui-même lié à la teneur en matière organique et inorganique des échantillons, ainsi que de la technique analytique employée, en fonction de l'information recherchée.

Several points have been highlighted to better understand the challenges of analyses. Vigilance against cross-contamination and strict adherence to protocols are essential to ensure the reliability of results. Indeed, each step, from sampling to sample treatment, then filtration and analysis, can influence the data obtained, even when methods are standardized. Comparisons between laboratories therefore remain difficult. Finally, as the various analytical techniques do not provide the same information, they should be considered complementary.

In addition, recovering and identifying nanoparticles (NPs) remains challenging. Research is mostly conducted on clean matrices rather than complex ones, which limits the representativeness of the results. Moreover, the NPs recovered represent only a fraction of the NPs initially present in the sample.

Finally, the cost of the analyses, which currently ranges from €500 to €3,000, depends on the treatment applied, which in turn depends on the organic and inorganic content of the samples, as well as on the analytical technique used, depending on the information required.

Elimination des N-MPs présents dans les eaux usées

Les stations d'épuration ne sont actuellement ni conçues ni dimensionnées pour traiter efficacement ce type de micropolluants. Plusieurs études ont donc été menées afin d'évaluer leurs performances. C'est notamment le cas de l'étude MEDIPLAST qui, à l'issue de l'évaluation de quatre stations d'épuration situées dans la région toulonnaise, a mis en évidence des abattements compris entre 90 % et 99 %.

De nombreuses difficultés ont été rencontrées lors de l'étude. En effet, plusieurs articles ne mentionnent pas la taille limite des microplastiques détectés, mais seulement la taille du filtre utilisé. Enfin, comme vu dans la partie précédente, l'analyse des microplastiques présente de nombreuses incertitudes, que ce soit au niveau du prélèvement, de la préparation de l'échantillon ou encore de la technique d'analyse utilisée. Ainsi, il est important de considérer les pourcentages d'abattement cités comme des ordres de grandeur.

Les stations d'épuration mettent en œuvre différents procédés, ayant chacun une fonction qui leur est propre. Chaque traitement est ainsi capable d'éliminer une partie des microplastiques présents dans les effluents.

Le tableau suivant (Tableau 1) met en comparaison les différents procédés des traitements primaires et préliminaires. Le traitement primaire est majoritairement un traitement physico-chimique, qui permet de traiter les suspensions colloïdales

Removal of N-MPs present in wastewater

Wastewater treatment plants are currently neither designed nor sized to efficiently treat this type of micropollutant. Several studies have therefore been carried out to assess their performance. This is notably the case for the MEDIPLAST study which, after evaluating four wastewater treatment plants in the Toulon area, reported removal efficiencies between 90% and 99%.

Many difficulties were encountered in the study. Several articles do not report the lower size limit of detected microplastics, but only the filter size used. In addition, as seen in the previous section, microplastic analysis involves many uncertainties, whether related to sampling, sample preparation or the analytical technique used. Therefore, the reported removal percentages should be considered orders of magnitude.

Wastewater treatment plants implement different processes, each with a specific function. Each treatment step is therefore able to remove some of the microplastics present in the effluents.

The following table (Table 1) compares the different preliminary and primary treatment processes. Primary treatment is mainly a physicochemical process that makes it possible to treat colloidal suspensions.

Tableau 1: Synthèse des traitements préliminaires et primaires, et leur efficacité d'élimination des MPs (compilation RECORD, 2025) (Asadi et al. 2025) (Mebarki et al. 2025; Peydayesh et al. 2021) (Shen et al. 2022) (Esfandiari & Mowla, 2021; Pramanik et al., 2021; Swart et al., 2022)

TRL	Traitement	Technique	Avantages	Limitations	% élimination MPs	Réf
9	Préliminaire	Dégrillage – dessablage/ Déshuilage	- Élimination MPs de grandes tailles - Robuste - Présent dans les STEPs	- Insuffisant pour lutter contre les MPs	37%	(Asadi et al. 2025)
	Primaire	Coagulation/ Floculation	- Présent dans les STEPS - Simple - Peu coûteux - Peu énergivore	- Génération de boues - Efficacité impactée par le pH	> 70 % (eau de surface, eau de STEP)	(Mebarki et al. 2025; Peydayesh et al. 2021)
		Electrocoagulation	- Simple d'utilisation - Risque de contamination plus faible qu'en coagulation/floculation chimique	- Génération de boues - Consommation énergétique importante - Coût important des électrodes et de la maintenance	>90% (électrode en Al) (eau usée domestique)	(Shen et al. 2022)
		Flottation et flottation par moussage	- Rapide - Compact	- Génération de boues - Ajout d'agent moussant pouvant être nécessaire - Optimisation laborieuse des paramètres - Peu d'études à grande échelle et sur des effluents complexes	66 % - 96 % (eau synthétique dopée)	(Esfandiari & Mowla, 2021; Pramanik et al., 2021; Swart et al., 2022)

Table 1: Summary of preliminary and primary treatments and their MP removal efficiency (compilation RECORD, 2025) (Asadi et al. 2025) (Mebarki et al. 2025; Peydayesh et al. 2021) (Shen et al. 2022) (Esfandiari & Mowla, 2021; Pramanik et al., 2021; Swart et al., 2022)

TRL	Treatment	Technique	Advantages	Limitations	% MP removal	Ref.
9	**Preliminary**	Screening – grit removal / De-oiling	- Removal of large MPs - Robust - Used in WWTPs	- Insufficient to address MPs	37%	(Asadi et al. 2025)
	Primary	Coagulation/ Flocculation	- Used in WWTPs - Simple - Low cost - Low energy consumption	- Sludge generation - Efficiency impacted by pH	> 70% (surface water, WWTP water)	(Mebarki et al. 2025; Peydayesh et al. 2021)
		Electrocoagu-lation	- Easy to operate - Lower contamination risk than chemical coagulation/flocculation	- Sludge generation - High energy consumption - High cost of electrodes and maintenance	>90% (Al electrode) (domestic wastewater)	(Shen et al. 2022)
		Flotation and foam flotation	- Fast - Compact	- Sludge generation - Addition of foaming agent may be required - Laborious parameter optimization - Few large-scale studies and studies on complex effluents	66% - 96% (spiked synthetic water)	(Esfandiari & Mowla, 2021; Pramanik et al., 2021; Swart et al., 2022)

Le traitement secondaire quant à lui, est un traitement biologique à base de biomasse. Il vise à éliminer la matière organique (DCO et DBO), ainsi que l'azote et le phosphore. Le tableau suivant (Tableau 2) permet de comprendre les différences entre les technologies.

Secondary treatment, in turn, is a biological treatment based on biomass. It aims to remove organic matter (COD and BOD), as well as nitrogen and phosphorus. The following table (Table 2) helps to understand the differences between the technologies.

Tableau 2 : Synthèse des traitements secondaires et leur efficacité d'élimination des MPs (compilation RECORD, 2025) (Asadi et al. 2025; Shen et al. 2022) (Bayo et al., 2020) (F. Liu et al., 2020)

TRL	Traite ment	Technique	Avantages	Limitations	% élimination MPs	Réf
9	**Secondaire**	Boue activée	- Répandu - Efficace	- Génération de boues	68 % - 93 % (effluent réel)	(Asadi et al. 2025; Shen et al. 2022)
		Bioréacteur à membrane (MBR)	- Combinaison de traitement biologique et membranaire efficace pour l'élimination des N-MPs	- Colmatage des membranes	79 et 100 % (effluent réel)	(Bayo et al. 2020)
		Biofiltres	- Compact - Pas de risque de lessivage -Largement répandu en France	- Maintenance continue et chère - Difficulté de mise à grande échelle	79 % (effluent secondaire de STEP dopé)	(F. Liu et al., 2020)

Table 2: Summary of secondary treatments and their MP removal efficiency (compilation RECORD, 2025) (Asadi et al. 2025; Shen et al. 2022) (Bayo et al., 2020) (F. Liu et al., 2020)

TRL	Treatment	Technique	Advantages	Limitations	% MP removal	Ref.
9	**Secondary**	Activated sludge	- Widespread - Effective	- Sludge generation	68% - 93% (real effluent)	(Asadi et al. 2025; Shen et al. 2022)
		Membrane bioreactor (MBR)	- Combination of biological and membrane treatment effective for N-MP removal	- Membrane fouling	79% and 100% (real effluent)	(Bayo et al., 2020)
		Biofilters	- Compact - No risk of washout - Widely used in France	- Continuous and costly maintenance - Difficult to scale up	79% (spiked WWTP secondary effluent)	(F. Liu et al., 2020)

Finalement, le traitement tertiaire vise à affiner la qualité des eaux en éliminant les polluants résiduels. Le Tableau 3 permet ainsi de mieux comprendre les différentes catégories de procédés ainsi que leur efficacité vis-à-vis de l'élimination des microplastiques.

Finally, tertiary treatment aims to further improve water quality by removing residual pollutants. Table 3 helps to better understand the different categories of processes and their effectiveness in removing microplastics

Tableau 3 : Synthèse des traitements tertiaires et leur efficacité d'élimination des MPs (compilation RECORD, 2025) (Bayo et al. 2023; Sembiring et al. 2021) (Simon et al. 2019) (Akarsu et al. 2021; Pizzichetti et al. 2021)(Enfrin et al. 2020; Luogo et al. 2022) (Kara et al. 2023; Lin et al. 2025; Sawma et al. 2024)(Cai et al. 2022) (Easton et al. 2023) (Topkaya et al. 2025) (Bitter et al. 2022)

TRL	Traitement	Technique	Avantages	Limitations	% élimination MPs	Réf
9	Tertiaire	Filtration sur sable	- Répandu - Peu de maintenance - Peu coûteux	- Elimination dépend de la taille des pores (peu efficace sur les petites tailles) - Capacité à éliminer les NPs pas encore prouvée	76%-99% (effluents secondaires et eaux synthétiques dopés)	(Bayo et al. 2023; Sembiring et al. 2021)
		Filtre à disque	- Peu de maintenance - Peu énergivore - Simple d'utilisation	- Elimine difficilement les fragments	90 % (effluent secondaire)	(Simon et al. 2019)
		MF	- Facile d'utilisation - Peu énergivore	- Moins efficace sur les fragments - Manque d'études sur les petites tailles de MPs et de NPs	94% (eau potable) - 100 % (eau synthétique)	(Akarsu et al. 2021; Pizzichetti et al. 2021)
		UF	- Facile d'utilisation - Peu énergivore - Meilleur abattements que la MF	- Peu efficace sur les petits MPs avec une taille inférieure à celle des pores - Colmatage réversible	80 % (eau milli-Q dopée) - 99% (effluent de blanchisserie)	(Enfrin et al. 2020; Luogo et al. 2022)
		NF	- Efficace pour éliminer les N-MPs - Facile d'utilisation	- Colmatage - Pré-traitement recommandé - Formation d'un concentrat - Consommation énergétique élevée	> 90% (eau post traitement)	(Kara et al. 2023; Lin et al. 2025; Sawma et al. 2024)
		OI	- Efficace pour éliminer les N-MPs - Facile d'utilisation	- Colmatage - Formation d'un concentrat - Nettoyage régulier - Coût élevé - Pré-traitement recommandé -Consommation énergétique élevée	>70% (effluent STEP)	(Cai et al. 2022)
		UV/H2O2	- Dégradation des polluants organiques - Augmentation de l'hydrophilie des MPs -Technique non sélective	-Possibilité de fragmentation des MPs -Temps long et besoin important de H_2O_2	53% (eau pure dopée)	(Easton et al. 2023)
		Ozonation	- Bonne efficacité sur des effluents réels	- Risque de fragmentation des MPs en NPs - Risque de formation de sous-produits toxiques	>70 % (effluents réels)	(Topkaya et al. 2025)
		Charbon actif	- Peu énergivore - Capacité d'adsorption élevée	- Régénération à optimiser	98% (effluent de STEP)	(Bitter et al. 2022)

Table 3: Summary of tertiary treatments and their MP removal efficiency (compilation RECORD, 2025) (Bayo et al. 2023; Sembiring et al. 2021) (Simon et al. 2019) (Akarsu et al. 2021; Pizzichetti et al. 2021)(Enfrin et al. 2020; Luogo et al. 2022) (Kara et al. 2023; Lin et al. 2025; Sawma et al. 2024)(Cai et al. 2022) (Easton et al. 2023) (Topkaya et al. 2025) (Bitter et al. 2022)

TRL	Treatment	Technique	Advantages	Limitations	% MP removal	Ref.
9	**Tertiary**	Sand filtration	- Widespread - Low maintenance - Low cost	- Removal depends on pore size (not very effective for small sizes) - Ability to remove NPs not yet proven	76%–99% (spiked secondary effluents and synthetic waters)	(Bayo et al. 2023; Sembiring et al. 2021)
		Disc filter	- Low maintenance - Low energy consumption - Easy to operate	- Difficult to remove fragments	90% (secondary effluent)	(Simon et al. 2019)
		MF	- Easy to operate - Low energy consumption	- Less effective on fragments - Lack of studies on small MP and NP sizes	94% (drinking water) - 100% (synthetic water)	(Akarsu et al. 2021; Pizzichetti et al. 2021)
		UF	- Easy to operate - Low energy consumption - Higher removal than MF	- Not effective on small MPs smaller than the pore size - Reversible fouling	80% (spiked Milli-Q water) - 99% (laundry effluent)	(Enfrin et al. 2020; Luogo et al. 2022)
		NF	- Effective at removing N-MPs - Easy to operate	- Fouling - Pre-treatment recommended - Concentrate formation - High energy consumption	> 90% (post-treatment water)	(Kara et al. 2023; Lin et al. 2025; Sawma et al. 2024)
		RO	- Effective at removing N-MPs - Easy to operate	- Fouling - Concentrate formation - Regular cleaning - High cost - Pre-treatment recommended - High energy consumption	>70% (WWTP effluent)	(Cai et al. 2022)
		UV/H2O2	- Degradation of organic pollutants - Increased MP hydrophilicity - Non-selective technique	- Possible fragmentation of MPs - Long time and high H_2O_2 demand	53% (spiked pure water)	(Easton et al. 2023)
		Ozonation	- Good efficiency on real effluents	- Risk of MPs fragmenting into NPs - Risk of forming toxic by-products	>70% (real effluents)	(Topkaya et al. 2025)
		Activated carbon	- Low energy consumption - High adsorption capacity	- Regeneration to be optimized	98% (WWTP effluent)	(Bitter et al. 2022)

Le tableau suivant (Tableau 4) présente différentes techniques de traitement des microplastiques, correspondant à des niveaux de maturité technologique compris entre TRL 4 et TRL 7. Ces méthodes, encore en développement, ont été décrites dans des revues scientifiques et testées à l'échelle du laboratoire. Toutefois, peu d'entre elles ont été évaluées sur des matrices complexes, et leur passage à l'échelle réelle constitue encore l'une de leurs principales limites.

The following table (Table 4) presents various microplastic treatment techniques corresponding to technology readiness levels ranging from TRL 4 to TRL 7. These methods, still under development, have been described in scientific reviews and tested at laboratory scale. However, few have been evaluated on complex matrices, and scaling up to full scale remains one of their main limitations.

Tableau 5 : Synthèse des technologies en développement visant à éliminer les MPs (compilation RECORD, 2025) (Thacharodi et al. 2024) (Tang et al. 2021) (Ahmad et al. 2023 ; Ganie et al. 2025) (Lee et al. 2020) (Zhao et al. 2022)

TRL	Traitement	Technique	Avantages	Limitations	% élimination MPs	Réf
<7	En développement	Biodégrada-tion	- Dégradation des MPs	- Temps de traitement long - Peu d'études sur les MPs - Efficacité inconnue en milieu complexe - Études uniquement menées à l'échelle laboratoire	<7,4 % en 40 jours (eaux propres)	(Thacharodi et al. 2024)
		Nanotube de carbone	- Intéressant sur les eaux fortement chargées - Capacité d'adsorption élevée	- Synthèse des nanotubes - Coût élevé - Manque d'études - Montée en échelle à étudier	100% (eau ultra pure dopée)	(Tang et al. 2021)
		Biochar	- Fabriqué à partir de déchets - Taux d'adsorption élevé - Peut être regénéré plusieurs fois	- Production de gaz toxiques - Problème de reproductibilité	80 % - 99% (eaux propres ou eaux usées synthétiques)	(Ahmad et al. 2023; Ganie et al. 2025)
		UV/TiO_2	- Nombreuses études à l'échelle laboratoire - Efficacité sur plusieurs polymères - Possible d'opérer à sec	- Risque de formation de sous-produits toxiques	> 40 % (eaux propres dopées)	(Lee et al. 2020)
		Cendres volantes	- Élimine les NPs -Faible diminution des capacités après utilisation	- Baisse d'efficacité avec ajout d'autres polluants - Nécessité de modification : augmentation des prix	98 % (effluent secondaire de STEP)	(Zhao et al. 2022)

Table 5: Summary of technologies under development aimed at removing MPs (compilation RECORD, 2025) (Thacharodi et al. 2024) (Tang et al. 2021) (Ahmad et al. 2023; Ganie et al. 2025) (Lee et al. 2020) (Zhao et al. 2022)

TRL	Treatment	Technique	Advantages	Limitations	% MP removal	Ref.
<7	**Under development**	Biodegrada-tion	- MP degradation	- Long treatment time - Few studies on MPs - Unknown efficiency in complex water - Studies only conducted at laboratory scale	<7.4% in 40 days (clean waters)	(Thacharodi et al. 2024)
		Carbon nanotube	- Relevant for highly loaded waters - High adsorption capacity	- Nanotube synthesis - High cost - Lack of studies - Scale-up to be studied	100% (spiked ultrapure water)	(Tang et al. 2021)
		Biochar	- Made from waste - High adsorption rate - Can be regenerated several times	- Toxic gas production - Reproducibility issue	80% - 99% (clean waters or synthetic wastewater)	(Ahmad et al. 2023; Ganie et al. 2025)
		UV/TiO_2	- Numerous laboratory-scale studies - Effective on several polymers - Possible to operate dry	- Risk of forming toxic by-products	> 40% (spiked clean waters)	(Lee et al. 2020)
		Fly ash	- Removes NPs - Low decrease in capacity after use	- Decrease in efficiency when other pollutants are added - Modification required: increased costs	98% (WWTP secondary effluent)	(Zhao et al. 2022)

Ces tableaux permettent de comparer ces différents traitements, comme indiqué précédemment, le pourcentage d'abattement présenté dépend du seuil de coupure utilisé lors du prélèvement, de l'analyse elle-même, mais aussi du type d'effluent sur lequel les techniques sont appliquées. **L'étude a mis en avant le fait que la combinaison de plusieurs procédés permet d'abattre plus efficacement les microplastiques dans les effluents les plus complexes.**

These tables make it possible to compare the different treatments. As indicated above, the reported removal percentage depends on the cut-off threshold used during sampling, on the analysis itself, and on the type of effluent to which the techniques are applied. ***The study showed that combining several processes makes it possible to remove microplastics more effectively in the most complex effluents.***

Elimination des N-MPs présents dans les boues

Les techniques présentées précédemment permettent de séparer et/ou de dégrader les N-MPs présents dans une solution aqueuse. Cependant, lors des traitements préliminaires, primaires et secondaires, par exemple, les N-MPs sont transférés dans des boues. En effet, dans les stations d'épuration, plus de 80 % des microplastiques présents dans les eaux usées finissent dans les boues. En France, environ 60 % des boues issues des STEU sont valorisées en agriculture (20 à 25 % sont mises en décharge et 10 à 15 % sont incinérées). Il est donc nécessaire d'identifier un moyen d'éliminer ces N-MPs avant d'épandre les boues.

La déshydratation, la digestion anaérobie, le compostage aérobie et les traitements thermiques sont des procédés déjà appliqués aux boues de stations d'épuration. Ils permettent de réduire le volume des boues de 50 à 80 %, ce qui entraîne une diminution significative des coûts de transport et de gestion. Certains procédés, comme la digestion anaérobie, permettent également la production de biogaz, valorisable comme source d'énergie. Enfin, la stabilisation des boues contribue à limiter les risques sanitaires liés à la présence de pathogènes et à la libération de toxines (Hassan et al. 2023).
Bien que ces traitements ne visent pas à éliminer les N-MPs présents dans les boues, ils peuvent tout de même avoir un effet sur eux.

Les traitements thermiques permettent une destruction totale ou quasi totale des microplastiques. Leur principal inconvénient réside dans la consommation d'énergie nécessaire à leur mise en œuvre.

Le sujet des microplastiques dans les sols agricoles prend de plus en plus d'ampleur. C'est pourquoi certaines technologies se sont développées autour de cette problématique. C'est le cas de l'oxydation par voie humide, qui permet de traiter les boues en utilisant l'oxygène comme agent oxydant. L'une des limitations de ce procédé serait le coût de l'oxygène et de l'électricité nécessaires pour chauffer la boue. D'autres techniques étudiées dans ce projet ont déjà été décrites dans la partie précédente, comme la flottation ou la séparation magnétique à haut gradient.

Tout comme pour l'élimination des microplastiques dans des matrices liquides complexes, les études ont mis en évidence qu'une solution à privilégier serait la combinaison de plusieurs traitements, afin, d'une part, de minéraliser complètement les microplastiques grâce à des procédés permettant leur dégradation et, d'autre part, de limiter les coûts et les temps de traitement.

Plusieurs études montrent ainsi qu'un traitement de séparation, comme l'électrocoagulation, permettrait de concentrer les microplastiques dans un volume plus restreint afin de pouvoir ensuite les traiter plus efficacement, par exemple par un traitement biologique tel que la biodégradation.

Conclusion et discussion des résultats

Cette étude a permis d'obtenir une vision globale des procédés de traitement mis en place dans les stations d'épuration pour éliminer les microplastiques, ainsi que des technologies en cours de développement. Au regard de ces résultats, plusieurs interrogations ont été soulevées.

- Tout d'abord, un constat général s'impose concernant le manque de normes encadrant l'analyse des microplastiques,

Removal of N-MPs present in sludge

The techniques presented above can separate and/or degrade N-MPs present in an aqueous solution. However, during preliminary, primary and secondary treatments, for example, N-MPs are transferred into sludge. In wastewater treatment plants, more than 80% of the microplastics present in wastewater end up in sludge. In France, around 60% of sludge from wastewater treatment plants is recycled in agriculture (20–25% is landfilled and 10–15% is incinerated). It is therefore necessary to identify a way to remove these N-MPs before spreading sludge on land.

Dewatering, anaerobic digestion, aerobic composting and thermal treatments are processes already applied to wastewater treatment sludge. They can reduce sludge volume by 50% to 80%, leading to a significant decrease in transport and management costs. Some processes, such as anaerobic digestion, also enable the production of biogas that can be used as an energy source. Lastly, sludge stabilization helps limit health risks linked to the presence of pathogens and the release of toxins.
Although these treatments are not designed to remove N-MPs present in sludge, they may nevertheless have an effect on them.

Thermal treatments enable total or near-total destruction of microplastics. Their main drawback is the energy consumption required for implementation.

The issue of microplastics in agricultural soils is gaining increasing attention. As a result, some technologies have been developed to address this problem. This is the case for wet air oxidation, which treats sludge using oxygen as the oxidizing agent. This treatment has proven effective at full scale and has enabled mineralization of a large share of the microplastics present in sludge. One limitation of this process may be the cost of oxygen and electricity required to heat the sludge. Other techniques studied in this project have already been described in the previous section, such as flotation or high-gradient magnetic separation.

As with microplastic removal in complex liquid matrices, studies have shown that a preferred approach would be to combine several treatments in order, on the one hand, to fully mineralize microplastics through processes that enable their degradation, and on the other hand, to limit costs and treatment times.

Several studies also show that a separation treatment, such as electrocoagulation, could concentrate microplastics in a smaller volume so that they can then be treated more effectively, for example via a biological treatment such as biodegradation.

Conclusion and discussion of results

This study provides an overall view of the treatment processes implemented in wastewater treatment plants to remove microplastics, as well as technologies currently under development. In light of these results, several questions were raised.

- *First, a general observation must be made regarding the lack of standards governing microplastic, and even more so nanoplastic, analysis, as well as the high cost of these analyses. These limitations hinder innovation and the implementation of effective strategies to address microplastic pollution.*

et plus encore des nanoplastiques ; ainsi que le coût élevé de ces analyses. Ces limitations freinent l'innovation et la mise en place de stratégies efficaces pour répondre à la problématique de la pollution par les microplastiques.

- Néanmoins, il ressort de cette étude que les stations d'épuration mises en place en France et en Europe permettent déjà un abattement significatif des microplastiques. On peut donc s'interroger sur la nécessité d'imposer des traitements spécifiquement dédiés aux microplastiques, dont l'objectif principal serait leur élimination ciblée, au regard d'autres pollutions potentiellement tout aussi dangereuses et des investissements financiers que cela impliquerait.

- Enfin, la problématique des boues demeure réelle. Toutefois, les verrous analytiques restent encore trop importants pour permettre, à ce stade, de dégager des solutions concrètes et pleinement opérationnelles.

- *Nevertheless, this study shows that the wastewater treatment plants implemented in France and Europe already achieve a significant removal of microplastics. This raises the question of whether it is necessary to impose treatments specifically dedicated to microplastics, whose primary objective would be targeted removalgiven other forms of pollution that may be just as dangerous, and the financial investments this would entail.*

- *Finally, the issue of sludge remains significant. However, analytical bottlenecks are still too substantial at this stage to identify concrete, fully operational solutions.*