



Convention N° 2019 0654

Micro-particules organiques synthétiques : sources, transfert, quantification et impacts des micro- et nano-plastiques au sein des hydrosystèmes urbains

Etat de l'art des connaissances scientifiques

Synthèse

Novembre 2021

Corédacteurs :

Rémy Bayard et Gislain Lipeme Kouyi – INSA Lyon DEEP

Relecture : *Camille Arnault - AERMC*

Laboratoire DEEP



De nombreux matériaux synthétiques au cours et en fin d'usage échappent aux filières de gestion et de traitement de nos déchets. Ils se retrouvent, volontairement ou involontairement, dans les différents compartiments de la biosphère dont l'exutoire final, l'océan. Depuis une vingtaine d'années, la communauté scientifique et les autorités publiques se préoccupent de leur dissémination dans les écosystèmes et sur les conséquences environnementales et sanitaires : la présence de macro-, micro- et nano-particules synthétiques est avérée dans la plupart des écosystèmes du globe et, plus récemment, dans les écosystèmes continentaux, à savoir les eaux terrestres, l'air et les sols. Si les conséquences environnementales et sanitaires sont encore mal identifiées, les récents travaux de toxicologie et d'écotoxicologie tendent à mettre en évidence l'impact des micro- et nano-particules synthétiques sur une large gamme d'organismes vivants.

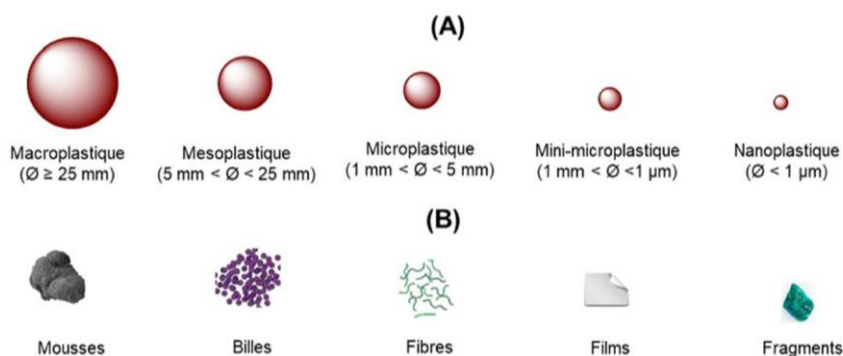
1. Définition et caractérisation des MPS

a. Taille et forme

Les Micro-particules synthétiques (MPS) sont définies comme des particules constituées de polymères synthétiques, additivées ou pas, non hydrosolubles, non biodégradables, de dimensions comprises entre 1 µm et 5 mm. Les nano-particules synthétiques (NPS) sont, *a fortiori*, de dimensions inférieures à 100 nm.

Elles se présentent principalement sous trois formes différentes :

- les fibres,
- les fragments
- et les billes.



Classification des débris de micro-plastiques selon leurs tailles (A) et leurs formes (B), d'après Crawford et Quin, (2017).

b. Origine

Les rejets de MPS dans l'environnement sont associés à l'usage de produits et matériaux synthétiques.

Les MPS « **primaires** » correspondent principalement aux microplastiques intentionnellement présents et utilisés comme agents épaississants ou abrasifs dans les produits cosmétiques, les détergents, les peintures, les engrais, les produits sanitaires, etc.

Les MPS « **secondaires** » sont quant à eux générés dans l'environnement au cours de l'usage ou de la fin de vie non contrôlée des matériaux à base de polymères synthétiques. Les mécanismes et matériaux associés sont notamment l'abrasion des pneumatiques au contact de la chaussée, abrasion des vêtements et genèse de fibres au cours de leur usage et de leur lavage, fragmentation des macro-déchets plastiques tels que les emballages souples ou rigides, fragmentation des

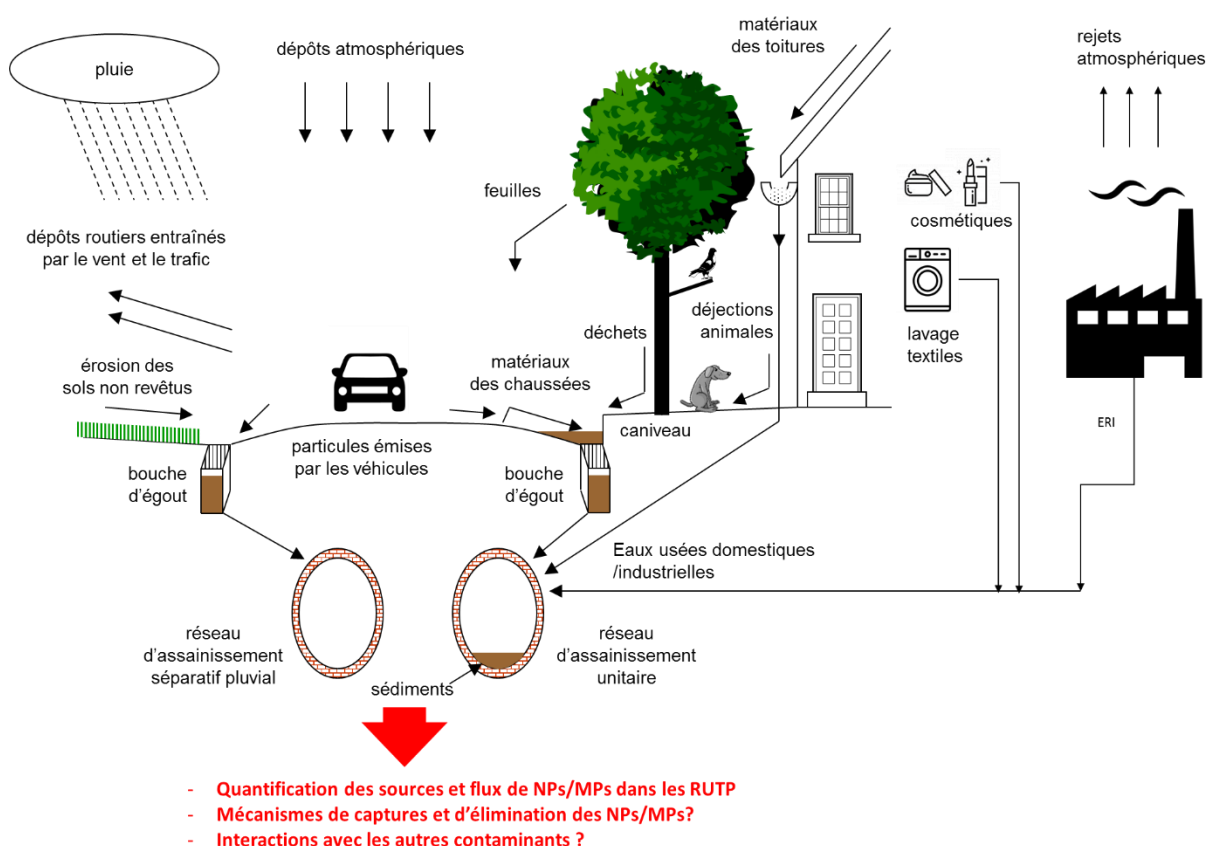
matériaux synthétiques utilisés dans les secteurs du transport, du BTP, de l'agriculture, de la plasturgie, etc.

2. Transfert des MPS en milieu urbain

a. Sources urbaines de MPS

A l'issue de l'analyse de l'état de l'art des connaissances scientifiques sur les microparticules de polymères synthétiques, il ressort que les zones urbaines sont des lieux de production et des voies de transfert importants des MPS vers les rivières avec, pour vecteur de transfert, les eaux de ruissellement pluvial, les rejets des déversoirs d'orage (DO), et les rejets domestiques. Les rejets des DO apparaissent comme étant une des sources majeures des MPS dans les rivières.

La figure ci-après schématise les différentes sources urbaines de production de NP/MPS. Le transfert des MPS du milieu terrestre vers le milieu naturel s'effectue en grande partie au travers des différents ouvrages urbains du cycle de l'eau.

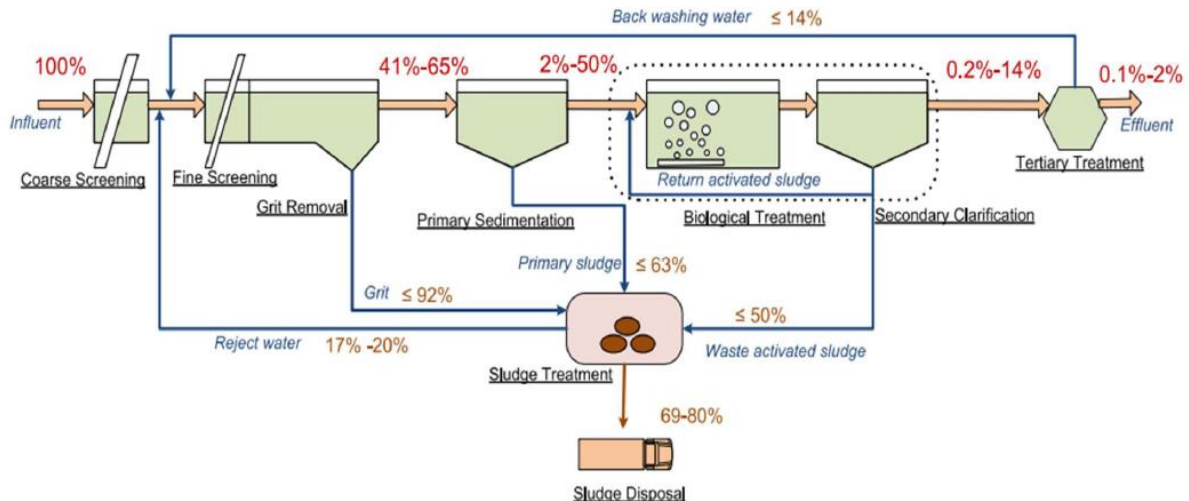


Vue d'ensemble des activités urbaines émettrices de NPS/MPS et des dispositifs de gestion des rejets urbains par temps de pluie véhiculant ces NPS/MPS.

Les sources urbaines de MPS sont certes identifiables mais les flux sont difficiles à quantifier, pour de multiples raisons : ces sources sont variées, allant des apports diffus provenant du ruissellement aux sources ponctuelles au sein des réseaux d'assainissement unitaires associés, aux dépôts atmosphériques, et à l'abandon de macro-déchets. Leurs origines multiples, la diversité des polymères des MPS, et les mécanismes de genèse et de comportement expliquent les difficultés à quantifier cette pollution particulière.

b. Efficacité d'élimination dans les STEU

Les stations de traitement des eaux résiduaires urbaines, bien que non conçues pour cela, éliminent jusqu'à 98% des MPS des eaux usées entrantes. Les étapes de prétraitement et de traitement primaire réalisent l'abattement de MPS le plus important, il est indiqué dans la littérature que 50 à 98% du flux de particules peut être éliminé de l'eau après ces étapes. La STEU capture efficacement la plupart des MPS de taille élevée.



Estimation de l'efficacité d'élimination des MPS dans les stations d'épuration par étape du traitement (Sun et al. 2019).

Cependant, une proportion très élevée de MPS de petite taille (< 500 µm) est retrouvée dans les eaux traitées, notamment les fibres. Ces petits MPS, qui sédimentent mal, traversent la STEU et représentent un risque élevé pour le biotope.

c. Boues d'épuration

Si seulement 0,1 à 2 % du flux entrant de MPS sont rejetés avec l'effluent, plus de 70% de ces MPS sont piégées dans les boues d'épuration (primaire et secondaire). Sans traitement, les boues sont ainsi le premier vecteur d'entrée des particules de MPS dans l'environnement par leur épandage dans les sols.

Quelques constats relatifs aux boues d'épuration issus de ce travail bibliographique :

- La capacité de traitement de la station influence peu la concentration moyenne en MPS dans les boues ;
- Le niveau de rejet imposé a également peu d'effet sur la concentration moyenne de particules de MPS constaté dans les boues ;
- La proportion d'eaux usées industrielles augmente significativement la concentration de MPS dans les boues ;
- Il a également été mis en évidence que les stations disposant de procédés favorisant des temps de séjours hydrauliques et des temps de séjour des boues élevés diminuent la concentration de MPS dans les boues.

En Europe, les boues d'épuration sont largement valorisées comme amendement organique sur les sols agricoles. De ce point de vue, l'épandage représente un risque important de dispersion et d'accumulation de MPS dans les sols agricoles. Des études ont d'ailleurs montré l'accumulation et la

persistance des MPS dans les sols même après arrêt de l'épandage. Malheureusement les études dans ce domaine manquent et des questions scientifiques restent associées.

Enfin, il semblerait que les MPS impactent négativement les performances de méthanisation lors de la digestion anaérobie des boues ; des recherches sont également nécessaires dans ce domaine pour compléter les études récentes sur ce sujet.

d. MPS dans les ouvrages à la source ou techniques alternatives (TA)

Une expérience décrite dans la littérature a montré que l'influence du volume d'infiltration d'eau ou de la concentration initiale en MPS est très faible sur la profondeur maximale de pénétration des MPS. En revanche, il existe une plus grande pénétration des MPS lors de faibles événements pluvieux et successifs (alternance séchage/mouillage), à concentration initiale égale et que la pénétration maximale des MPS dans les sols atteindrait 7,24 mètres après 100 ans de fonctionnement.

Les recherches complémentaires sont indispensables pour mieux comprendre les processus de transfert des MPS au sein des ouvrages de gestion des eaux pluviales à la source, communément appelés TA ainsi que leur réactivité vis-à-vis des autres contaminants présents dans le substrat de ces TA.

e. Perspectives de réduction de la quantité de MPS

Au vu des résultats et dans un objectif de réduction de la quantité de MPS atteignant les cours d'eau, l'intérêt des études semble devoir être porté plus particulièrement sur les **fibres**. Ces dernières traversent aujourd'hui très facilement les systèmes de traitements des eaux dont les STEU et sont ainsi directement relarguées vers les milieux aquatiques.

Deux solutions potentielles pourraient être proposées :

- De par l'origine des fibres, une première proposition serait la mise en place d'un **système de filtration intégré à la machine à laver** qui permettrait de réduire considérablement les rejets de MPS dans les réseaux d'eaux domestiques.
- Une deuxième proposition serait d'**augmenter les temps de séjour dans les bassins de décantation installés en STEU** ou aux exutoires des réseaux séparatifs eaux pluviales. Comme vu précédemment, les fibres ont une vitesse de sédimentation plus faible que celle des particules sphériques. Ces dernières nécessitent donc une durée plus importante pour pouvoir être récupérées dans les boues d'épuration ou les sédiments des eaux pluviales.

3. Défi métrologique lié à l'identification et la quantification des MPS

Indépendamment de la matrice étudiée, l'étude des MPS est fondée sur trois étapes clés :

- i) **Prélèvement** (échantillonnage de la matrice à analyser) ;
- ii) **Préparation** (extraction, séparation et nettoyage des échantillons) pour purifier et concentrer sur des filtres les particules susceptibles d'être des plastiques synthétiques ;
- iii) **Analyse** (identification et quantification des micro-particules synthétiques) pour déterminer un nombre de particules par Kg ou par L et estimer leur masse (mg/Kg ou mg/L).

a. Prélèvement

Les techniques d'**échantillonnage** *in situ* dépendent du type de matrice :

- pompage ou prélèvement manuel en bouteille pour les liquides,
- carottage par exemple pour les solides.

La représentativité de l'échantillonnage est le point majeur influençant la qualité des résultats. Afin de l'améliorer, plusieurs prélèvements doivent pouvoir être réalisés mais compte tenu de la difficulté d'analyse des MPS, les prélèvements sont souvent limités dans les études.

b. Préparation

Les matières organiques et minérales des échantillons interférant les analyses des particules, celles-ci doivent être au préalable éliminées par un traitement chimique oxydant et par séparation densimétrique pour ne citer que les traitements les plus couramment appliqués dans la littérature. La dernière étape consiste en une filtration sur des filtres de porosité différente permettant déjà d'isoler les particules selon leur taille. Ce protocole de préparation des échantillons est également une seconde source d'incertitude impactant la qualité des résultats puisqu'il a été démontré que la présence de contamination ainsi que l'influence des traitements chimiques sur certains plastiques peuvent biaiser leur identification.

c. Analyse

Les particules isolées sur les filtres sont, dans la majorité des études, simplement retirées du filtre puis classées selon leur couleur et leur forme puis pesées par un opérateur utilisant une pince, un microscope pour les plus petites particules et une balance. Cette approche visuelle doit être complétée par une identification par ATR-FTIR (technique la plus simple et la moins coûteuse à mettre en œuvre) de chaque particule pour confirmer sa nature chimique. Cette approche visuelle et manuelle est évidemment limitée par la taille des particules à prélever sur le filtre. Il en résulte une sous-estimation de la quantité des MPS notamment celles de faibles tailles.

C'est pourquoi de plus en plus d'études utilisent le couplage de la microscopie avec la FTIR ou le Raman (pour les particules $< 50 \mu\text{m}$) afin d'identifier les particules directement sur le filtre. Cette approche est très chronophage puisque l'opérateur oriente le faisceau IR ou Raman directement sur chaque particule visualisée via le microscope. Un compromis doit être fait entre la taille minimale des particules ciblées (μFTIR ou μRaman) et le temps d'analyse accordé à chaque filtre : plusieurs heures voire plusieurs jours par μRaman , si le choix est fait d'analyser seulement une partie du filtre et d'extrapoler ensuite les résultats à tout le filtre. Cette opération peut durer jusqu'à plusieurs jours voire semaines si l'approche par μRaman est utilisée pour analyser un filtre en entier. Les logiciels sont ensuite capables d'estimer les masses des particules de MP en fonction de leur forme et de leur nature chimique.

Lors de cette phase d'identification, la qualité des résultats dépend de plusieurs facteurs, parmi lesquels l'opérateur, la dispersion des particules sur le filtre puisqu'il ne s'agit que d'une analyse en surface, la résolution en taille de l'appareil d'analyse, etc. Pour s'affranchir au maximum de ces sources d'incertitude, des μRaman entièrement automatisés apparaissent sur le marché depuis peu mais *in fine* il appartient tout de même à un spécialiste de confirmer les identifications proposées par les logiciels d'où un long travail de traitement de données. Face à cette contrainte liée au temps, d'autres outils analytiques sont mentionnés dans la littérature comme les analyseurs thermiques

(pyrolyse couplée à la GC-MS par exemple) mais là encore les résultats sont entachés d'une grande incertitude : faible représentativité de la prise d'essai de 1 mg dans le cas d'un échantillon solide, difficulté à récupérer toutes les particules déposées sur un filtre pour un échantillon liquide, difficulté d'étalonner les polymères pour une analyse quantitative, etc. En outre, il est à noter que la technique μ Raman ne permet pas d'identifier les résidus des pneus car le noir de carbone ajouté à la formulation des pneumatiques absorbe le faisceau Raman. Cette absorption du faisceau n'est pas totale en μ FTIR ce qui permet à certains auteurs d'identifier quelques particules comme étant des résidus de pneus mais toujours avec prudence car l'analyse du spectre IR reste très difficile.

d. Conclusion relative à la métrologie

Les nombreuses étapes du prélèvement des échantillons à l'identification des MPS, ainsi que les différentes solutions analytiques utilisées par les chercheurs aboutissent à des résultats très variables d'une étude à l'autre.

Aucune méthode analytique ne permet de définir tous les critères physiques et chimiques en une seule analyse. De même, aucune technique analytique ne permet d'identifier tous les polymères existants. A ce jour, il n'existe pas de méthode standardisée pour l'analyse des particules de plastique dans l'environnement.

Tant qu'il n'y aura pas une harmonisation des pratiques analytiques (préparation des échantillons et analyse) et une recherche systématique des incertitudes de mesure, l'analyse des particules de plastiques restera une analyse seulement qualitative à considérer avec prudence.

La métrologie des MPS est considérée comme un enjeu majeur dans la littérature scientifique. L'harmonisation des procédures nécessitera de réaliser une analyse exhaustive des retours d'expérience et des études comparatives inter-laboratoires initiées ces dernières années sur les techniques d'échantillonnage des matrices liquides ou solides, les procédures de préparation des échantillons avant analyse et techniques analytiques mises en œuvre pour identifier et quantifier les MPS.

4. Modélisation du transport des MPS

La modélisation du transport des MPS au sein des hydrosystèmes urbains est une tâche ardue. Comme d'autres particules, les MPS subissent des phénomènes d'agrégation ou bien encore d'encrassements biologiques. La difficulté à cerner leur comportement hydrodynamique résulte de la combinaison de plusieurs facteurs tels que leurs faibles densités, de fortes persistances et de différentes tailles et formes qui rendent leur comportement et leur modélisation complexes.

⇒ Les modélisations restent donc encore peu nombreuses et peu fiables.

Qui plus est, de par la forme des fibres, ces dernières présentent des vitesses de sédimentation plus faibles que les MPS sphériques et sont donc plus susceptibles de se retrouver en sortie de réseaux unitaires via les DO, avant un traitement en STEU ou en sortie des bassins de retenue-décantation des eaux pluviales. L'encrassement par le développement d'un biofilm bactérien sur les MPS a été largement démontré. Ce phénomène, dépendant de la charge organique et du temps de séjour des MPS, influence largement leur comportement hydrodynamique dans les matrices liquides.

Perspectives de recherche sur les MPS en milieu urbain

Globalement, il y a très peu d'études sur le comportement et les flux de MPS tout au long du continuum atmosphère/hydrosystèmes urbains, avec un focus sur les processus de transfert, la réactivité et le devenir des MPS le long de ce continuum. Les nouvelles connaissances produites permettront de proposer des actions préventives et des solutions techniques pour mieux gérer les MPS et préserver les ressources en eau en milieu urbain.

Suite à notre état des lieux bibliographique sur les MPS dans les hydrosystèmes urbains, différentes perspectives de recherches ont été identifiées :

- Devenir, persistance et mobilisation des MPS dans les sols agricoles ;
- Impact des MPS sur les performances de méthanisation et la qualité des digestats ;
- Impact des MPS sur la qualité des composts ;
- Processus de transfert et de réactivité le long des hydrosystèmes urbains, incluant les ouvrages de gestion des eaux pluviales (bassin de rétention, bassin d'infiltration, TA...) ;
- Modélisation du comportement hydrodynamique des MPS en milieu liquide et interaction avec la biomasse.

MOTS CLES

Caractérisation des MPs, réactivité des MPs, échantillonnage, quantification des MPs, mécanismes de transport des MPs, ouvrages de gestion des eaux urbaines, interactions MPs - boues, interactions MPs-sédiments, rejets urbains par temps de pluie, cycle urbain de l'eau

Références citées dans la synthèse

Crawford, B., & Quinn, B. (2017). Microplastic Pollutants. Elsevier.

Sun, Jing, Xiaohu Dai, Qilin Wang, Mark C. M. van Loosdrecht, et Bing-Jie Ni. (2019). Microplastics in Wastewater Treatment Plants: Detection, Occurrence and Removal. Water Research 152, 21-37.