

LA POLLUTION PLASTIQUE EN ESTUAIRE DE SEINE : IMPRÉGNATION ENVIRONNEMENTALE DYNAMIQUE ET IMPACT SUR LE VIVANT





LA POLLUTION PLASTIQUE EN ESTUAIRE DE SEINE : IMPRÉGNATION ENVIRONNEMENTALE DYNAMIQUE ET IMPACT SUR LE VIVANT

AUTEURS

Fisson C.¹, Cachot J.², Gasperi J.³, Halm-Lemeille M.P.⁴, Tassin B.⁵, Tramoy R.⁵

CONTRIBUTEURS

Amara R.⁶, Colasse L.⁷, Coulaud R.⁸, Kazour M.⁶, Mouneyrac C.⁹, Souissi S.¹⁰, Vannier S.¹¹, Viault B.¹²

SEPTEMBRE 2021

- (1) GIP Seine-Aval
- (2) UMR CNRS 5805 EPOC – OASU, Université de Bordeaux
- (3) Laboratoire Eau et Environnement, Université Gustave Eiffel
- (4) Ifremer, LER Normandie
- (5) LEESU, Ecole nationale des ponts et chaussées – Université Paris Est Créteil
- (6) UMR CNRS 8187 LOG, Université littoral côte d'Opale
- (7) SOS Mal de Seine
- (8) UMR SEBIO, Université du Havre
- (9) MMS, Université Catholique de l'Ouest
- (10) UMR CNRS 8187 LOG, Université de Lille 1
- (11) Métropole Rouen Normandie
- (12) Département de la Seine-Maritime

Les déchets plastiques marins qui pénètrent dans l'océan sont de plus en plus nombreux, les effets de la pollution plastique sur les écosystèmes marins et côtiers s'aggravent et notre compréhension croissante des effets négatifs de la pollution plastique sur la santé humaine nous incite à agir de toute urgence.

*Programme des Nations Unies
pour l'Environnement [IRP, 2021]*

Sommaire

■ SOMMAIRE	5
■ INTRODUCTION	6
Encart n°1 La pollution plastique : un large éventail	
I LA POLLUTION PLASTIQUE DES DIFFÉRENTS COMPARTIMENTS DE L'ESTUAIRE DE SEINE	10
A Sur les berges	10
B Dans la colonne d'eau	12
C Dans et sur les fonds sédimentaires	16
D Dans les organismes aquatiques	19
Encart n°2 Zoom sur le port du havre	
II LA DYNAMIQUE DES PLASTIQUES DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE	24
A Une distribution en microplastiques variable durant un cycle de marée	24
B Un transit de l'amont vers l'aval en lien avec le débit	26
C Des séquences de dépôt / remise en suspension sur les berges	28
D Un temps de résidence long et une accumulation des déchets dans l'estuaire	30
E Des ramassages efficaces	30
Encart n°3 Les ramassages manuels de macrodéchets sur les berges de l'estuaire de la seine	
Encart n°4 Mise en place de filets pour capter les déchets plastiques en sortie du réseau d'assainissement	
F Un flux résiduel à la mer	35
III LES IMPACTS DE LA POLLUTION PLASTIQUE SUR LES ORGANISMES AQUATIQUES	36
A Impacts physiques	36
B Capacité d'ingestion et d'égestion des microplastiques	37
C Impacts chimiques	40
Encart n°5 Réalisation d'un mélange de microplastiques représentatif de l'estuaire de la seine	
■ CONCLUSION	42
■ ABRÉVIATIONS	44
■ GLOSSAIRE	45
■ BIBLIOGRAPHIE	46
■ TABLES DES ILLUSTRATIONS	48
Liste des figures	48
Liste des tableaux	49

INTRODUCTION

Constituant de très nombreux objets de consommation courante, le plastique fait partie intégrante de la vie moderne. Ses qualités physiques, sa facilité de mise en forme et son faible coût de production en font un matériau indispensable pour de nombreux usages depuis plusieurs dizaines d'années. Exponentielle, sa production est passée de quelques tonnes dans les années 1950 à plusieurs centaines de millions de tonnes par an aujourd'hui et tout indique qu'elle va continuer à croître dans les années à venir. Cependant, son utilisation est souvent éphémère et plus de la moitié du plastique produit dans l'Histoire est devenue un déchet [Figure 1 ; Geyer *et al.*, 2017]. Une partie de ces derniers rejoint le milieu marin, notamment via les cours d'eau, avec des flux globaux estimés entre 0,8 et 2,7 millions de tonnes de microplastiques par an, dont 80 % apportés par plus de 1000 cours d'eau au niveau mondial [Meijer *et al.*, 2021].

Une fois en mer, les processus de circulations océaniques tendent à concentrer les débris plastiques dans des zones de convergence, encore appelées gyres océaniques, ainsi que dans les mers intérieures et les milieux côtiers abrités comme les baies ou les lagunes. Au fur et à mesure de leur parcours, de leur vieillissement et sous l'action des contraintes mécaniques, ces plastiques se fragmentent progressivement en particules de plus en plus petites. C'est donc un continuum de tailles de particules* plastiques qui est retrouvé dans l'environnement, allant de quelques nanomètres, voire moins, à plusieurs mètres. Au cours de leur vieillissement dans les rivières et dans l'océan, les plastiques peuvent s'oxyder et libérer les additifs chimiques qu'ils contiennent, mais aussi adsorber les polluants chimiques présents dans le milieu. L'ingestion des microplastiques par des organismes aquatiques les exposera ainsi à ces contaminants qui, selon leurs propriétés intrinsèques, pourront se

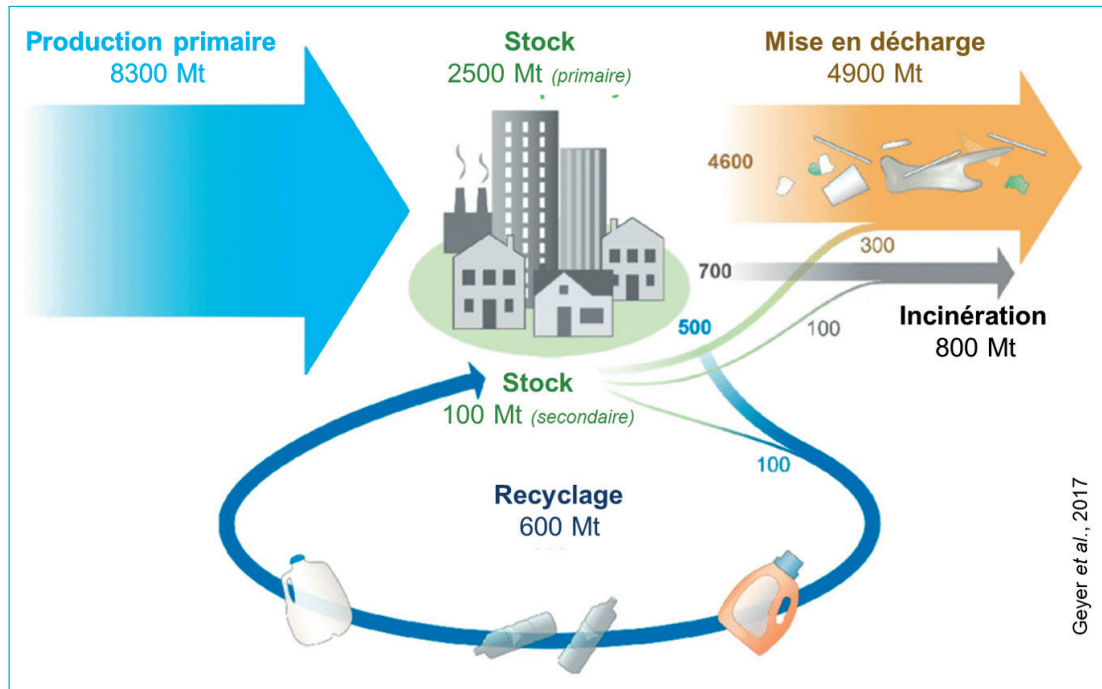


FIGURE 1 Production, usage et devenir des plastiques au niveau mondial, entre 1950 et 2015.

bioaccumuler, être transférés le long de la chaîne trophique et induire des effets toxiques [Figure 2]. Au final, la pollution plastique est diverse, multiforme (visuelle, chimique, éco-toxique...) et englobe une très grande diversité de débris, selon la nature et les propriétés des polymères considérés et de leur formulation, la taille, la morphologie et la couleur des particules plastiques, ainsi que les polluants chimiques associés [Encart n°1 – La pollution plastique : un large éventail]. Les conséquences écologiques de cette pollution sont à la fois immédiates et visibles (étouffement, strangulation ou ingestion par les oiseaux et mammifères marins), mais également plus insidieuses avec une toxicité chimique associée aux constituants des plastiques et aux polluants qui s'y adsorbent.

L'estuaire de la Seine est une zone d'étude particulièrement intéressante pour cette thématique de la pollution plastique, de par 1) son positionnement à l'exutoire du bassin

versant très anthropisé de la Seine, 2) l'existence de nombreuses zones de dépôts de macrodéchets sur ses berges, 3) son importance écologique dans le cycle de vie de nombreuses espèces aquatiques, 4) les apports en polluants qui transitent vers la baie et 5) la volonté de la société, et en particulier des acteurs de l'eau, de réduire la pollution plastique. Accompagnée par le GIP Seine-Aval et ses partenaires, la communauté scientifique s'est ainsi saisie de la problématique à travers diverses actions de suivis de cette pollution et deux projets de recherche menés sur l'estuaire de la Seine depuis 2017. Deux axes de recherches ont été spécifiquement abordés selon la taille des débris plastiques considérés, à savoir 1) l'identification des stocks, la quantification des flux et la compréhension de la dynamique pour les débris plastiques supérieurs à 5 mm (i.e. macroplastiques) [Projet Macroplast¹ 2017-2020, Tramoy *et al.*, 2019 ; SOS Mal de Seine²] ; 2) l'imprégnation du milieu et les

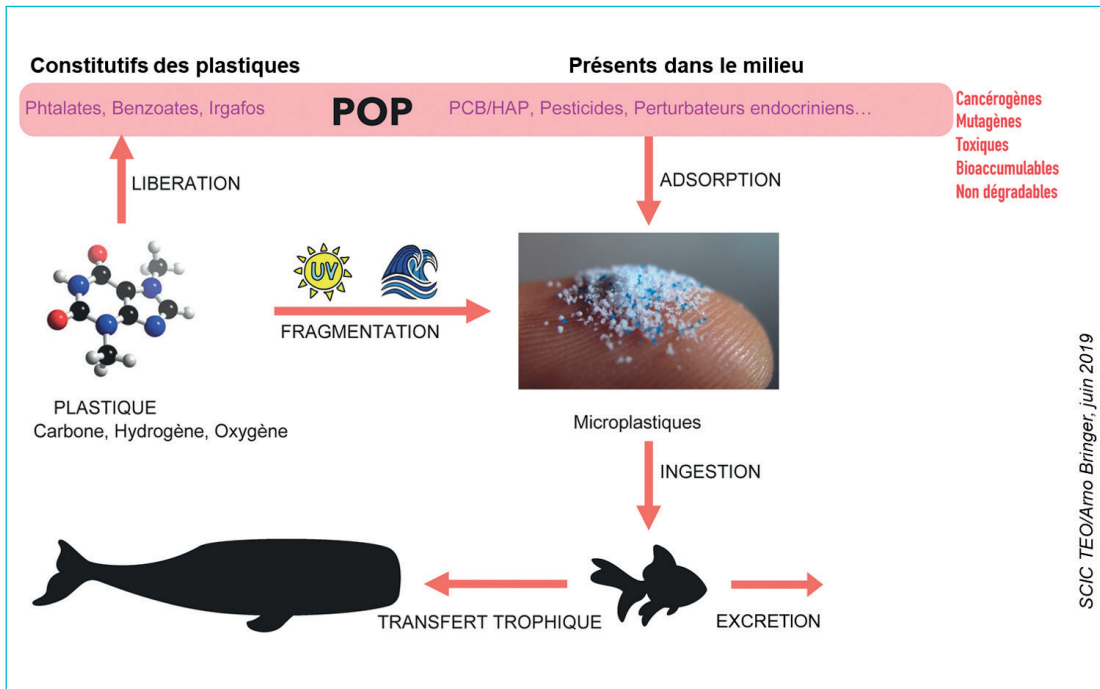


FIGURE 2 Risque environnemental associé à la pollution plastique.

impacts à différents niveaux du réseau trophique pour les débris plastiques inférieurs à 5 mm (i.e. microplastiques) [Projet Plastic-Seine³ 2017-2020, Gasperi & Cachot, 2021]. Les méthodologies d'investigation mises en œuvre sont spécifiques à chaque problématique et proposent des éléments d'interprétation plus ou moins consolidés selon le compartiment ou la question posée. Délivrant une vision générale relativement complète après seulement quelques années de travaux scientifiques, les résultats acquis ne couvrent cependant pas tout le champ des questionnements posés [Tableau 1]. Le présent fascicule propose une synthèse des travaux scientifiques menés ces dernières années sur la pollution micro et macroplastiques de l'estuaire de la Seine et

une mise en perspective vis-à-vis d'autres acquisitions de données. Il s'attache à répondre aux questionnements suivants :

- 1) Quelle est le niveau de pollution plastique, des larges débris jusqu'aux microplastiques, dans les différents compartiments environnementaux de l'estuaire de la Seine, à savoir les berges, la colonne d'eau, les fonds sédimentaires et les organismes aquatiques [Partie 1] ?
- 2) Quelles sont les dynamiques qui régissent le comportement des débris plastiques dans l'estuaire de la Seine [Partie 2] ?
- 3) Quels sont les impacts des débris plastiques sur la faune aquatique de l'estuaire de la Seine [Partie 3] ?

TABLEAU 1 Niveau de connaissance de la pollution plastique en estuaire de Seine.

Compartiment	Microplastiques < 5mm	Macroplastiques > 5 mm	Macroplastiques > 5 cm
Berges	/	moyen	bon
Colonne d'eau	bon	moyen	moyen
Fonds marins / sédiments	faible	moyen	moyen
Organismes aquatiques	moyen	faible	/
Organismes terrestres	/	/	/

1. MACROPLAST : Projet porté et coordonné par le LEESU (Université Paris Est Créteil), financé par le Ministère de la Transition Écologique et Solidaire et labellisé par la Zone Atelier Seine.

2. SOS Mal de Seine : Association loi 1901 qui informe sur la pollution des milieux aquatiques (plus spécifiquement de l'estuaire de la Seine) par les plastiques.

3. PLASTIC-Seine : Projet porté par le GIP Seine-Aval, coordonné par le LEESU (Université Paris Est Créteil) et EPOC (Université de Bordeaux), financé par le GIP Seine-Aval et l'AESN dans le cadre du CPIER Vallée de la Seine, labellisé par la Zone Atelier Seine.

ENCART N° 1

La pollution plastique : un large éventail



Les plastiques sont des macromolécules de synthèse obtenues par polymérisation ou polycondensation de molécules plus petites : les monomères. L'assemblage, la structure (linéaire, ramifiée, réticulée) et la longueur des chaînes carbonées forment une grande diversité de topologies qui déterminent les propriétés physiques et chimiques des plastiques. La nature des polymères offre également une grande diversité, avec des polymères naturels (cellulose, collagène, sucres, latex...) ou de synthèse (polyéthylène, polypropylène, polystyrène, chlorure de polyvinyle...). Ces polymères de synthèse sont essentiellement issus de carbone fossile (dérivés du pétrole et du gaz de schiste), mais peuvent aussi venir de la biomasse d'origine végétale (amidon de blé, de pomme de terre ou de maïs, huile de tournesol...) ou animale (protéines de lait, kératine). A ces polymères, des composés chimiques (additifs) sont ajoutés pour faciliter la fabrication et leur conférer des caractéristiques physiques et chimiques complémentaires (résistance aux UV, à la température, au feu, agents antistatiques, de durcissement, plastifiants, moussants, colorants, biocides...). Selon leur taille, les plastiques sont catégorisés en nanoplastiques (<1 μm), microplastiques (de 1 μm à 5 mm) et macroplastiques (>5 mm). A noter que les microplastiques peuvent être produits et commercialisés sous forme micrométrique (microplastiques primaires*) ou issus de la fragmentation de plastiques plus grands (microplastiques secondaires*). Ces derniers représentent une large majorité des microplastiques présents dans les milieux aquatiques.

Les débris plastiques retrouvés dans les milieux aquatiques sont ainsi de natures très diverses, les principales variables étant leur taille, leur morphologie, leur composition et leur couleur [Figure A].

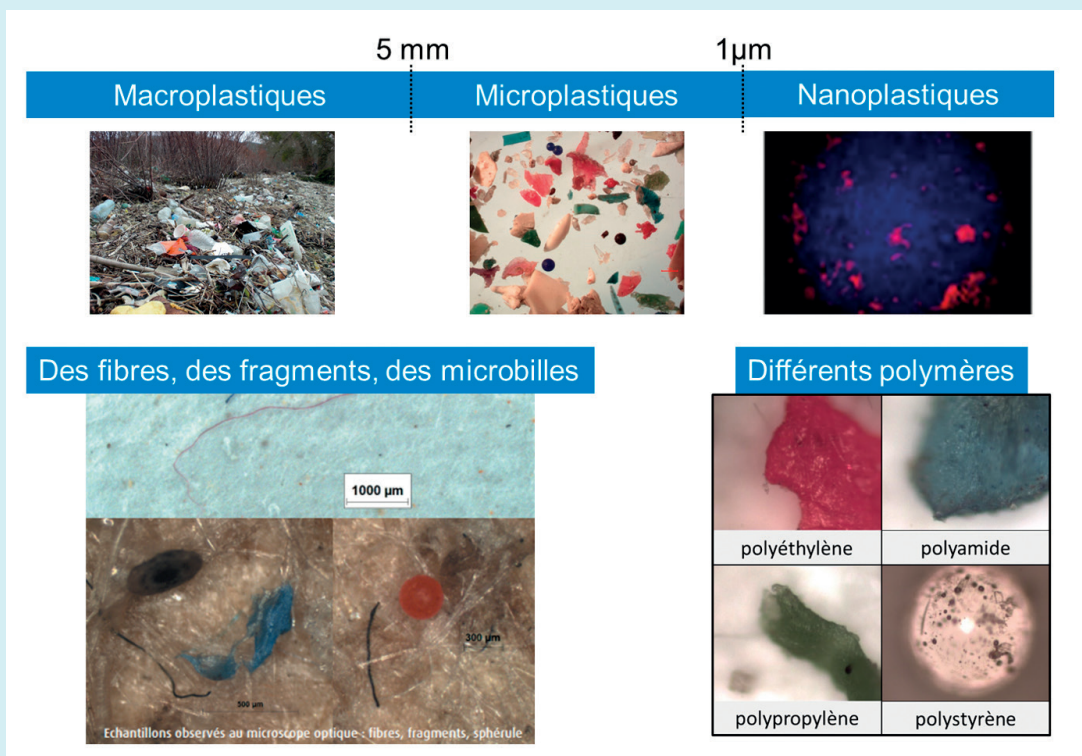


FIGURE A Diversité de la pollution plastique.

I LA POLLUTION PLASTIQUE DES DIFFÉRENTS COMPARTIMENTS DE L'ESTUAIRE DE SEINE



Après leur production et une période d'utilisation, les objets plastiques connaissent une phase de recyclage ou de mise au rebut. Durant ces différentes étapes, des fuites vers l'environnement sont observées. Elles sont liées aux usages, à des défauts de collecte ou à des traitements peu efficaces, des pertes ou des incivilités. Les plastiques se retrouvent alors dans les différents compartiments environnementaux, aquatiques ou terrestres. Situé à l'exutoire d'un bassin versant largement urbanisé et industrialisé et soumis à une dynamique hydrosédimentaire intense, l'estuaire de la Seine est particulièrement sensible à cette pollution plastique.

Ce premier chapitre propose un bilan de la présence des macroplastiques et des microplastiques dans les différents compartiments environnementaux de l'estuaire de la Seine, à savoir les berges, la colonne d'eau, les fonds sédimentaires et les organismes aquatiques. Selon le compartiment analysé et la gamme de taille ciblée, les méthodes mises en œuvre pour évaluer la présence de plastiques sont différentes. L'état des lieux proposé ici, premier du genre pour l'estuaire de la Seine, s'appuie sur un ensemble de résultats offrant une vision générale de la pollution plastique, sans pour autant prétendre couvrir de manière exhaustive et comparable tous les compartiments environnementaux et tailles de plastiques.

A. SUR LES BERGES

La pollution plastique est très présente et visible sur les berges de l'estuaire de la Seine, où des déchets plastiques transitant en Seine se déposent de manière récurrente, et ce depuis de nombreuses années [Lerond, 1997]. L'importante accumulation de macroplastiques sur les berges de l'estuaire de la Seine a notamment été mise en évidence par un inventaire exhaustif des plastiques visibles à l'œil nu mené sur un linéaire de 117 m de berge naturelle (2376 m²) à Berville-sur-Seine. Le site se situe sur une rive convexe de la Seine, moins propice au dépôt de déchets flottants et faisant l'objet de ramassages réguliers. Sur les deux années de suivi (2012 et 2013), ce sont entre 12 000 et 16 000 objets pour 100 m de berge qui ont été ramassés, soit 5 fois plus que sur les plages françaises évaluées par le même protocole (i.e. protocole OSPAR). Les morceaux de plastiques, les cotons tiges, les emballages/bâtons de confiserie et les

bouchons/capsules/couvercles, représentent entre 66 % et 75 % des plastiques ramassés [SOS Mal de Seine]. Le même type d'inventaire a été réalisé sur des quadrats de 1 m² en berge de Seine, en 2018 à Petitville (en amont du pont de Tancarville, dans le périmètre du Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande) et en 2020 à Tancarville (en aval du pont de Normandie, dans le périmètre de la Réserve Naturelle Nationale de l'Estuaire de la Seine). Ce sont respectivement plus de 20 000 et 100 000 déchets plastiques par mètre carré (microplastiques et macroplastiques) qui ont été dénombrés sur ces prélèvements, ce qui représente plus de 4 kg de plastiques. Les fragments de plastiques et les granulés plastiques industriels (microplastiques primaires*) sont les déchets les plus fréquemment dénombrés sur ces sites [Figure 3 ; SOS Mal de Seine].

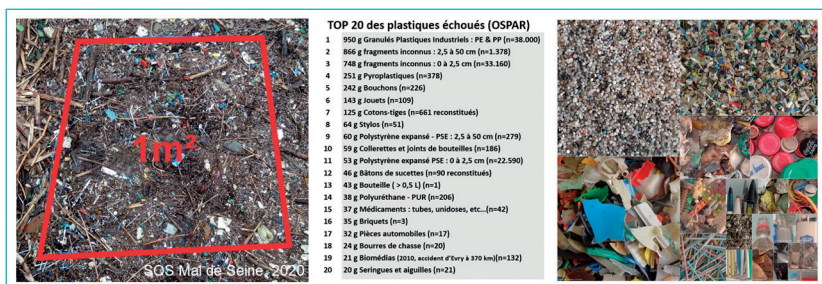


FIGURE 3 Déchets plastiques dénombrés et pesés sur un prélèvement d'un mètre carré de berge de Seine (Tancarville, 2020).



FIGURE 4 Zone d'accumulation de macrodéchets en bord de Seine.

Les déchets plastiques transitant par la Seine peuvent également venir alimenter, particulièrement en période de crue, des zones d'accumulation préférentielles et constituer d'importants stocks de déchets de toutes sorte, dont des macrodéchets plastiques [Figure 4]. Dans le secteur estuarien de la Seine, entre Poses et la mer, ce sont 58 zones d'accumulation de déchets qui ont été dénombrées [Figure 5 ; SOS Mal de Seine]. L'importance du stock de déchets contenu dans chacune de ces zones est dépendante de différents facteurs, à savoir 1) les caractéristiques des berges (morphologie, faciès sédimentaire, stabilité, présence de végétation...) ; 2) le contexte hydrométéorologique et les conditions de submersion des berges ; 3) la taille, la forme, la densité et la nature des déchets ; 4) les pratiques de ramassage et de

nettoyage qui peuvent influencer sur les capacités d'accumulation d'un site donné.

Les déchets accumulés dans ces zones peuvent retourner au fleuve. Ils peuvent également rejoindre les terres par envol des plastiques les plus légers. Ce phénomène a été mis en évidence par un inventaire mené en bordure d'un champ parallèle au fleuve, à proximité d'une zone d'accumulation de déchets en bordure de Seine. Sur une portion de 100 m de linéaire (100 m x 1 m, soit 100 m²), plus de 1 000 déchets plastiques ont été dénombrés, pour un poids total de 1,65 kg. Ce sont essentiellement des fragments de films ou d'objets divers qui ont été retrouvés, témoignant de la fragmentation des plastiques dans l'environnement [SOS Mal de Seine, 2021].

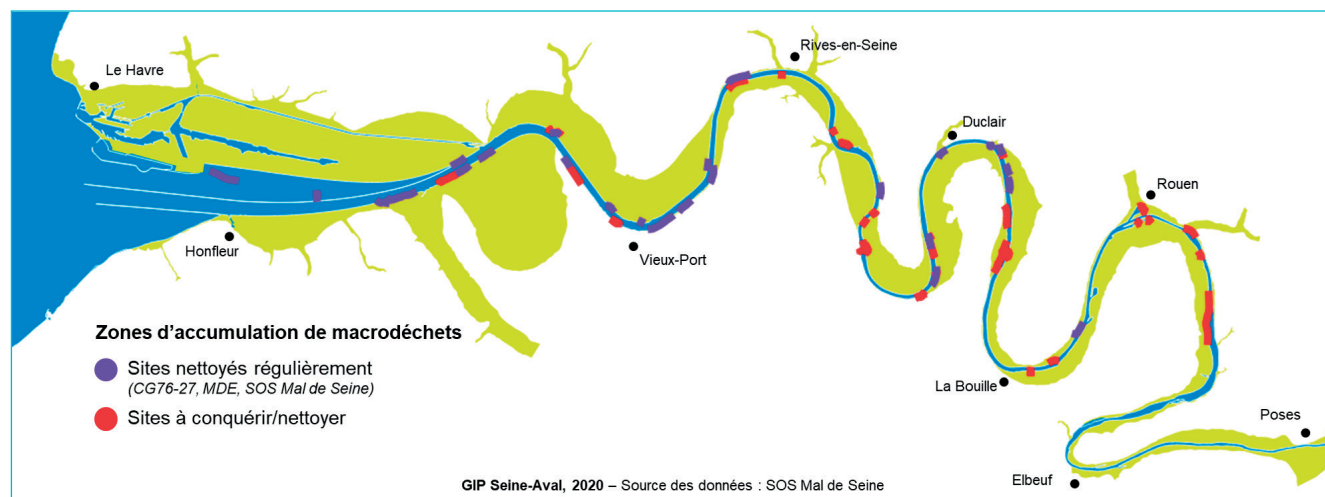


FIGURE 5 Zones d'accumulation de macrodéchets identifiées sur les berges de l'estuaire de la Seine.

B. DANS LA COLONNE D'EAU



FIGURE 6 Prélèvement de microplastiques par filet.

La pollution plastique transite par la colonne d'eau, avec une présence de débris plastiques flottants de taille et de nature très diverses. Le niveau d'imprégnation de ce compartiment peut être évalué par différentes méthodes, selon la catégorie de plastique et sa taille. L'observation sera spécifique aux plastiques de grande taille présents de manière ponctuelle en surface du cours d'eau ; alors que les prélèvements avec des filets [Figure 6] permettront d'échantillonner des tailles plus petites de plastiques (selon la maille utilisée) et pourront rendre compte de la contamination le long de la colonne d'eau (depuis la profondeur à laquelle le filet est descendu) [Figure 25].

Pour appréhender la pollution plastique dans la Seine et comparer rapidement différents fleuves entre eux, une première approche a consisté en un **comptage visuel des déchets plastiques transitant dans le cours d'eau**. En se plaçant sur des ponts enjambant la Seine, différents observateurs ont ainsi dénombré le nombre de déchets plastiques flottants ou sub-flottants de taille supérieure à

2-5 cm pendant plusieurs sessions de 20 minutes. A Rouen, les observations ont été réalisées en septembre 2018 et mars 2019 pour couvrir différentes conditions de débit et de marée (respectivement en conditions 1) de morte-eau et débit ~200 m³/s et 2) de vive-eau et débit ~800 m³/s) [Van Emmerik et al., 2019]. Après normalisation, ce comptage a permis d'accéder à une première estimation de la pollution plastique transitant en Seine, que ce soit à l'amont ou à l'aval de Paris et en estuaire. Les résultats confirment la forte variabilité de la présence des déchets flottants, avec un nombre de macroplastiques variant de 100 à 1 000 par heure sur la largeur totale du cours d'eau, soit une contamination modérée de la Seine par rapport à d'autres fleuves, notamment ceux situés en Asie du Sud Est [Van Calcar et al., 2019]. Une augmentation de la présence des plastiques flottants est néanmoins observée de l'amont vers l'aval de la Seine, cette tendance étant très largement renforcée dans l'estuaire lors des grandes marées et quand le débit de la Seine augmente [Figure 7 ; Van Emmerik et al., 2019]. Bien

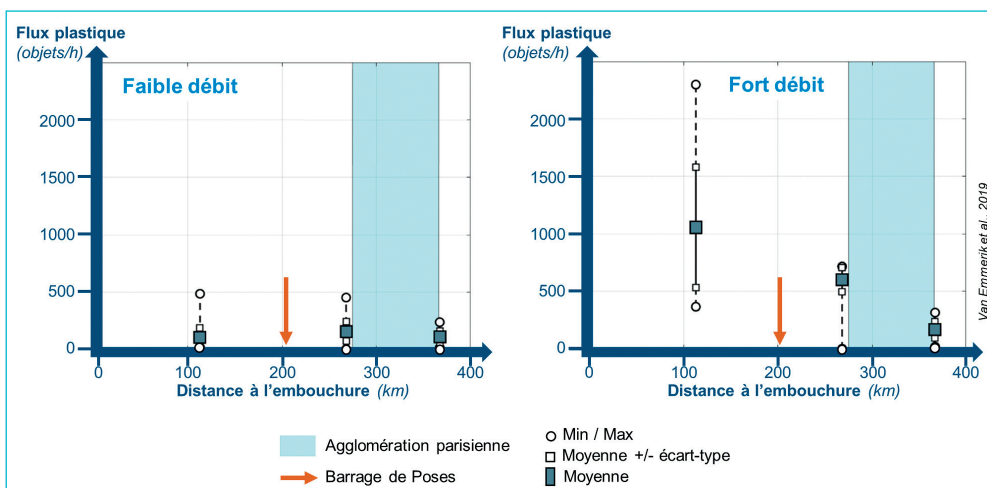


FIGURE 7 Comptage visuel des déchets plastiques transitant en Seine en période de faible et fort débit.

que limitée à la tranche très superficielle de la colonne d'eau et dépendante de facteurs externes comme la luminosité, la distance d'observation et l'acuité visuelle de l'observateur, cette méthode reste simple à mettre en œuvre et permet une première appréhension de la problématique, notamment dans le cadre de campagnes de science participative. Afin de préciser la **présence de macroplastiques dans la colonne d'eau**, des prélèvements *in situ* ont été menés à l'aide d'un filet pélagique de maille 1 cm, tracté par une embarcation et immergé à 1,5 m de profondeur. Les prélèvements ont été réalisés en avril 2019 à l'embouchure de la Seine (au niveau du pont de Pont de Normandie), pour un débit moyen de la Seine (~300 m³/s), selon différentes conditions de marée (flot et jusant ; coefficients de marée de 91, 55 et 32) et hauteurs de houle. La concentration moyenne en macroplastiques dans la colonne d'eau est de 0,16 mg/m³, avec un maximum de 0,76 mg/m³ et seuls 2 traits de filet sur 12 n'ont pas collecté de plastique. Les résultats suggèrent une remobilisation des plastiques en conditions agitées (fort coefficient de marée, forte houle) pendant lesquelles les concentrations les plus fortes sont observées. Sur l'ensemble des prélèvements, la totalité des déchets collectés est constituée de plastiques légers, majoritairement des emballages, des sacs/contenants et des cordages/fils [Figure 8]. Les macroplastiques denses et/ou peu flottants (bouteilles, bidons...) retrouvés en nombre sur les berges de la Seine [Partie I.A] ne sont pas présents dans la colonne d'eau et seraient transportés en surface (pour les déchets flottants) ou au fond (pour les déchets dont la densité est plus forte que celle de l'eau [Tramoy *et al.*, 2019]).

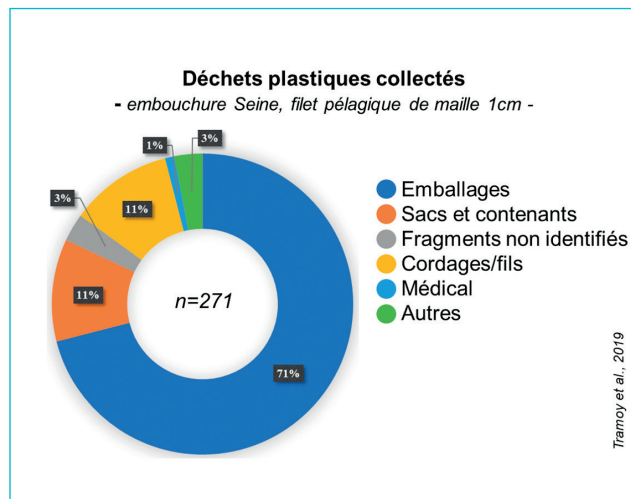


FIGURE 8 Répartition moyenne des plastiques collectés à l'embouchure de la Seine par un filet pélagique de maille 1 cm.

Au-delà de la présence de macroplastiques, la **distribution des microplastiques a également été évaluée dans la colonne d'eau** de l'estuaire de la Seine. Trois points ont ainsi été échantillonnés (La Bouille, Vieux-Port, La Roque) avec un filet de maille 300 µm, en surface (les 15 premiers centimètres) et en sub-surface (les 50 premiers centimètres) lors de 4 campagnes [Figure 9]. Un filet de maille 80 µm a été spécifiquement déployé en subsurface lors de deux dernières campagnes pour estimer la contamination en fibres* totales. L'observation visuelle au moyen d'une loupe binoculaire (stéréomicroscopie*) permet de dénombrer et caractériser (taille et morphologie) les particules supérieures à

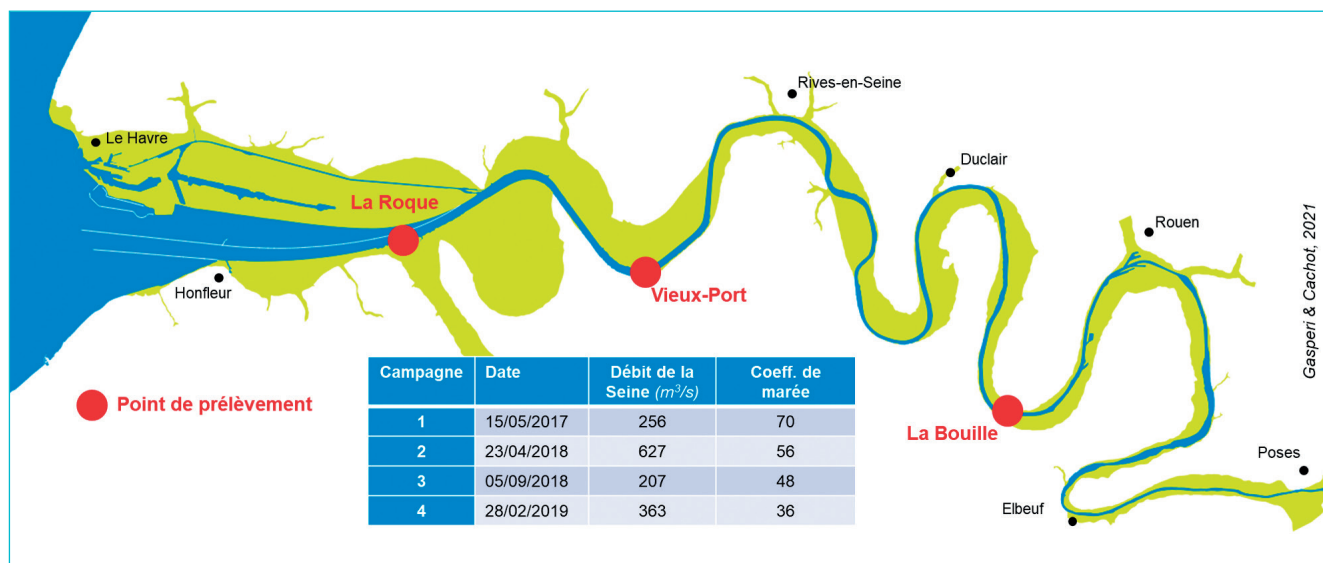


FIGURE 9 Campagnes de prélèvement des microplastiques dans l'eau.



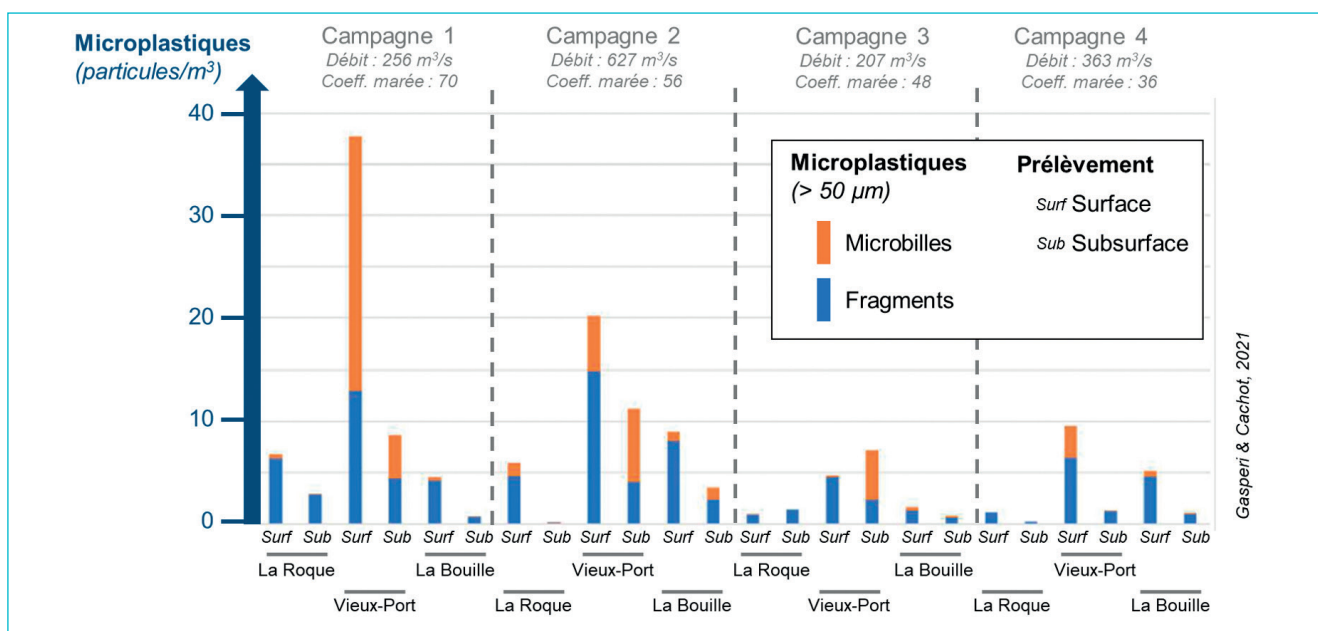
Gasperi & Cachot, 2021

FIGURE 10 Étapes de purification des échantillons prélevés dans la colonne d'eau.

50 µm [Figure 10]. Pour les échantillons des deux premières campagnes, les particules de microplastiques présumés ont été caractérisées par spectroscopie* pour préciser leur nature synthétique ou naturelle (type de polymère) [Gasperi & Cachot, 2021].

La **concentration en microplastiques dans la colonne d'eau** varie entre 0,2 et 37,7 particules/m³, avec une valeur médiane à 4 particules/m³ (fragments* + microbilles*). Les échantillons prélevés en surface présentent quasi-sys-

tématiquement des concentrations supérieures à celles observées dans les échantillons prélevés en subsurface, d'un facteur moyen de 5 à 6. Ceci s'explique par une surconcentration de la micro-couche de surface, notamment du fait de la flottabilité de certains microplastiques. Les fragments, de forme irrégulière, représentent la majorité des particules plastiques observées, avec une concentration variant entre 0,2 et 14,9 fragments/m³ [Figure 11]. Ces concentrations en estuaire de Seine sont comparables à celles observées sur



Gasperi & Cachot, 2021

FIGURE 11 Concentration en microplastiques (>50µm) dans la colonne d'eau.

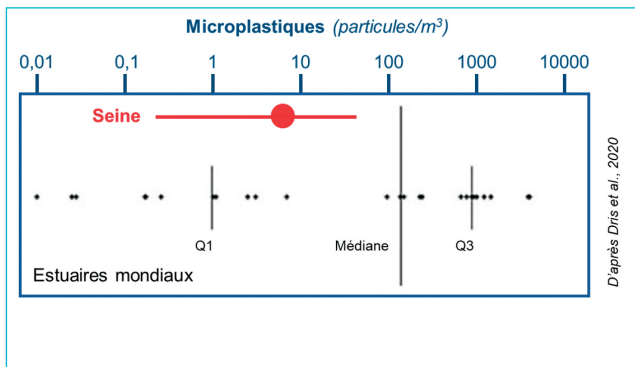


FIGURE 12 Concentrations en microplastiques quantifiées dans différents estuaires à travers le monde.

la partie plus amont de la Seine. Elles se placent dans la gamme moyenne des concentrations rapportées pour différents estuaires européens, mais restent inférieures aux concentrations mentionnées pour les estuaires chinois, souvent considérés comme les plus pollués [Figure 12 ; Dris et al., 2020]. Des microbilles ont également été observées (moyenne de 2,3 microbilles/m³), particulièrement sur le site de Vieux-Port où leur présence est marquée et vraisemblablement liée à une source industrielle locale [Figure 11]. En ce qui concerne les fibres totales (synthétique et cellulosique), les concentrations varient entre 0,2 et 6,6 fibres/m³ [Gasperi & Cachot, 2021].

La **distribution en taille des particules de microplastiques** montre de fortes fluctuations, sans tendance nette observée en fonction des stations ou du niveau de prélèvement (surface vs. subsurface). La plupart des microplastiques observés sont inférieurs à 1 mm, avec une prédominance

pour les tailles entre 300 et 500 µm. Ces observations sont cohérentes avec d'autres études menées en Seine, que ce soit à proximité du port du Havre (50 à 80 % des microplastiques totaux inférieurs à 400 µm [Kazour et al., 2019]) ou sur la partie amont du bassin (39 % des microplastiques totaux entre 300 et 500 µm [Treilles et al., 2019]).

Excepté sur le site de Vieux-Port où des concentrations très importantes de microbilles de polystyrène sont observées, la **nature des microplastiques** correspond majoritairement soit à du polyéthylène (40 %), soit à du polypropylène (21 %). D'autres polymères sont également retrouvés, mais de manière plus ponctuelle (polyéthylène téréphtalate, polyméthacrylate de méthyle, polyamide, acrylonitrile butadiène styrène, polychlorure de vinyle, polyuréthane...) [Figure 13]. Concernant les fibres, seule une faible proportion de polymères plastiques est observée, avec une très forte prédominance de polyamide [Gasperi & Cachot, 2021]. Ces analyses montrent la **présence systématique de plastiques de différentes tailles et de natures diverses dans la colonne d'eau**. La typologie de cette contamination est cependant différente de celle observée sur les berges [Partie I.B], à l'image des granulés plastiques industriels retrouvés en grand nombre sur les berges et peu retrouvés dans la colonne d'eau, ou des microbilles de polystyrène observées dans la colonne d'eau et peu retrouvées sur les berges. Ces différences d'imprégnation entre les berges et la colonne d'eau posent la question de la dynamique de ces particules et de leur transfert entre les différents compartiments, ainsi que de l'adaptation éventuelle des protocoles d'échantillonnage pour en assurer un suivi.

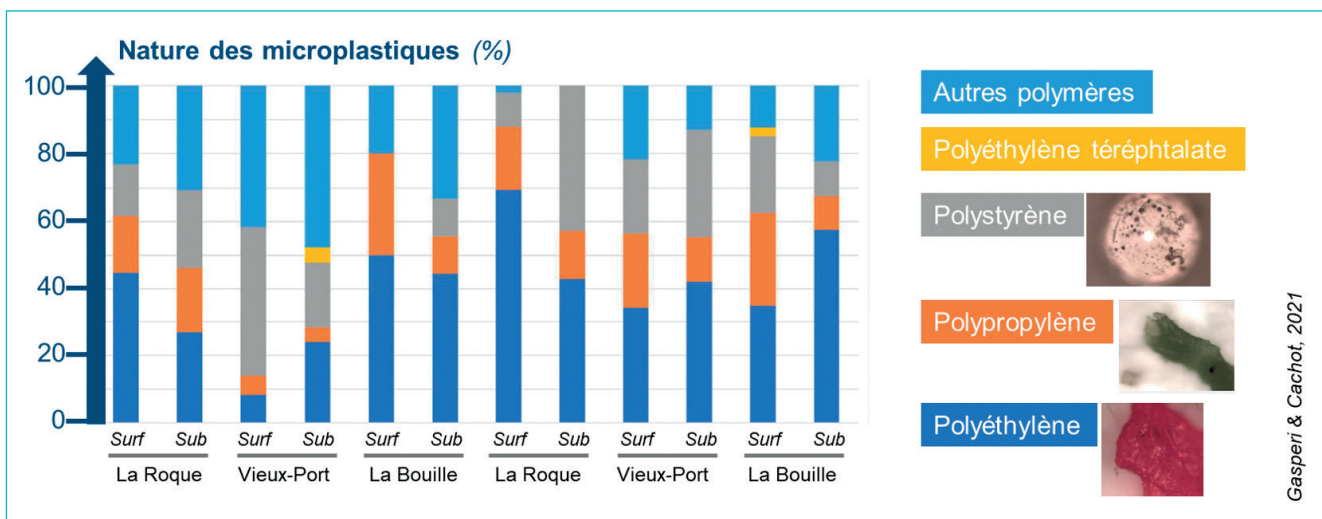


FIGURE 13 Nature des microplastiques présents dans la colonne d'eau.

C. DANS ET SUR LES FONDS SÉDIMENTAIRES



FIGURE 14 Chalut à perche de 3 m utilisé pour les inventaires à l'aval de l'estuaire de la Seine.

La présence de macroplastiques au fond de la Seine est documentée via des **inventaires des déchets remontés dans des traits de chalut** de 15 minutes réalisés tout au long de l'estuaire, au printemps et à l'automne depuis 2019 (chalut à perche de 3 m). Cet inventaire s'inscrit dans le suivi de l'ichtyofaune mené pour renseigner l'indicateur « poissons en eau de transition » de la Directive Cadre sur l'Eau en estuaire de Seine [Figure 14 ; CSLN, 2020]. Des déchets plastiques sont ainsi présents dans 46 % des traits de chalut, avec majoritairement des débris plastiques, des bouteilles et des produits associés à l'hygiène humaine (dans respectivement 83 %, 25 % et 19 % des traits pour lesquels des déchets ont été retrouvés). Cette typologie de déchets, avec notamment une présence importante d'emballages de produits alimentaires (bouteilles, canettes...)

semble être reliée à l'activité nautique sur le fleuve et dans les bassins, ainsi qu'aux activités nomades sur les berges et les quais de Seine. D'un point de vue spatial, ce sont les bassins portuaires de la boucle de Rouen (bassin Rouen-Quevilly et bassin St Gervais) qui présentent le plus grand nombre de déchets plastiques, en lien avec leur configuration physique qui favorise l'accumulation des déchets (moyenne de 78 déchets plastiques par trait de chalut, avec un maximum à 139 au printemps 2020). Hors bassins portuaires, c'est la boucle de Rouen qui présente le nombre de déchets plastiques le plus élevé, avec une moyenne de 8 déchets plastiques par trait de chalut. Enfin, les campagnes menées au printemps présentent systématiquement un nombre plus important de déchets plastiques possiblement relié à des apports hivernaux [Figure 15].

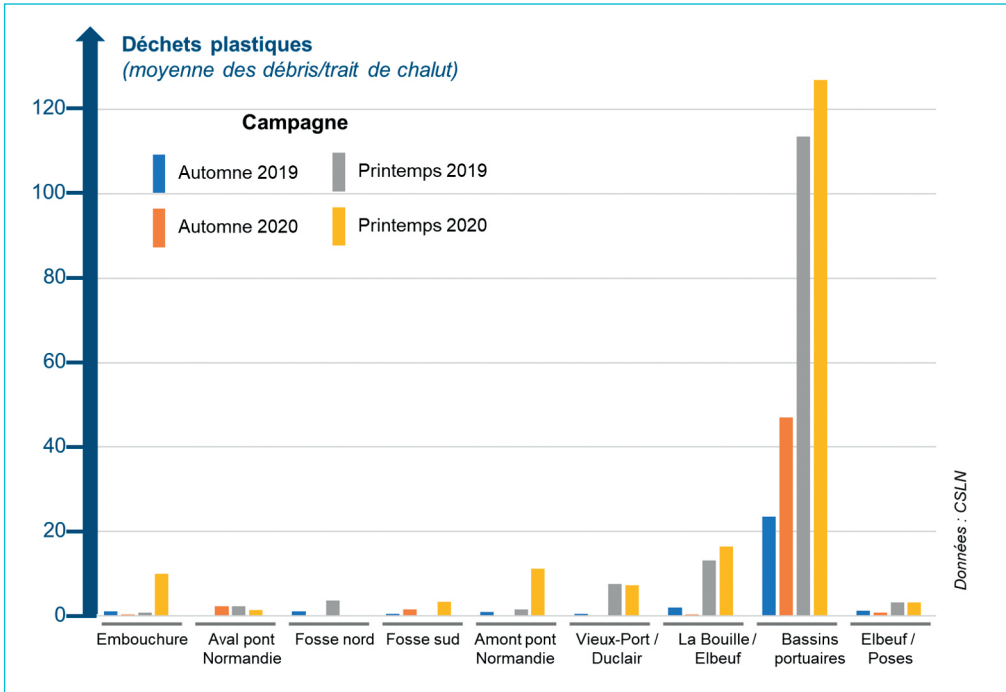


FIGURE 15 Déchets plastiques identifiés dans des traits de chalut.

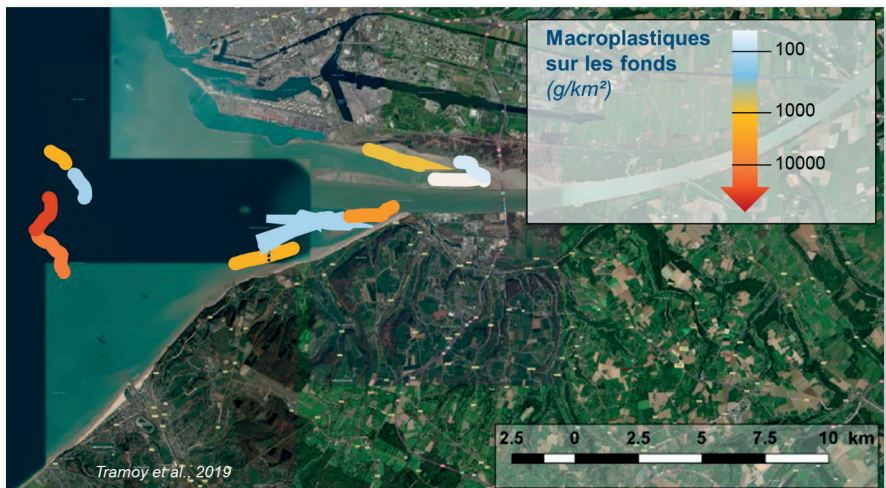


FIGURE 16 Concentration en macroplastiques sur les fonds à l'embouchure de la Seine.

Des campagnes de chalutage menées à l'embouchure de la Seine en septembre 2018 et mars 2019 ont également permis de collecter les **macroplastiques déposés sur les fonds marins**. A l'embouchure de la Seine, la concentration moyenne en plastiques est estimée à 3,96 kg/km² pour un nombre moyen de 8 372 macroplastiques/km² [Figure 16]. Les concentrations les plus fortes en macroplastiques (>10 kg/km²) sont observées au droit de l'embouchure et sont associées à des traits où était présente de la végétation aquatique, suggérant un piégeage de déchets plastiques par cette dernière. A l'image des plastiques retrouvés dans la colonne d'eau, les sacs/contenants et les emballages sont majoritaires sur les fonds marins à l'embouchure de la Seine.

Ces chiffres sont très importants en comparaison d'autres zones géographiques où les fonds marins ont été échantillonnés, avec des concentrations de l'ordre de quelques dizaines à centaines de macro-plastiques/km² [Tramoy et al., 2019]. Lors de la campagne de septembre 2018, en parallèle du comptage des macroplastiques, les organismes aquatiques remontés dans le filet de chalut ont été dénombrés. Les résultats indiquent un total de 184 organismes aquatiques (poissons, mollusques, crustacés) et 57 macroplastiques pour une superficie de 2 ha, soit un ratio de 1 plastique pour 3 organismes aquatiques [Figure 17 ; Gasperi & Cachot, 2021].



FIGURE 17 Contenu d'un trait de chalut réalisé en septembre 2018 à l'embouchure de la Seine.

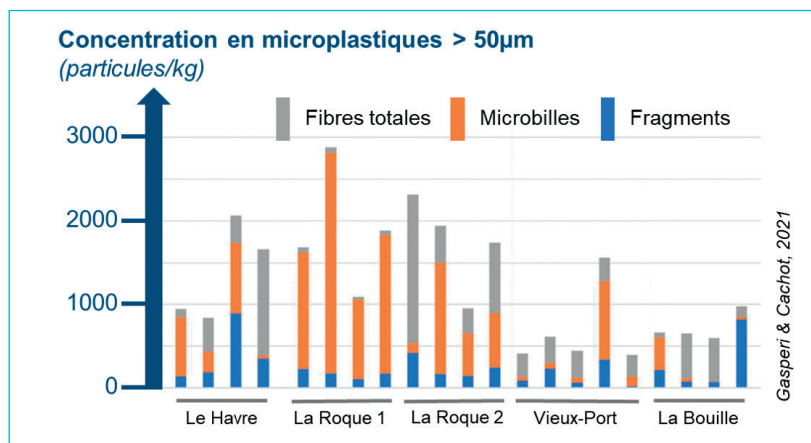


FIGURE 18 Concentration en microplastiques dans les sédiments de l'estuaire de la Seine.

Afin d'évaluer la **distribution des microplastiques dans les sédiments** de l'estuaire de la Seine, ces derniers ont été prélevés sur les banquettes latérales de la Seine, en quatre points (La Bouille, Vieux-Port, La Roque, Le Havre) lors de quatre campagnes [Figure 9]. Un protocole expérimental similaire à celui appliqué pour les échantillons de la colonne d'eau [Figure 10] a été mis en œuvre pour dénombrer et caractériser (taille et morphologie) les particules supérieures à 50 µm présentes dans les sédiments. Pour les échantillons des deux premières campagnes, les particules de microplastiques présumés ont été caractérisées par spectroscopie pour préciser leur nature synthétique ou naturelle (type de polymère) [Gasperi & Cachot, 2021].

Dans les sédiments, les microplastiques présentent une concentration moyenne de 238 fragments, 827 microbilles et 349 fibres par kg de sédiment (poids sec) [Figure 18]. Ces niveaux situent l'estuaire de la Seine au-dessus de celui la Loire (38-102 fragments/kg [Phuong *et al.*, 2018]), dans le même ordre de grandeur que l'estuaire de la rivière des perles en Chine (685 fragments/kg [Fan *et al.*, 2019]), mais en deçà des niveaux rapportés dans le delta de l'Ebre en Espagne (2 052 fragments/kg [Simon-Sánchez *et al.*, 2019]). A noter que le site de La Roque présente des niveaux de

contamination sensiblement plus élevés que les autres sites. La dynamique sédimentaire du secteur, avec la présence du bouchon vaseux, pourrait expliquer ce niveau de contamination.

La **distribution en taille** des microplastiques dans les sédiments montre de fortes fluctuations, que ce soit sur un même site ou entre les sites échantillonnés. Les microplastiques de petite taille prédominent, avec la fraction 50-300 µm qui peut atteindre jusqu'à 80 % des microplastiques totaux. A noter que les particules supérieures à 1 mm représentent 5 à 40 % des microplastiques totaux [Figure 19].

La **nature de microplastiques** retrouvés dans les sédiments montre une prédominance du polyéthylène, du polypropylène et du polystyrène. Ce dernier polymère peut représenter jusqu'à 60 % des polymères totaux, en lien avec les fortes concentrations de microbilles observées.

Ces résultats d'imprégnation du sédiment en microplastiques indiquent un **niveau de contamination modéré à fort de l'estuaire de la Seine** et confirment la capacité de concentration du compartiment sédimentaire et son rôle majeur dans la dynamique des microplastiques dans les milieux aquatiques.

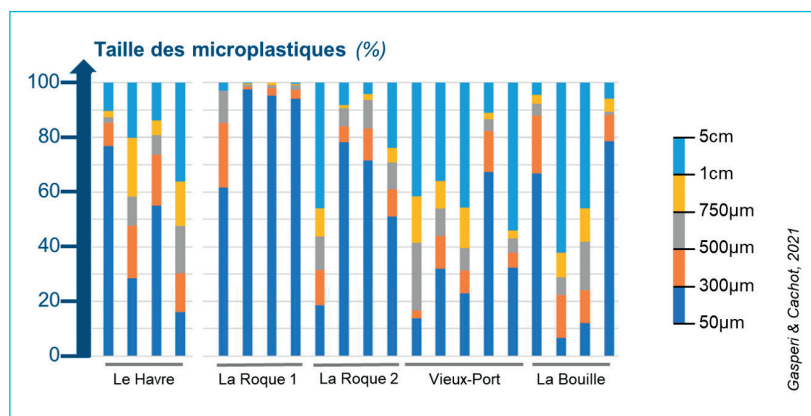


FIGURE 19 Distribution en taille des microplastiques observés dans les sédiments.

D. DANS LES ORGANISMES AQUATIQUES

Les sections précédentes ont montré l'omniprésence du plastique dans les compartiments abiotiques de l'estuaire de la Seine, pouvant servir de source de contamination vers le réseau trophique (compartiment biotique). Pour estimer le niveau d'imprégnation de ce dernier, la **contamination en microplastiques d'un panel d'espèces** a été évaluée à l'embouchure de la Seine : un annélide polychète (le ver *Hediste diversicolor*), un crustacé décapode (la cre-

vette blanche *Palaemon longirostris*), un mollusque bivalve (la moule bleue *Mytilus edulis*), deux poissons benthiques (le flet *Platichthys flesus* et la sole *Solea solea*) et un poisson pélagique (le bar *Dicentrarchus labrax*) [Figure 20 ; Gasperi & Cachot, 2021]. En complément, la présence de plastique dans le contenu stomacal de quelques individus d'une espèce d'oiseau marin (le fulmar boréal *Fulmarus glacialis*) a été évaluée sur le littoral de la Manche [OSPAR, 2018].

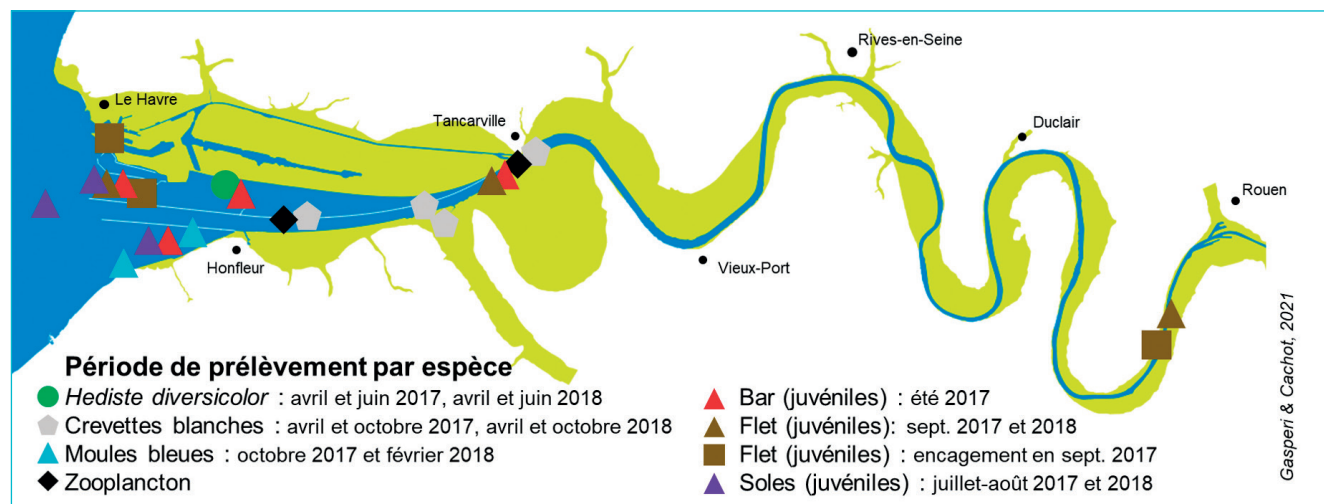


FIGURE 20 Sites de prélèvements des espèces pour la mesure de leur imprégnation en microplastiques.

1. Imprégnation des vers, des crustacés et des mollusques

En ce qui concerne les vers, les crustacés et les mollusques, une digestion du corps entier (après dépuration* pour les vers) a permis l'analyse par microscopie optique des microplastiques présumés présents dans l'ensemble de chaque organisme. Les microplastiques présumés ont ensuite été dénombrés, mesurés et annotés selon un critère de couleur. Un quart de ces particules a alors été caractérisé par microspectroscopie pour préciser leur nature synthétique ou naturelle [Gasperi & Cachot, 2021].

La présence de fibres et de fragments plastiques a été notée dans les tissus et les sédiments éliminés par les vers (*Hediste diversicolor*), avec une proportion de fibres plus importante. 61 % des individus analysés contiennent ainsi des microparticules plastiques présumées, avec un niveau de contamination variant entre 0,60 et 11,5 particules/g de tissu. Une majorité de particules de couleur bleue (puis noire et rouge) a été identifiée, dans une gamme de taille majoritairement comprise entre 100 et 4 000 μm . Seuls 28 % des fragments analysés ont été identifiés comme polymères plastiques, avec la présence de polyéthylène, de polypropylène et de polystyrène.

Chez les **crevettes blanches** (*Palaemon longirostris*) préle-

vées à l'embouchure de la Seine, des microplastiques présumés ont été observés dans près de la moitié des échantillons (moyenne de 0,34 particules/individu), avec une prédominance de fibres (82 %), quelques fragments et films. Une grande diversité de couleur est observée, mais avec une prédominance des fibres bleues et noires. La caractérisation des fibres indique cependant que seules 18 % correspondent à des polymères plastiques, la majorité étant des fibres textiles semi-naturelles [Figure 21]. A noter, la présence importante de fibres dans les eaux de rinçage des crevettes (moyenne

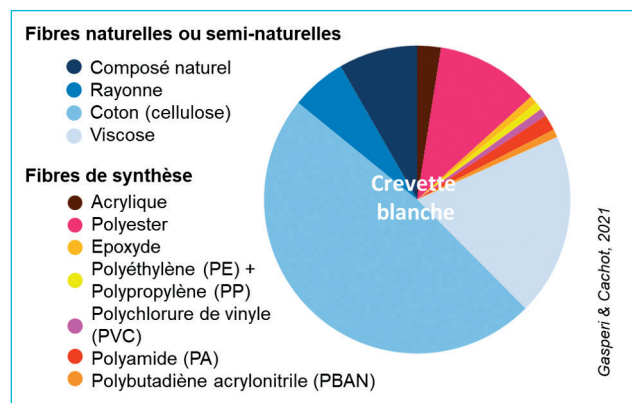


FIGURE 21 Caractérisation des microplastiques suspectés retrouvés dans les crevettes blanches en Seine.

de 2,8 particules/individu), indiquant une présence à la surface des organismes. Une analyse statistique des données a permis de mettre en évidence 1) une imprégnation homogène selon le lieu de prélèvement (entre Tancarville et la confluence avec la Risle) ; 2) une imprégnation automnale plus faible que l'imprégnation printanière pour les deux années de suivi (2017 et 2018) ; 3) une imprégnation similaire entre les mâles et les femelles ; 4) une imprégnation plus forte chez les individus en post-mue par rapport aux individus en inter-mue et pré-mue. Cette différence pourrait être attribuée à une reprise frénétique de l'alimentation en post-mue, après une période de jeûne.

Chez la **moule bleue** (*Mytilus edulis*), des microplastiques présumés ont été retrouvés chez tous les individus analysés (moyenne de 1,2 particules/g de chair humide), avec une présence essentiellement de fibres. Aucune variation spatiale du niveau d'imprégnation n'a été mise en évidence, alors que les niveaux mesurés en 2018 sont plus faibles que ceux mesurés en 2017. La couleur majoritairement observée est le noir et, en accord avec les résultats chez la crevette, l'analyse des fibres montre une majorité de fibres non synthétiques (cellulose), alors que les polymères plastiques identifiés sont divers (polyester, polyacrylate styrène, polyéthylène, kevlar). Ce niveau d'imprégnation observé à l'embouchure de la Seine est supérieur à celui des moules de la côte atlantique qui présentent une imprégnation moyenne de 0,23 particules/g et une présence dans 65 % des individus [Phuong *et al.*, 2018]. Ce niveau de contamination des moules sauvages a également été comparé avec des moules transplantées dans des casiers et exposées 6 semaines dans l'avant-port du Havre. Des microplastiques sont observés dans 93 % des moules transplantées, avec une imprégnation moyenne entre 0,61 et 1,67 particules/g. La forme des microplastiques, la taille et le type de polymères retrouvés dans les moules transplantées sont cohérents avec les observations menées dans l'eau, le sédiment et les moules sauvages prélevées dans le même secteur [Kazour & Amara, 2020].

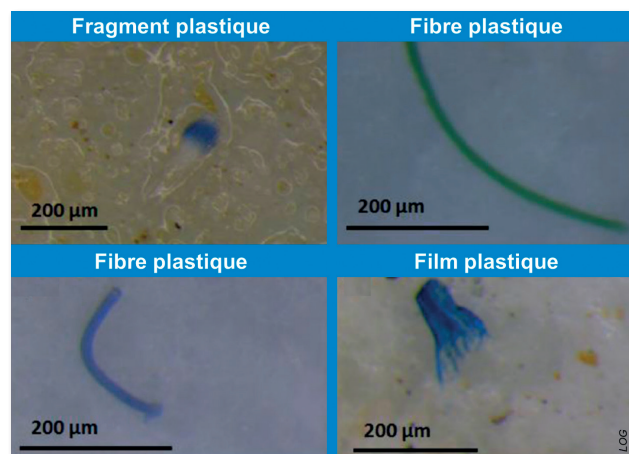


FIGURE 22 Microplastiques retrouvés dans le tractus digestif des flets.

2. Présence de plastique dans le tractus digestif des poissons

En ce qui concerne l'imprégnation des poissons, c'est le contenu du tractus digestif qui a été analysé, permettant d'estimer l'ingestion des microplastiques. Les microplastiques présumés ont été dénombrés, mesurés et annotés selon un critère de couleur. Une partie de ces particules a alors été caractérisée par spectroscopie infrarouge ou Raman pour préciser leur nature synthétique ou naturelle [Gasperi & Cachot, 2021].

Concernant les **juvéniles de flet** (*Platichthys flesus*), 70 à 80 % des individus prélevés à l'embouchure de la Seine (en fosse nord) ont ingéré des microplastiques présumés, avec un niveau moyen d'imprégnation supérieur à 2 particules/individu (fibres + films + fragments). Les microplastiques inférieurs à 200 µm sont dominants et 70 % sont inférieurs à 600 µm. Les fibres et les fragments sont majoritaires, même si quelques films ont été retrouvés [Figure 22]. Ce niveau d'imprégnation des flets prélevés en Seine peut être comparé à des mesures similaires réalisées sur des juvéniles de flets

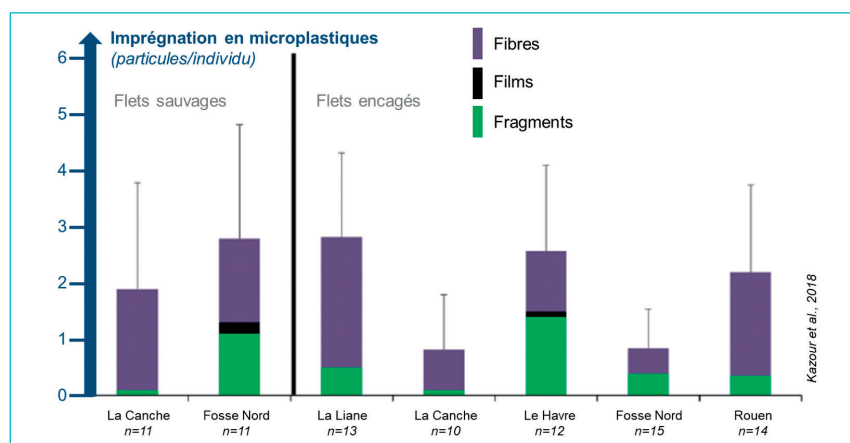


FIGURE 23 Imprégnation en microplastiques de juvéniles de flet (tractus digestif).

encagés pendant un mois en Seine (Petit-Couronne, fosse nord, avant-port du Havre) et sur deux petits estuaires (la Canche et la Liane). Là encore, une présence de microplastiques est notée dans le tractus digestif des flets (quelques particules/individu), avec une prédominance de fibres et de fragments [Figure 23 ; Kazour *et al.*, 2018]. Ce sont les flets encagés dans l'avant-port du Havre, sous l'influence des rejets de la station d'épuration des eaux usées havraises, qui présentent les plus forts pourcentages d'imprégnation en microplastiques, avec 92 % des organismes présentant au moins un microplastique dans le tractus digestif. Ce résultat va dans le sens d'une contribution des effluents de stations d'épuration (et des by-pass) à la présence de fibres plastiques dans le milieu aquatique [Encart n°2 – Zoom sur le port du Havre]. Les fibres de couleur bleue ou rouge sont les plus nombreuses, avec une taille variant entre 70 et 4 510 μm . Les principaux polymères plastiques identifiés sont le polyamide, le polyester et le polyuréthane.

Concernant la sole (*Solea solea*), 80 à 98 % des individus prélevés à l'embouchure de la Seine ont ingéré des microplastiques présumés, avec un niveau moyen d'imprégnation variant entre 3 et 7 particules/individu, selon l'année de prélèvement (2017, 2018) et la classe d'âge (G0, G1). Comme observé chez la crevette, les niveaux mesurés en 2018 sont plus faibles que ceux mesurés en 2017. Les fibres totales, qui incluent des fibres cellulosiques et synthétiques, représentent l'essentiel de la contamination, même si des fragments et des microbilles ont pu être observés. Les principaux polymères plastiques identifiés sont le polyester et le polyéthylène.

Pour le bar (*Dicentrarchus labrax*), des microplastiques présumés sont observés dans le tractus digestif de 68 % des individus prélevés en Seine en 2018, avec un niveau moyen de 2,3 particules/individu, majoritairement des fibres (67 %), puis des fragments (30 %) et des films. Le niveau d'imprégnation augmente sensiblement entre les classes d'âge G0 et G1. La taille des microplastiques ingérés varie entre 100 et 2 000 μm , avec une dominance de la couleur bleue et noire. Neuf polymères différents ont été identifiés, avec une présence majoritaire du polyéthylène téréphtalate. Les fibres cellulosiques représentent 25 % des fibres totales isolées dans le tractus des bars. En 2017, seuls les fragments avaient été recherchés et retrouvés dans le tractus digestif de plus de la moitié des individus analysés (moyenne d'un fragment/individu), sans qu'une différence significative ne soit mise en évidence selon la classe d'âge.

3. Bilan de l'imprégnation en microplastique des organismes aquatiques

Des microplastiques, majoritairement des fibres et des fragments, ont été retrouvés dans toutes les espèces investiguées en estuaire de la Seine en 2017 et 2018. Cela représente l'analyse de près de 1 000 individus, englobant des annélides, des crustacés, des bivalves et des poissons. A ce stade, aucun profil type d'imprégnation n'a été mis en évidence, le niveau d'imprégnation étant très variable d'un individu à l'autre, tout comme la taille, la couleur et la nature des microplastiques observés. Les fibres, principalement cellulosiques, sont cependant majoritaires. Les polymères plastiques identifiés sont principalement du polyéthylène téréphtalate et du polyéthylène [Tableau II].

TABLEAU II Imprégnation en microplastiques présumés des organismes aquatiques prélevés en estuaire de Seine.

Espèce*	Contamination % des individus	Imprégnation moyenne	Formes majoritaires	Couleurs majoritaires	Gamme de taille (μm)	Polymères majoritaires
Gravette (ver)	61 %	3,6 particules/g de chair	Fibres et fragments	Noire, bleue et rouge	100-4000	PE, PP et PS
Crevette blanche	44 %	0,34 particules /indiv.	Fibres	Noire et bleue	ND	ND
Moule bleue	100 %	3,3 particules /indiv.	Fibres	Noire	250-500	ND
Flet européen	70-80 %	2,6 particules /indiv.	Fibres	Bleue et rouge	< 800	PA, PET, PUR
Sole commune	80-98 %	6 particules /indiv.	Fibres	Noire et Bleue	100-5000	ND
Bar commun	50 %	2,3 particules /indiv.	Fibres et fragments	Bleue et rouge	100-2000	PET

PUR : polyuréthane, PA : polyamide, PET : polyéthylène téréphtalate, PP : polypropylène, PE : polyéthylène, PS : polystyrène, ND : non déterminé
*tractus digestif pour les poissons ; organismes entiers (tissus mous) pour les autres espèces

4. Présence de plastique dans le contenu stomachal du fulmar

La présence de plastique dans les estomacs des oiseaux marins peut être approchée par un suivi du contenu stomacal de **fulmars boréaux** (*Fulmarus glacialis*) échoués sur les plages ou tués accidentellement. L'estomac de 75 % des 12

fulmars provenant du littoral de la Manche contient plus de 0,1 g de plastique sur la période 2012-2016. Ces chiffres sont les plus élevés du secteur Manche – Mer du Nord, témoignant de l'abondance particulière de plastiques en Manche et baie de Seine [Figure 24 ; OSPAR, 2018].

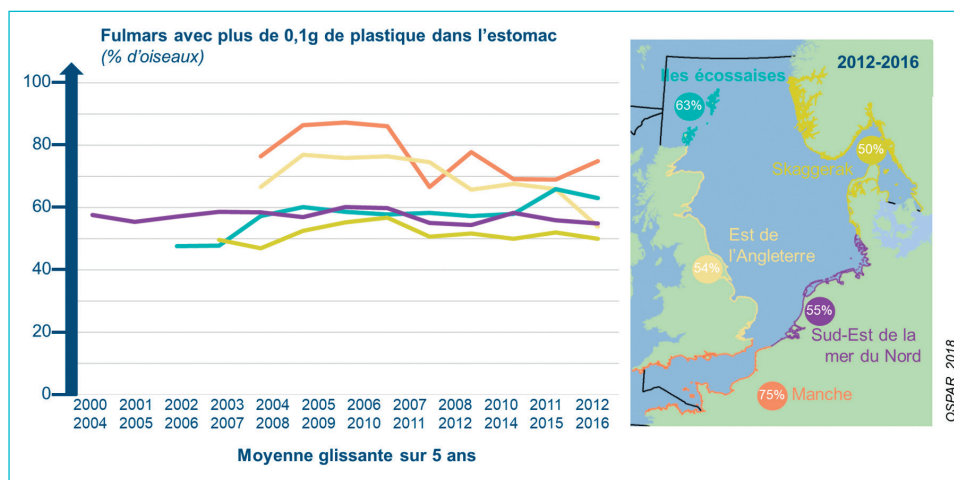


FIGURE 24 Proportion de fulmars en Manche - Mer du nord avec plus 0,1 g de plastique dans l'estomac.



ENCART N° 2

Zoom sur le port du Havre

La zone portuaire havraise est, du fait de la présence de diverses sources potentielles de contamination par les débris plastiques (urbaines, industrielles, liées à la pêche...) et de sa configuration physique semi-fermée (présence de bassins), un site intéressant pour étudier la contamination du milieu par les plastiques et leurs devenir (dispersion, accumulation,...). Pour apprécier la pollution plastique de ce secteur, le niveau d'imprégnation en microplastiques a été évalué dans différents compartiments (eau, sédiments, biote) en plusieurs points du port du Havre. Un point de suivi sur le littoral, à proximité d'une ancienne décharge (Dollemerd), a

également été investigué et les apports de la station d'épuration urbaine havraise (Edelweiss : 415 000 équivalents habitants) évalués [Figure B].

En entrée de station d'épuration, l'effluent non traité présente une contamination moyenne en microplastiques de 244 particules/L, avec une prédominance des fragments. 10 polymères ont été identifiés, principalement du polystyrène et du



FIGURE B Points de suivis des microplastiques dans le port du Havre et sur le littoral.

polyéthylène. En sortie de station, cette contamination a été largement réduite, avec une moyenne de 2,84 particules/L, indiquant une efficacité de rétention du système d'assainissement proche de 99 % pour les microplastiques. A noter que les boues produites lors du traitement comportent une moyenne de 16 particules/g, avec une dominance de fibres. Ces mêmes fibres synthétiques composent entre 25 et 40 % des microplastiques présents dans l'effluent traité qui est rejeté dans le port du Havre, avec là encore une dominance du polyéthylène et du polystyrène.

A mesure que l'on s'éloigne du rejet de la station d'épuration, une dilution de la contamination en microplastiques est observée dans le port du Havre. A 5,3 km (point 4), la contamination en microplastiques a ainsi chuté de 96 % [Figure C]. Les niveaux observés restent cependant importants au regard d'autres systèmes et semblent être à relier à la présence d'un rejet continu dans un système portuaire semi-fermé favorable à l'accumulation des microplastiques. A proximité de la décharge littorale de Dollemard, cette contamination augmente très fortement, avec des niveaux supérieurs à 6 particules/L et la présence de microplastiques primaires et secondaires. Le niveau d'imprégnation des sédiments est quant à lui comparable entre les différents sites, avec des niveaux compris entre 0,41 et 1,04 particules/g et une présence majoritaire de fragments. Cette dominance des fragments est également observée dans les moules, où 93 % des organismes analysés comportent au moins un microplastique. Ceci suggère une source additionnelle en microplastiques dans le port du Havre, les rejets urbains étant dominés par des apports en fibres textiles. Cette dominance des fragments peut aussi être liée à la limite d'observation. Les moules prélevées au large de la décharge littorale de Dollemard présentent une imprégnation plus importante que celles prélevées dans le port du Havre, confirmant la contamination importante observée dans l'eau pour ce site. De même, la répartition des polymères identifiés sur ce site semble spécifique à ce dernier, avec une forte abondance de polyéthylène téréphtalate et de polystyrène. Ces éléments vont dans le sens d'une source locale liée à la fragmentation des plastiques rejetés par la décharge et montrent l'importance significative de ces apports vers le milieu marin [Kazour et al., 2019].

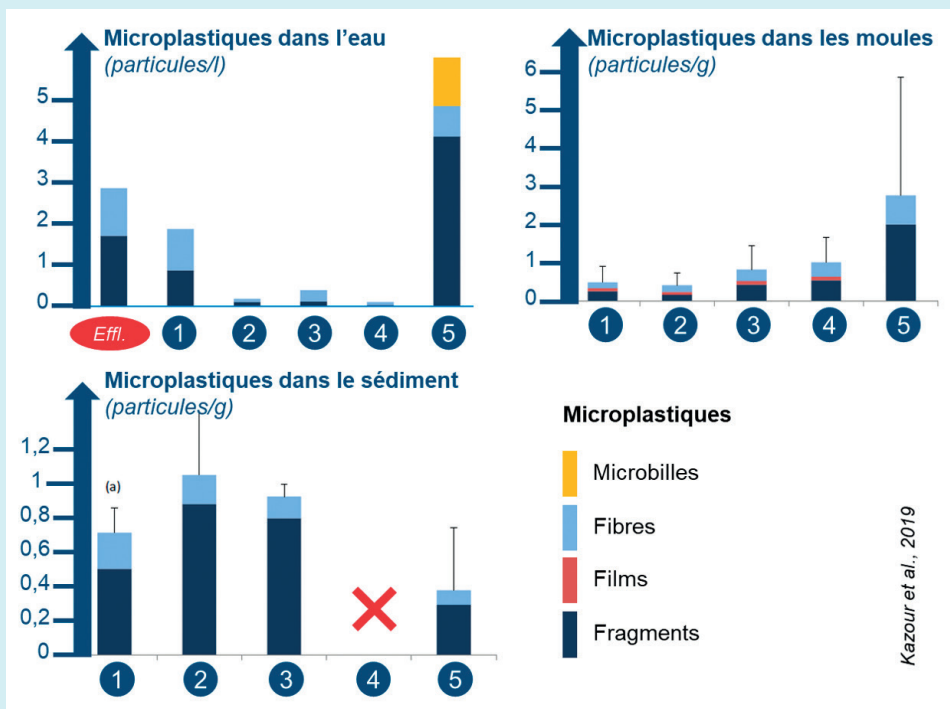


FIGURE C Concentration en microplastiques en sortie de la station d'épuration (Effl.), dans le port du Havre (stations 1 à 4) et à proximité de la décharge littorale de Dollemard (station 5), dans les 3 compartiments eau, sédiments et moules.

II LA DYNAMIQUE DES PLASTIQUES DANS L'ESTUAIRE DE LA SEINE



Les estuaires sont très dynamiques, qu'il s'agisse de la colonne d'eau elle-même avec l'influence du cycle de marée, du débit, du gradient de salinité ou de la dynamique sédimentaire. Ces particularités estuariennes s'ajoutent aux autres facteurs susceptibles d'influencer la dynamique des débris plastiques, tels que les paramètres météorologiques et les facteurs anthropiques (zones urbaines, rejets de station d'épuration, ports et activités industrielles, ramassages, morphologie des berges...).

Ce chapitre propose d'explorer les principaux déterminants du comportement des plastiques dans l'estuaire de la Seine, à savoir la marée, le débit et les ramassages.

A. UNE DISTRIBUTION EN MICROPLASTIQUES VARIABLE DURANT UN CYCLE DE MARÉE

La distribution des microplastiques ($> 300 \mu\text{m}$) au sein de la colonne d'eau a été étudiée au cours de deux cycles de marée dans la zone du bouchon vaseux de l'estuaire de la Seine (site de La Roque). Pour rendre compte de cette distribution, des prélèvements ont ainsi été effectués à trois niveaux (subsurface, mi-profondeur et proximité du fond) à différents moments de la marée [Figure 25 ; Figure 26 ; Gasperi & Cachot, 2021].

De forts gradients de concentrations en microplastiques entre le fond et la surface et des évolutions au cours du cycle de marée ont été mis en évidence [Figure 27]. Ces évolutions semblent être liées à la dynamique hydro-sédimentaire très intense dans le secteur. Pour l'ensemble des prélèvements effectués en fin d'étales ou en fin de jusant, des concentrations plus importantes ont été observées

pour les eaux prélevées au fond (entre 6 et 10 m) et des concentrations plus faibles pour les eaux de surface. Cette tendance est observable pour les fragments et dans une moindre mesure pour les microbilles, lorsque ces dernières sont détectées. À l'image de la distribution des matières en suspension, ce gradient de concentration en microplastiques peut s'expliquer à la fois par une remise en suspension des sédiments de fond riches en microplastiques lors du flot et à leur sédimentation au cours de l'étales. Les concentrations observées à mi-hauteur de la colonne d'eau (entre 4 et 6 m) présentent des comportements intermédiaires, soit proches de ce qui est observé en surface ou au fond, soit entre les deux. Ce comportement pourrait être lié soit à la stratification de la colonne d'eau qui évolue au cours de la marée, soit à la sédimentation des microplastiques au

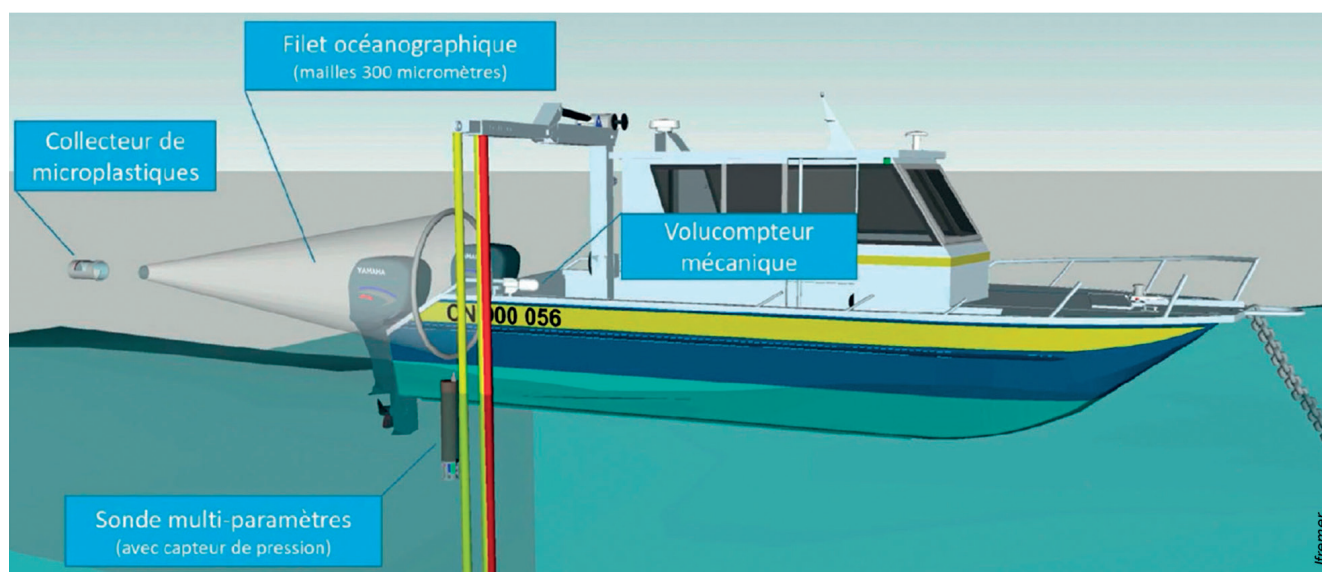


FIGURE 25 Prélèvement de microplastiques en point fixe.

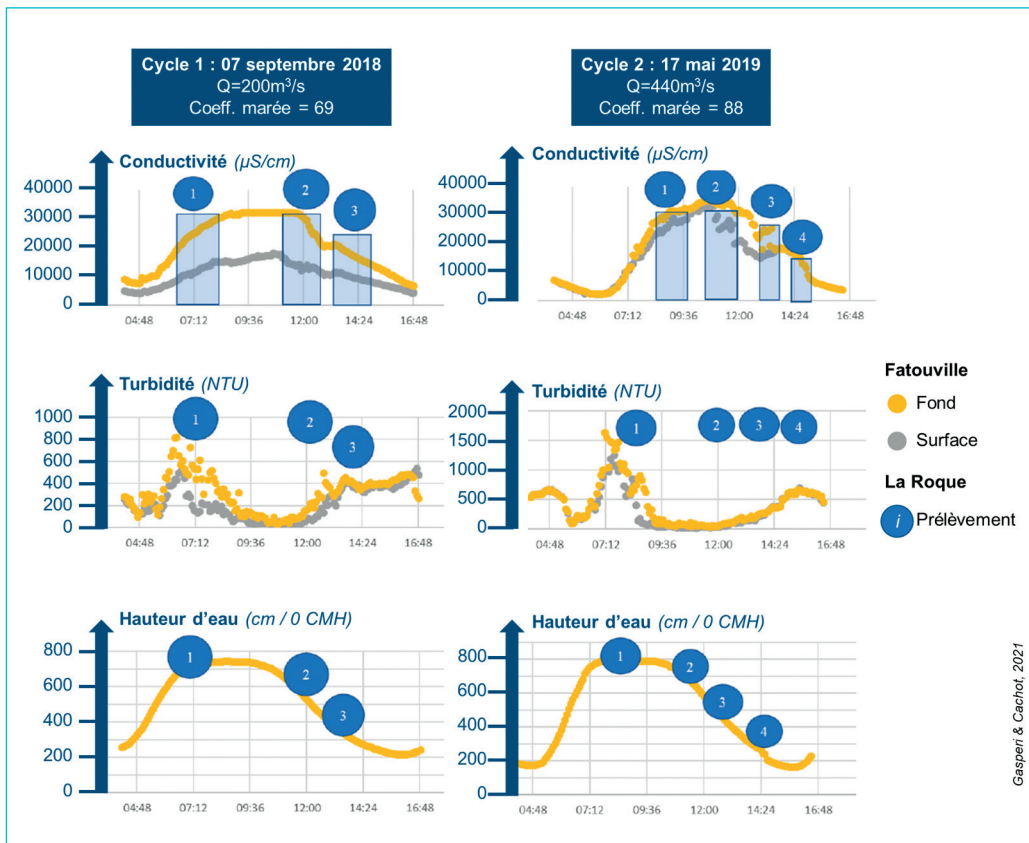


FIGURE 26 Profils de conductivité, turbidité et marégrammes lors des deux cycles de marée étudiés.

cours de l'étalement et à la remise en suspension d'une partie des sédiments riches en microplastiques.

Des évolutions importantes de la **distribution de taille des microplastiques** (échantillonnage avec un filet de maille 300 µm) ont aussi été observées, à la fois dans le temps (début vs. fin de jusant) et dans l'espace (surface, mi-hauteur, fond). Au cours du jusant, la proportion de microplastiques de taille inférieure à 300 µm diminue drastiquement pour les trois hauteurs de prélèvement et se stabilise autour de 25 % des microplastiques totaux. Ces évolutions de la distribution de taille pourraient être reliées à la dynamique des particules et donc *in fine* des microplastiques et aux processus de floculation-défloculation qui se déroulent au sein du bouchon vaseux. Concernant la **répartition des polymères** au cours d'un cycle de marée, aucune évolution verticale (surface, mi-hauteur et fond) ou temporelle (début et fin de jusant) n'est observée.

A l'échelle d'un cycle de marée, la dynamique hydro-sédimentaire très intense dans la zone du bouchon vaseux semble générer des **gradients de concentration en microplastiques** et des **variations de la distribution de taille des microplastiques** au sein de la colonne d'eau (agrégation des petits microplastiques). Elle n'engendre pas de ségrégation des microplastiques d'un point de vue qualitatif.

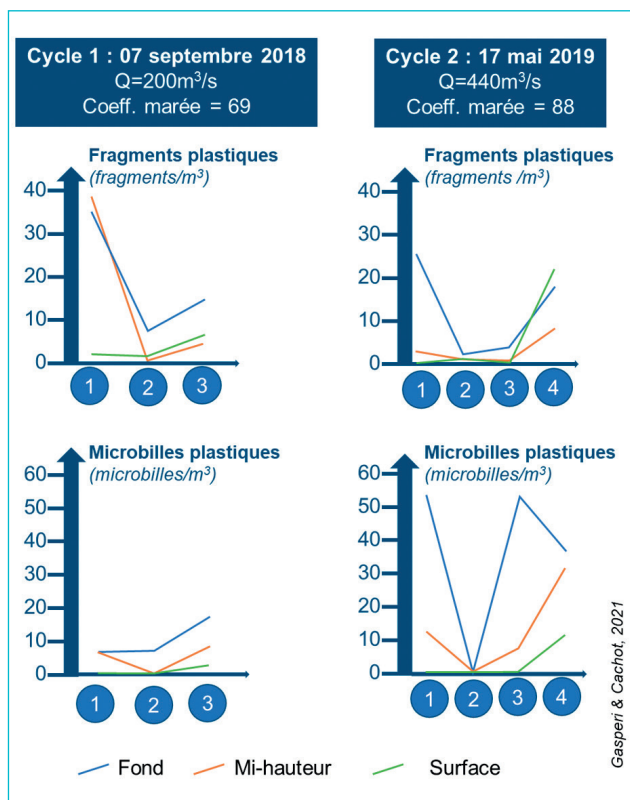


FIGURE 27 Concentration en fragments et microbilles plastiques lors de deux cycles de marée.

B. UN TRANSIT DE L'AMONT VERS L'AVAL EN LIEN AVEC LE DÉBIT

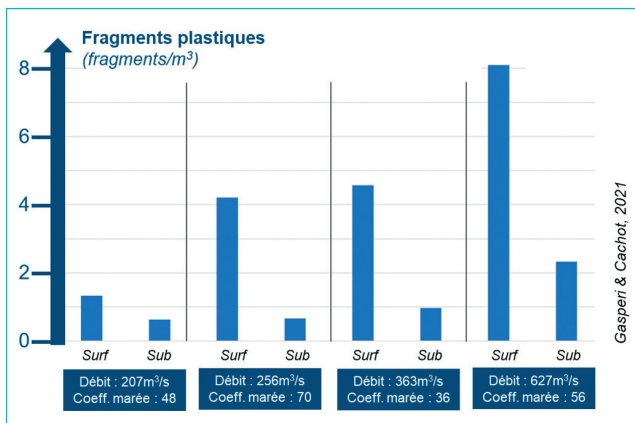


FIGURE 28 Concentration en fragments plastiques à la Bouille pour différentes conditions de débit.

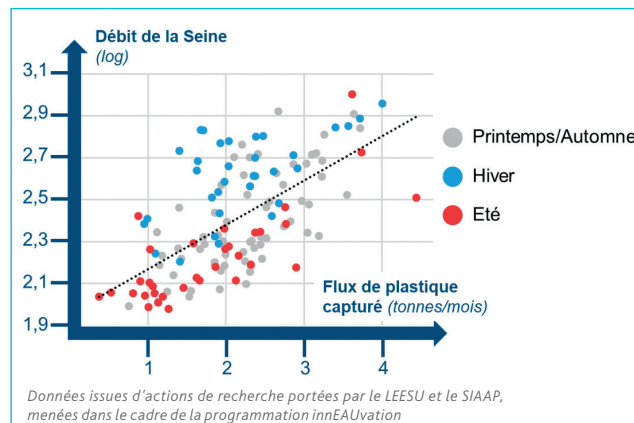


FIGURE 29 Lien entre le débit de la Seine et le flux de plastique capturé par les barrages flottants sur la Seine, en amont et en aval de Paris.

En amont de l'estuaire de la Seine, la concentration en microplastiques augmente en période de crue [Treilles *et al.*, 2019]. Cette augmentation serait due à la remise en suspension des sédiments fluviaux lors des périodes de hautes eaux, les sédiments pouvant être considérés comme un puits important de microplastiques. Le lessivage des sols ou les surverses unitaires de temps de pluie, reconnues comme une source potentielle de microplastiques, pourraient aussi contribuer à cette augmentation des concentrations en microplastiques.

Ce lien entre débit de la Seine et microplastiques a été spécifiquement exploré dans la partie estuarienne de la Seine, sur le site de La Bouille. Même si le nombre de campagnes reste faible pour conclure sur un comportement spécifique, les concentrations en fragments plastiques semblent augmenter avec le débit [Figure 28 ; Gasperri &

Cachot, 2021], en cohérence avec les observations sur la partie amont de la Seine.

Même si les processus en jeu ne sont pas les mêmes et qu'une autre gamme de taille de débris plastiques est considérée, ce lien entre le débit de la Seine et le flux de plastique dans le fleuve a également été observé par des **comptages visuels du nombre de macrodéchets plastiques transitant en Seine** à Rouen qui montrent une augmentation en période de plus fort débit (septembre 2018 dans des conditions de morte-eau avec un débit de 200 m³/s vs. mars 2019 dans des conditions de vive-eau et avec un débit de 800 m³/s) [Figure 7]. Ceci est confirmé par la quantité de débris plastiques capturés par les barrages flottants positionnés par le SIAAP sur la Seine en amont et en aval de Paris, qui est plus importante quand le débit de la Seine augmente [Figure 29]. La quantité de déchets collectés sur les berges de

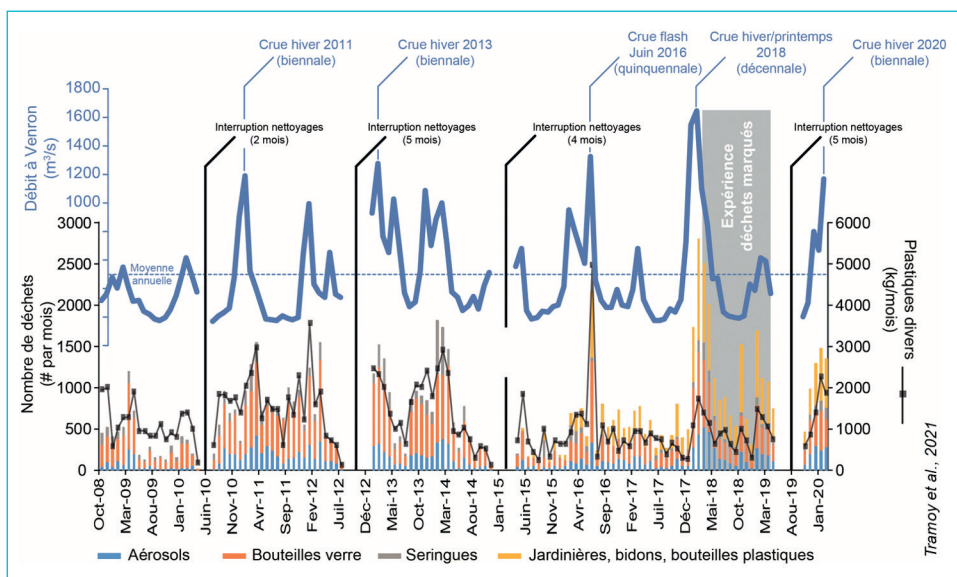


FIGURE 30 Débit de la Seine et quantité de déchets collectés mensuellement sur les berges de Seine, à l'aval de Rouen.

l'estuaire de la Seine en aval de Rouen confirme également cette tendance, avec une hausse du nombre de bouteilles en verre, de jardinières en plastique, de seaux, de bidons... collectés durant la crue de l'hiver 2018. L'épisode de crue du printemps 2016 apparaît également avec un très net pic pour tous les objets recensés. Toutefois, il est bien plus net pour les plastiques divers et les bouteilles que pour les autres objets. La durée des événements de crue a certainement un impact ici : la crue de 2018 s'étant déroulée sur plusieurs mois, les déchets ont été massivement exportés de l'amont vers l'aval sur toute cette période ce qui expliquerait des pics plus longs que pour la crue de 2016, plus courte [Figure 30 ; Tramoy et al., 2021].

Cette augmentation du **flux de macroplastiques dans le fleuve** en période de débit plus élevé peut être attribuée 1) à la hausse des précipitations entraînant le transfert de déchets sauvages dans la Seine par ruissellement ; 2) aux apports par les bassins d'orage des réseaux d'assainissement ; et 3) à la remobilisation des déchets stockés au niveau des berges. En effet, les berges peuvent agir comme des réceptacles temporaires de déchets remobilisables à la faveur de l'augmentation des débits [Liro et al., 2020]. Cette hypothèse semble se confirmer par des inspections de berges en amont de Paris qui ont montré la présence de stocks constitués le long de la berge concave dans et hors de l'eau (plus de 1 800 déchets comptés par km en octobre 2018). Les déchets, quasi-intégralement plastiques, étaient concentrés autour des bateaux amarrés dans des zones où l'eau stagne, ainsi que dans des zones de développement de végétation aquatique [Figure 31]. Avec l'augmentation des débits, plus aucun stock n'était observé en janvier 2019, mais



FIGURE 31 Déchets plastiques sur une zone avec de la végétation aquatique.

un flux de plus de 1 400 objets par heure a été mesuré, allant dans le sens d'une remobilisation de ces stocks temporaires de macrodéchets lorsque le débit de la Seine augmente [Figure 32 ; Tramoy et al., 2019].

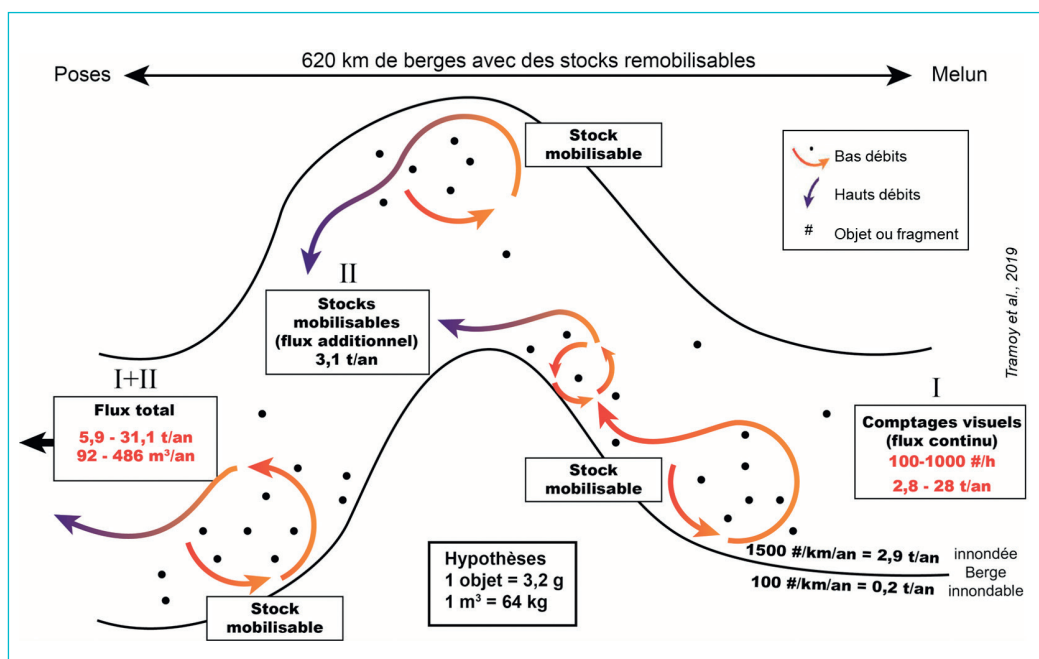


FIGURE 32 Flux de plastique et stocks remobilisables dans l'eau et sur la berge inondable, entre Melun et Poses.

C. DES SÉQUENCES DE DÉPÔT / REMISE EN SUSPENSION SUR LES BERGES

Une approche de **suivi de macrodéchets plastiques équipés de traceurs** a permis d'en aborder le comportement et la dynamique dans l'estuaire de la Seine. Cette approche s'appuie sur une triple expérimentation :

- 1) rejet de déchets marqués dans l'estuaire pour déterminer la part collectée sur la berge lors des opérations de ramassage menées à l'aval de Rouen [Tramoy *et al.*, 2021] ;
 - 2) suivi GPS des trajectoires de balises imitant des déchets flottants ou semi-immergés [Tramoy *et al.*, 2020b] ;
 - 3) collecte des déchets marqueurs datés [Tramoy *et al.*, 2020a].
- Concernant les **déchets marqués**, cela concerne 365 objets de toutes sortes (bouteilles plastiques, bidons, jardinières, jouets, sceaux, couvercles, pneus...) rejetés à l'aval de Rouen (Petit-Couronne) dans diverses conditions hydrologiques, notamment en période de crue. Sur l'ensemble de ces objets marqués, 36 % ont été signalés échoués sur les berges de la Seine, jusqu'à plusieurs mois après leur lâcher [Figure 33]. Parmi ces objets, 43 % ont été signalés une 2^e fois sur le même site ou sur un autre et 16 % l'ont été une 3^e fois ; certains pouvant même être signalés jusqu'à 6 fois. Un



FIGURE 33 Présence d'un déchet marqué en Seine.

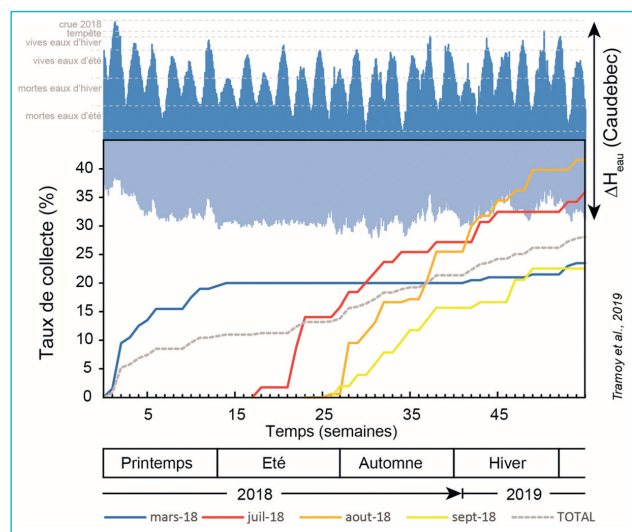


FIGURE 34 Taux de collecte des déchets marqués en fonction des différents lâchers et des hauteurs d'eau de la Seine à Caudebec-en-Caux.

seul déchet a été retrouvé échoué en mer, sur le littoral à 20 km au nord du Havre. Il s'agissait d'un déchet relâché en mars 2018 en période de crue. Ces résultats vont dans le sens d'un échouage systématique des plastiques transitant en estuaire, avec des phases de remobilisation fréquentes. Cette expérimentation a également permis d'évaluer à 28 % le taux de collecte des ramassages menés sur les berges de Seine en aval de Rouen [Figure 34]. L'évolution des taux de collecte en fonction des différents lâchers laisse à penser que le taux de collecte global maximal n'a pas été atteint et qu'il doit s'évaluer sur plusieurs années, notamment pour prendre en compte la survenue d'évènements majeurs capables de remobiliser des objets échoués haut sur les berges depuis des zones non explorées.



FIGURE 35 Balise GPS suivie en Seine.

Le **suivi GPS des trajectoires** concerne une cinquantaine de balises lâchées dans la Seine entre mars 2018 et avril 2019, dont 36 en différents points de l'estuaire. Ce suivi a permis de mettre en évidence des dynamiques de transfert très différentes dans l'espace et le temps, avec une dynamique propre à l'amont de Poses et une dynamique estuarienne liée à la marée [Figure 35]. A l'amont de Poses, les plastiques sont transférés de l'amont à l'aval en lien avec le débit [Partie II.B] ; alors que dans l'estuaire, ils peuvent remonter vers l'amont sur plusieurs kilomètres sous l'influence des marées. Bien que les trajectoires semblent aléatoires, elles montrent toutes des échouages sur les berges [Figure 36 ; Figure 37], confirmant les observations de l'expérimentation avec les déchets marqués. En effet, sur les 50 balises GPS, une seule a atteint la mer après avoir été jetée depuis un bateau sous le pont de Normandie lors de l'étape de pleine mer. En condition de débit normal, ce transfert est lent (médiane de 2,3 km/jour) et les échouages longs (médiane de 15 jours) ; alors qu'une crue accélère le transfert (médiane de 19,1 km/jour) et réduit les temps d'échouage (médiane de 5,6 jours) [Tramoy et al., 2020b].

Les principaux facteurs conduisant à l'**échouage ou la remobilisation des déchets sur les berges** semblent être les coefficients de marées, les vents, le trafic fluvial, la morphologie des berges et leur végétalisation. Il est également suggéré que dans les estuaires avec un marnage important, comme dans le cas de la Seine, la remontée du flot dans le chenal entraînerait la formation d'une zone de convergence axiale avec des courants de surface allant des berges vers le centre du chenal, concentrant les débris flottants. Si les conditions le permettent, ce mécanisme serait responsable de la remobilisation des déchets échoués sur les berges et de leur transport vers l'amont. Il formerait également un courant plongeant au centre du chenal qui aboutirait à des courants de retours de fond du centre du chenal vers les berges. Ces courants pourraient transporter des déchets plus denses en direction des berges où ils s'y échoueraient. Dans les zones concaves du fleuve, les courants hélicoïdaux viendraient contrer ces courants de retour, créant une zone de turbulence propice au dépôt de ces déchets denses sur les berges. Les vents, les vagues liées au trafic fluvial et la présence de débris végétaux et de bois flotté constitueraient des facteurs facilitant leur échouage [Tramoy et al., 2019].

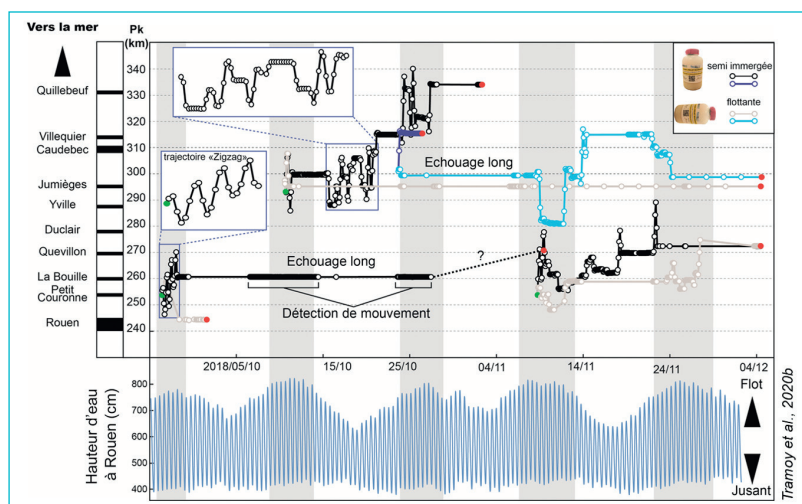


FIGURE 36 Trajectoires GPS de balises lâchées en conditions d'étiage (octobre 2018).

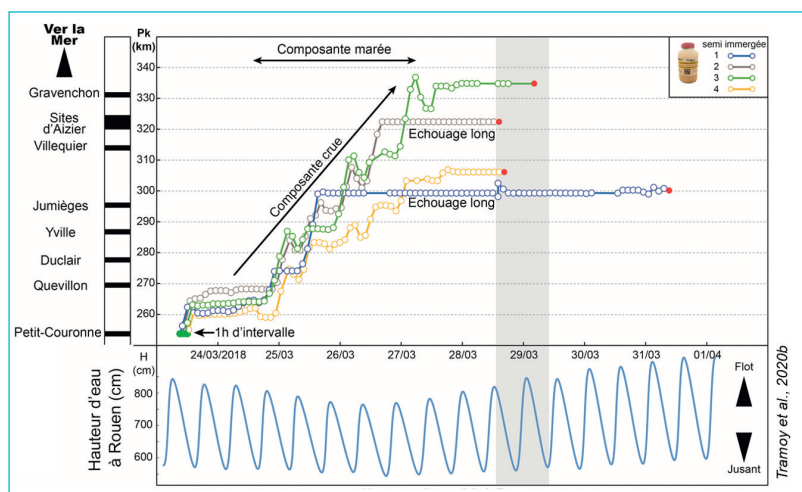


FIGURE 37 Trajectoires GPS de balises lâchées en conditions de crue (mars 2018).

D. UN TEMPS DE RÉSIDENCE LONG ET UNE ACCUMULATION DES DÉCHETS DANS L'ESTUAIRE

Pour approcher l'âge des déchets déposés sur les berges de l'estuaire de la Seine [Partie I.A], une attention particulière a été portée à deux déchets qui possèdent des éléments de datation, à savoir les Capri-Sun® (boisson fruitée dans un contenant en aluminium et plastique) et les Microlax® (laxatif dans un tube plastique). 418 Microlax® (dont 212 datés) et 69 Capri-Sun® (dont 56 datés) ont ainsi été ramassés dans l'estuaire, dont 70 % et 40 % sont respectivement considérés comme des déchets anciens (date limite de consommation plus ancienne que l'année du pré-

lèvement). Des déchets datant des années 1970-1980 ont même été retrouvés. Ces résultats montrent le piégeage des déchets plastiques et leur immobilisation durant des années, voire des décennies, dans l'estuaire et leur lent transfert vers la mer [Figure 38]. Par extension à l'ensemble des déchets (au moins aux déchets flottants), 40 % à 70 % des déchets échoués dans l'estuaire seraient des déchets anciens accumulés dans l'estuaire, ce qui pose la question du rôle de l'estuaire dans leur fragmentation avant qu'ils n'atteignent la mer [Tramoy et al. 2020a].

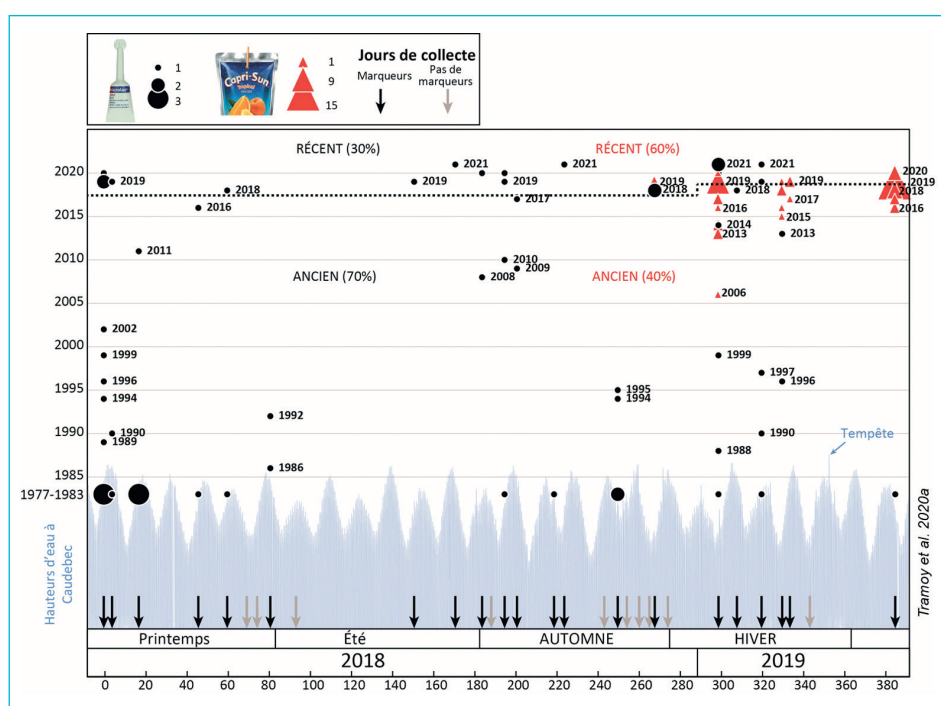


FIGURE 38 Datation des Microlax® et des Capri-Sun® collectés à Villequier entre mars 2018 et avril 2019.

E. DES RAMASSAGES EFFICACES

Des initiatives de ramassage manuel des déchets qui se déposent sur les berges de la Seine sont menées dans l'estuaire de la Seine et contribuent à en réduire la pollution plastique. A l'amont de Rouen, un nettoyage des berges de Seine et des îles est ainsi mené depuis 1996 par l'association d'insertion « Les brigades vertes de Belbeuf et du plateau Est ». Entre Rouen et Tancarville, une opération de nettoyage des berges de Seine (Seine que j'aime) a été menée entre 2001 et 2008, permettant la collecte de plusieurs milliers de tonnes de déchets. Cette opération a été reprise par le Département de la Seine-Maritime depuis 2008, permettant le nettoyage régulier d'une vingtaine de sites sur les berges de la Seine [Encart n°3 – Les ramassages manuels de macrodéchets sur les berges de l'estuaire de la

Seine]. À l'embouchure de la Seine, la Maison de l'Estuaire organise des ramassages réguliers sur les zones d'accumulation identifiées dans la Réserve Naturelle (dune, abords du pont de Normandie, banc herbeux, rive sud, pointe de Tancarville, dépôts sauvages). Ils sont menés après les vives-eaux automnales et hivernales et ont permis la collecte de 756 m³ de déchets entre 2011 et 2020. A cela viennent s'ajouter les collectes des usagers dont les volumes sont estimés entre 100 et 120 m³ annuel (dont 75 % d'origine fluviale ou marine), ainsi que les nombreuses interventions d'HAROPA Port du Havre sur les dépôts sauvages en périphérie de la Réserve Naturelle (10 à 15 m³/an estimé de dépôts sauvages via des apports routiers) [MDE, 2020]. Sur le littoral, Aquacaux assure un ramassage régulier des

ENCART N° 3

Les ramassages manuels de macrodéchets sur les berges de l'estuaire de la Seine

Depuis 2008, le Département de la Seine-Maritime est engagé dans une opération de ramassage de macrodéchets en bord de Seine dans le cadre de marchés publics de services d'insertion et de qualification professionnelles. Aujourd'hui réalisés en partenariat avec HAROPA Port de Rouen, l'Agence de l'Eau Seine Normandie et l'Europe (Fonds Social Européen) ces ramassages allient utilité environnementale et sociale.

L'entreprise d'insertion Naturaul'un, prestataire de cette mission, mobilise ainsi 12 personnes qui interviennent toute l'année sur une vingtaine de sites sur les berges de Seine, en aval de Rouen. Depuis plus de 10 ans, c'est une moyenne annuelle de 20 tonnes de déchets qui sont extraites du fleuve et des berges. Cela représente par exemple plus de 10 000 seringues et 13,5 tonnes de plastiques divers [Figure D ; Département 76, 2021]. Le suivi qualitatif et quantitatif de cette opération intéresse les gestionnaires des cours d'eau et des berges, mais aussi les scientifiques. Il permet d'alimenter les réflexions sur la gestion de la problématique de la pollution plastique et d'apporter de précieux éléments, notamment pour la mise en œuvre de la stratégie du gouvernement dans la lutte contre les déchets marins.



FIGURE D Déchets ramassés en bord de Seine par l'entreprise Naturaul'un.

macrodéchets échoués depuis 1999 sur 20 km de côte entre Sainte-Adresse et Saint-Jouin-Bruneval. En moyenne, ce sont ainsi 45 tonnes (~280 m³) de déchets qui sont collectées chaque année, principalement de la ferraille (33 %) et des plastiques (30 %).

Ces nettoyages réguliers sont complétés par des **chantiers participatifs**, à l'image **1)** de l'opération « Berges Saines » lancée en 2012 par l'association « La Seine en partage » qui permet la mobilisation de volontaires pour nettoyer les berges de leur commune et évacuer les déchets présents ; **2)** des opérations de ramassage de déchets le long de la Seine organisées par la Métropole Rouen Normandie dans le cadre de la signature de la charte « Fleuve sans plastique » ; **3)** des opérations de ramassage organisées par des usagers (chasseurs, agriculteurs) à l'embouchure de la Seine ; ou **4)** des « initiatives océanes » organisées par la fondation Surfrider pour nettoyer les plages du littoral.

Un **bilan des déchets ramassés a été mené à l'échelle du littoral et des estuaires normands**, en compilant les nombreuses actions menées par divers acteurs accompagnés financièrement par l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Le littoral seino-marin apparaît comme celui où le plus de déchets sont ramassés, avec 429 m³ collectés par an sur 64 km de littoral (soit 6,7 m³/km, contre 1,5 m³/km pour la Manche et 1 m³/km pour le Calvados) [Figure 39 ; Rommel, 2019].

La **captation des déchets transitant en Seine** permet également d'en réduire le flux et de limiter la pollution plas-

tique de l'estuaire. Le SIAAP a ainsi mis en place un réseau composé de 26 barrages flottants disposés sur 77 km de linéaire de Seine et de la Marne, en amont et en aval de Paris. Il permet de prévenir la dissémination des déchets relâchés dans la Seine par les déversoirs d'orage, lors des épisodes pluvieux intenses. Les déchets flottants capturés sont en moyenne composés de 1,4 % de plastiques, ce qui représente un flux capturé de 27 t/an de plastique sur la période 2008-2013 (données issues d'actions de recherche portées par le LEESU et le SIAAP, menées dans le cadre de la programmation innEAUvation). Les déchets transitant en Seine sont également captés au niveau des barrages et des écluses présents sur le cours d'eau. Au niveau des centrales hydroélectriques de Port-Mort et de Poses, des dégrilleurs sont ainsi positionnés en entrée des centrales pour protéger les turbines des déchets apportés par la Seine. Ces déchets, majoritairement végétaux, sont alors ramassés et mis dans des bennes. Ce ramassage représente entre 100 et 200 bennes de 20 m³ par an (Port-Mort + Poses), soit entre 5 et 50 t/an de plastiques [Figure 40]. Enfin, il faut citer l'initiative d'HAROPA Port – Direction territoriale de Rouen qui a fait l'acquisition, fin 2020, d'un bateau nettoyeur baptisé « Le Pléco ». Cet outil permettra de collecter, en fonction des besoins, les déchets flottants recueillis sur la zone portuaire amont (darses et bords de quais par exemple) et au niveau du port de plaisance de Rouen (bassin Saint Gervais). Les déchets collectés seront triés et valorisés suivant la réglementation en vigueur avec le partenariat de la Métro-

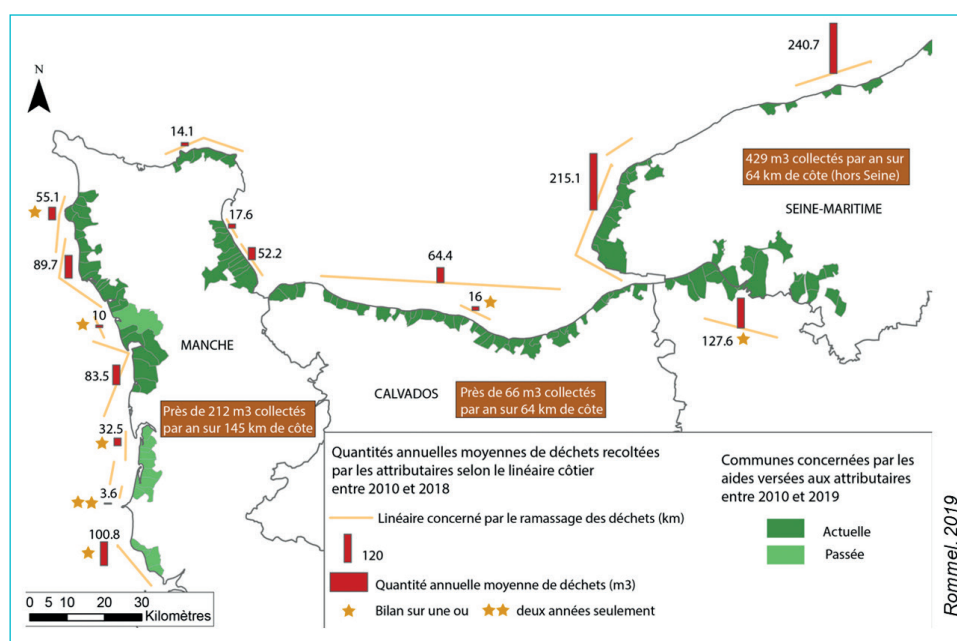


FIGURE 39 Bilan quantitatif des déchets ramassés sur le littoral normand et les berges de la Seine.

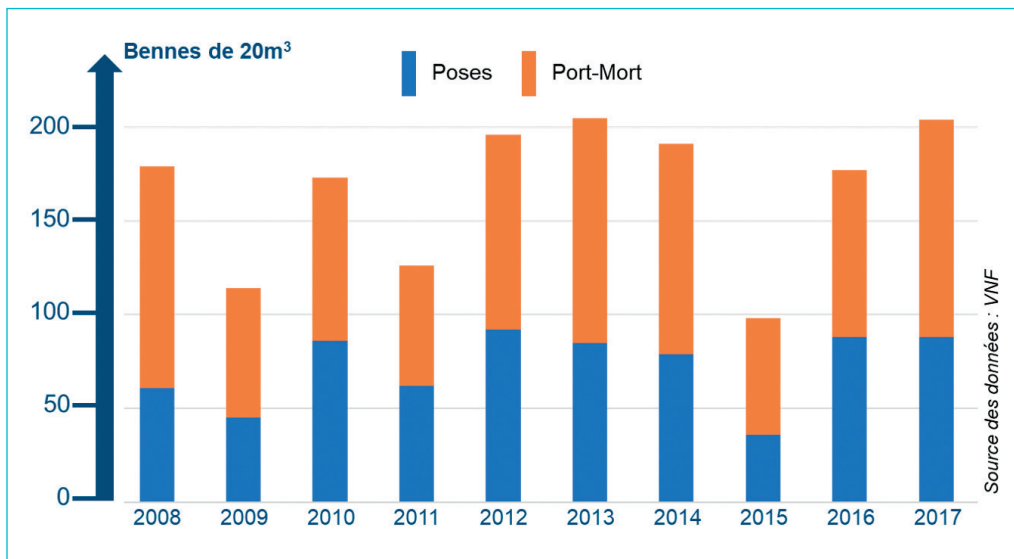


FIGURE 40 Benches de déchets remplies au niveau des centrales hydroélectriques de Port-Mort et de Poses.

pole de Rouen. La mise en fonctionnement effectif de ce bateau nettoyeur est projetée courant 2021.

Un bilan des opérations de ramassage des déchets transitant en Seine ou déposés sur les berges de l'estuaire pour lesquelles des données quantifiées sont disponibles, a permis d'estimer qu'entre 70 et 130 tonnes de plastiques sont retirées annuellement de la Seine, de Paris à la mer [Figure 41 ; Tramoy et al. 2019].

Afin de limiter la pollution des milieux aquatiques, la réduction

des apports plastiques est une mesure indispensable qui nécessite la mise en place d'une gestion spécifique. C'est par exemple le cas avec l'expérimentation menée par la Métropole Rouen Normandie et la ville de Malaunay qui consiste en l'installation de filets anti-déchets sur trois exutoires du réseau d'assainissement se déversant dans le Cailly (affluent de la Seine à Rouen) et réduire ainsi le flux apporté à la Seine [Encart n°4 – Mise en place de filets pour capter les déchets plastiques en sortie du réseau d'assainissement].

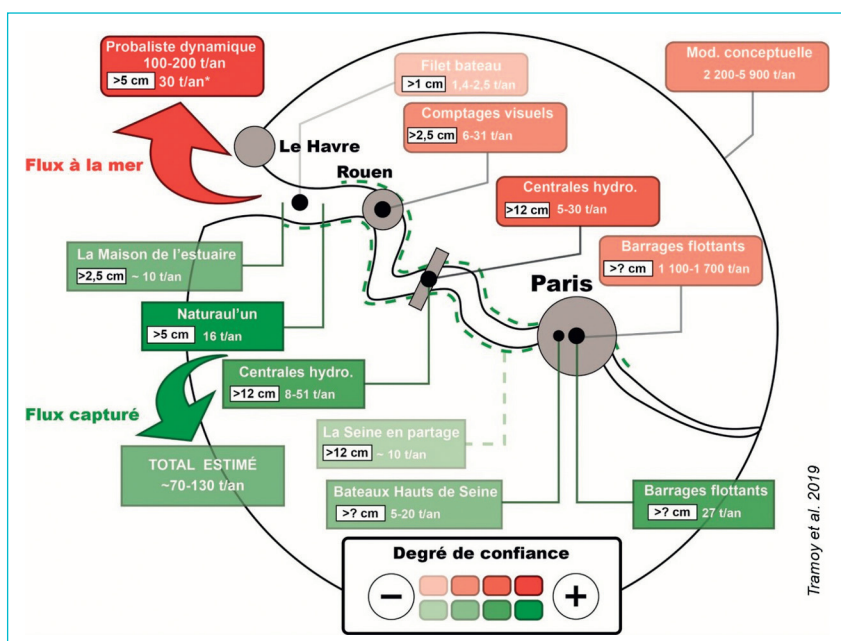


FIGURE 41 Estimation du flux de macroplastiques à la mer et du flux capturé par les opérations de ramassage en Seine.



ENCART N° 4

Mise en place de filets pour capter les déchets plastiques en sortie du réseau d'assainissement

Pour limiter les apports en déchets urbains vers la Seine, la Métropole Rouen Normandie conduit une expérimentation originale en partenariat avec la commune de Malaunay afin de capter les déchets issus de plusieurs exutoires du réseau d'eau pluviale qui se déversent vers le Cailly (affluent de la Seine à Rouen). Trois filets collecteurs de déchets de maille de 1,2 mm ont ainsi été mis en place en novembre 2020 à Malaunay [Figure E]. Dans cette même dynamique, deux autres filets d'étude ont été installés en avril 2021 à Maromme et à Déville-lès-Rouen afin de recueillir des déchets qui seront passés à travers les siphons placés en amont. Afin d'étendre cette expérimentation et son efficacité la Métropole Rouen Normandie souhaite renforcer cette action en collaborant avec les entreprises du territoire en leur proposant de mécéner ce dispositif directement en Seine (Contact Mécénat : Juliette.DEMARES@metropole-rouen-normandie.fr).

Pour caractériser la typologie des déchets captés et leurs flux, les récoltes sont analysées dans le cadre du projet PLASTOC, grâce à une étroite collaboration entre la Métropole Rouen Normandie et le LEESU [Tramoy *et al.*, en cours]. Après 7 mois d'expérimentation, les trois filets mis en place sur les exutoires se déversant dans le Cailly ont permis, outre des déchets végétaux, la collecte d'un grand nombre de déchets plastiques (plusieurs centaines). Ces déchets sont largement liés au tabac, ou correspondent à des emballages alimentaires (bonbons, confiseries, chips...). Pour le filet connecté sur un déversoir d'orage, un nombre important de lingettes a été observé. Les résultats permettront également de quantifier un flux par habitant pour le comparer aux flux mesurés en Seine.

L'objectif de cette expérimentation originale est de faire un bilan des fuites de déchets plastiques dans l'environnement en adoptant une approche systémique. Elle permet également d'identifier les sources de pollution pour une prévention plus efficace et un ciblage des actions à mettre en place par la collectivité. À terme, ces diverses techniques constitueront autant de solutions pour limiter les apports plastiques vers la Seine et protéger l'ensemble de l'estuaire jusqu'au littoral.



Métropole Rouen Normandie

FIGURE E Filet collecteurs de déchets posé sur un exutoire du réseau d'assainissement.

F. UN FLUX RÉSIDUEL À LA MER

Malgré les ramassages des plastiques transitant en Seine ou déposés sur les berges et leur accumulation sur différents sites, une part de la pollution plastique de la Seine finit par rejoindre la mer. La confrontation de différentes méthodes a permis de proposer un flux de macroplastiques à la mer estimé entre 100 et 200 t/an (dont 30 t de déchets plastiques très grossiers >5 cm) [Figure 41]. Ce chiffre s'appuie à la fois sur 1) des méthodes indirectes basées sur des statistiques ou des probabilités de collecte ; et 2) des méthodes directes à partir des données de ramassage, de comptage, ou des prélèvements in situ [Figure 42 ; Tramoy *et al.* 2019]. A une échelle temporelle plus fine, le flux de

plastique reste très variable, car soumis en premier lieu aux apports qui évoluent fortement dans le temps et l'espace. En effet, les pollutions événementielles (événements culturels extérieurs en été par exemple), les consommations nomades accentuées à la belle saison, les crues, les tempêtes ou les événements pluvieux importants sont autant de facteurs qui vont jouer sur l'apport de macroplastiques dans le milieu aquatique.

Les flux en microplastiques à la mer n'ont pas été évalués, du fait d'une incertitude trop importante des données disponibles et de la dynamique estuarienne complexe.

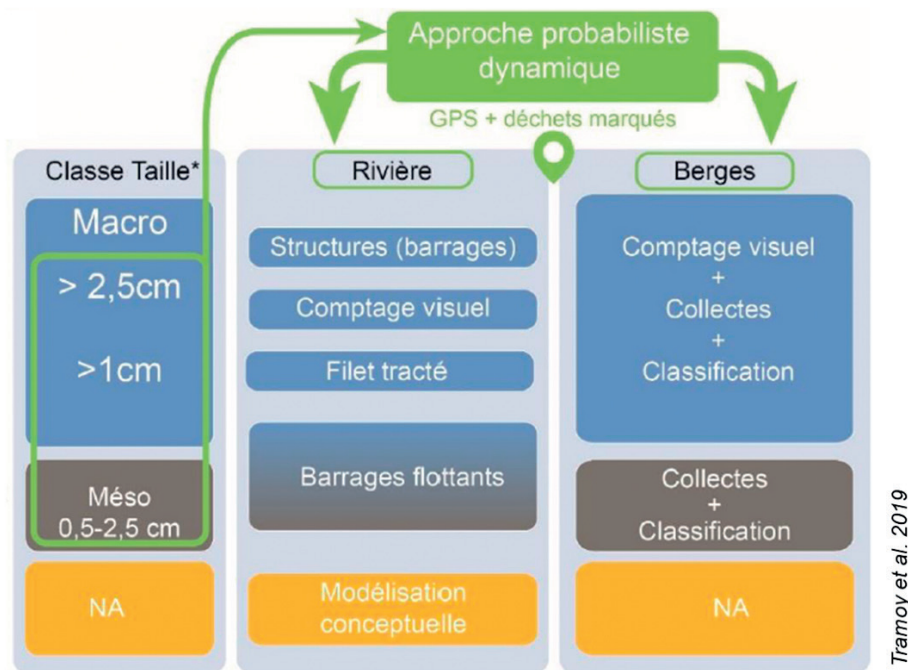


FIGURE 42 Méthodes mobilisées pour estimer les flux de plastiques en Seine.

III LES IMPACTS DE LA POLLUTION PLASTIQUE SUR LES ORGANISMES AQUATIQUES



La pollution plastique des milieux aquatiques a de nombreux impacts environnementaux, spécifiques à une gamme de taille des plastiques considérés. Les effets peuvent être directs et visibles, à l'image d'une surmortalité des mammifères marins ou des oiseaux par étouffement, strangulation ou ingestion de macroplastiques. Des effets liés à l'ingestion de microplastiques par les organismes aquatiques et à l'exposition aux contaminants chimiques associés, sont également rapportés. Ces effets sont sources d'inquiétudes pour l'état de santé des organismes et posent question sur un impact possible au niveau populationnel.

Ce troisième chapitre propose un bilan des connaissances sur les effets de la pollution plastique sur la faune aquatique de l'estuaire de Seine.

A. IMPACTS PHYSIQUES

Au-delà des nuisances visuelles associées à la présence de plastiques flottants sur la Seine, déposés sur les berges ou s'accumulant dans des zones spécifiques, la pollution plastique peut avoir des **impacts physiques sur les organismes aquatiques vivant en estuaire de Seine**. Ces impacts physiques concernent particulièrement les macroplastiques qui peuvent modifier ou recouvrir des habitats de diverses espèces, notamment benthiques. Les espèces pélagiques ou démersales, les oiseaux et les mammifères marins sont également touchés, avec des possibilités de piégeage, d'étranglement

ou d'enchevêtrement dans divers objets plastiques (filets, bouteilles...) qui entraînent des blessures ou des étouffements pouvant aller jusqu'à la mort des individus. L'ingestion de plastiques par accident ou par confusion de proie peut causer des dommages physiques au tube digestif en créant des lésions et abrasions des tissus, en bloquant mécaniquement le passage du bol alimentaire ou en générant une fausse sensation de satiété et un dysfonctionnement de la digestion [Figure 43]. De tels effets sont renseignés dans la bibliographie, mais n'ont pas été spécifiquement suivis et documentés en estuaire de Seine.



Van Franeker

FIGURE 43 Granulés plastiques industriels et fragments de plastiques retrouvés dans l'estomac d'un fulmar boréal du littoral normand.

B. CAPACITÉ D'INGESTION ET D'ÉGESTION DES MICROPLASTIQUES

La capacité à ingérer et à éliminer des microplastiques a été évaluée chez trois espèces (le ver *Hediste diversicolor*, le copépode *Eurytemora affinis* et la sole commune *solea solea*), via une exposition en laboratoire [Gasperi & Cachot, 2021].

Afin d'évaluer la **capacité d'ingestion des microplastiques des annélides polychètes** (*Hediste diversicolor*), ils ont été exposés en laboratoire à de l'eau et à du sédiment enrichis en microbilles de polyéthylène fluorescentes. La présence de ces microbilles dans le tube digestif des vers a alors été suivie par fluorescence [Figure 44]. Après une heure d'exposition à l'eau enrichie en microbilles, ces dernières sont

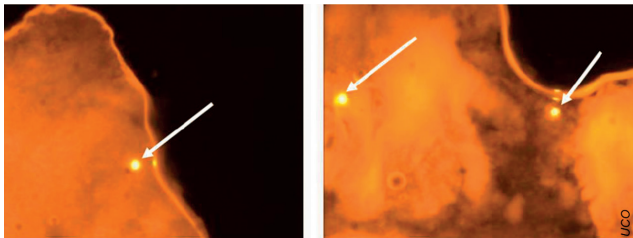


FIGURE 44 Observation de microbilles dans le tube digestif du ver *Hediste diversicolor*.

visibles dans le tube digestif de tous les vers, indiquant une ingestion rapide. Les vers sont alors remis dans une eau exempte de microbilles (période de dépuración) et une diminution progressive du nombre de microbilles dans le tube digestif a été observée jusqu'à 60 minutes où aucun des vers ne présentait plus de 15 microbilles. Après 120 minutes de dépuración, les vers ont à nouveau ingéré les microbilles, indiquant une capacité à ingérer, éliminer puis réingérer les microbilles [Figure 45]. La même expérience réalisée avec une exposition à du sédiment enrichi en microbilles montre une dynamique identique (ingestion rapide des microbilles, puis diminution lors de la période de dépuración et une réingestion à partir de 60 minutes), bien que le niveau d'ingestion soit plus faible. Une partie des microplastiques semble persister plus longtemps dans le tractus digestif. A noter qu'aucun effet neurotoxique (mesure de l'ACHé) ou sur le comportement d'enfouissement des vers n'a été noté après une exposition de 96 h aux microbilles de polyéthylène via le sédiment.

La **capacité d'ingestion des microplastiques par le copépode *Eurytemora affinis*** a été évaluée par l'exposition de ces derniers à une eau enrichie par un mélange de microplas-

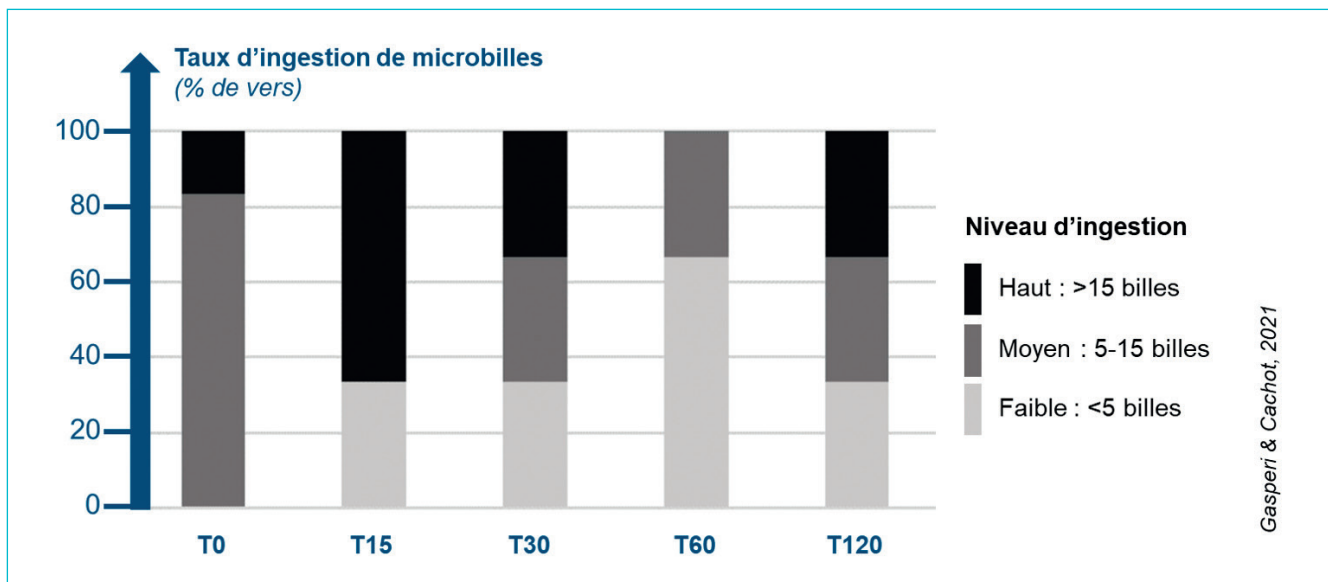


FIGURE 45 Proportion de microbilles de polyéthylène observées dans le tube digestif des vers *H. diversicolor* après une heure d'exposition (T0) et une période de dépuración.

tiques de taille inférieure à 5 µm [Encart n°5 – Réalisation d'un mélange de microplastiques représentatif de l'estuaire de la Seine]. Les différents polymères (polyéthylène, polystyrène, polypropylène) sont observés par fluorescence dans le tube digestif des copépodes adultes (20 % des individus), indiquant la possibilité d'ingestion des microplastiques par ces organismes [Figure 46]. Des microplastiques ont également été observés dans les fèces, indiquant la capacité d'égestion de l'espèce.

La capacité d'ingestion et d'égestion des microplastiques a enfin été étudiée chez le poisson plat *Solea solea*, à différents stades de vie. L'ingestion de microplastiques est très rapide (moins de deux heures), quels que soient le stade de vie des organismes et la nature du polymère considéré. L'élimination via le système digestif est réalisée en moins de 30 heures, sauf pour les particules de polychlorure de vinyle de plus grandes tailles [Figure 47]. Après la métamorphose, l'élimination des microplastiques semble plus rapide.

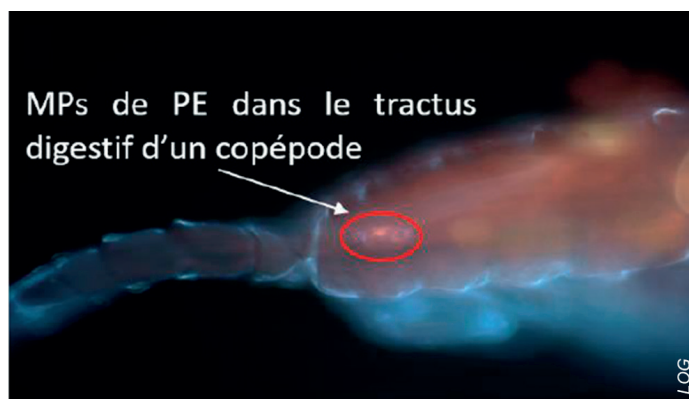


FIGURE 46 Microplastiques ingérés par *Eurytemora affinis*.

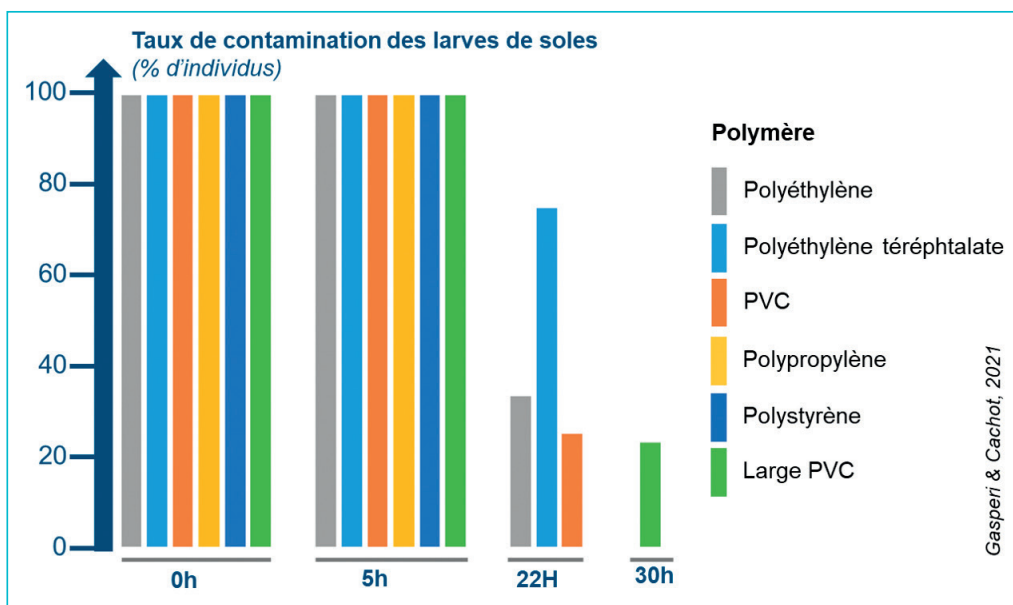


FIGURE 47 Cinétique d'élimination de microplastiques par des larves de soles.

ENCART N° 5

Réalisation d'un mélange de microplastiques représentatif de l'estuaire de la Seine

Compte tenu de la difficulté de collecter dans l'environnement des microplastiques en quantité suffisante pour les expérimentations en laboratoire, des mélanges de microplastiques ont été produits à partir de macroplastiques collectés en estuaire de Seine. Ces derniers sont majoritairement composés de polyéthylène (62 %) et de polypropylène (28 %), trois autres polymères étant présents à moins de 5 % (polyéthylène téréphtalate, polystyrène, polychlorure de vinyle). Ils ont été séparés par type de polymère, cryobroyés, puis tamisés à 100 µm. La taille médiane des microplastiques ainsi obtenus est comprise entre 51 et 77 µm. A partir de ces microplastiques, deux mélanges environnementaux « eau de surface » et « sédiments », représentatifs de la composition moyenne des polymères plastiques retrouvés dans ces deux compartiments, ont été élaborés [Tableau III].

TABLEAU III Composition des deux mélanges environnementaux en microplastiques.

Mélange de microplastiques	Composition	HAP (16 composés)	Alkylphénols (8 composés)	Phtalates (15 composés)
1- Eaux de surface	PE : 65% PP : 25% PS : 10%	3,51 µg/g	9,88 µg/g	236,6 µg/g
2- Sédiment	PE : 40% PP : 40% PET : 10% PVC : 10%	6,92 µg/g	2,99 µg/g	211,36 µg/g

La contamination métallique (cuivre, plomb, zinc, cadmium, chrome) a été déterminée pour chaque polymère. Elle est relativement variable selon les polymères, avec notamment une présence notable de plomb dans le PVC, de zinc et de cadmium dans le polypropylène. L'imprégnation chimique en HAP, alkylphénols et phtalates a été déterminée pour chaque mélange [Tableau III]. Le profil de contamination en HAP est similaire entre les deux mélanges, celui « sédiment » étant cependant deux fois plus concentré que celui « eau » (respectivement 6,9 et 3,5 µg/g en HAP totaux). Les phtalates et les alkylphénols sont des additifs ajoutés à certains plastiques au moment de leur fabrication pour en modifier leurs propriétés physico-chimiques. Leurs concentrations dépendent du polymère, de l'utilisation du plastique, de son vieillissement, etc. La concentration en phtalates est élevée pour les deux mélanges (>200 µg/g) et le dibutylphtalate est le composé très largement majoritaire. Pour les alkylphénols, la concentration varie de 3 à 10 µg/g selon le mélange de polymères considéré et le 4-nonylphénol est le composé très largement majoritaire.

C. IMPACTS CHIMIQUES

Associée aux substances chimiques constitutives des plastiques (additifs), aux produits d'oxydation des polymères et aux contaminants hydrophobes présents dans le milieu et s'adsorbant sur les plastiques, une toxicité chimique des plastiques commence à être documentée dans la littérature scientifique. Des altérations du métabolisme (réserves énergétiques, stress oxydant, dommages aux membranes, défenses immunitaires, croissance, reproduction) et des changements de comportement (activité de prédation, exploration) sont les principaux effets documentés. Des expérimentations ont été menées en laboratoire sur le ver *Hediste diversicolor*, le copépode *Eurytemora affinis* et la sole commune *Solea solea* pour rechercher des effets potentiels liés à une exposition à des microplastiques représentatifs de la contamination en estuaire de Seine [Gasperi & Cachot, 2021].

Afin de déterminer les **effets potentiels des microplastiques sur les vers**, des annélides polychètes (*Hediste diversicolor*) ont été exposés via l'eau et le sédiment à un mélange de microplastiques composé de polyéthylène et de polypropylène à parts égales (microplastiques produits à partir de plastiques commerciaux). Après 96 h (pour l'eau) et 10 jours (pour le sédiment), plusieurs marqueurs ont été suivis : 1) l'accumulation de microplastiques dans les tissus et les sédiments excrétés ; 2) la viabilité cellulaire et la phagocytose ; 3) l'activité de deux enzymes liées au système immunitaire (la phosphatase acide et la phénoloxydase). Même s'ils sont très variables selon les individus, les résultats confirment la capacité des vers à ingérer les microplastiques et à les éliminer après une période de dépuración. Ils indiquent également la présence notable de particules piégées à la surface du corps du ver, notamment dans le mucus qui est davantage sécrété en cas de stress [Figure 48]. Les marqueurs d'effets immunitaires montrent une baisse de la viabilité des coelomocytes* des vers exposés aux mélanges de microplastiques, ainsi qu'une augmentation de l'activité phagocytaire et une diminution des activités enzymatiques, mais non significatives [Figure 49].

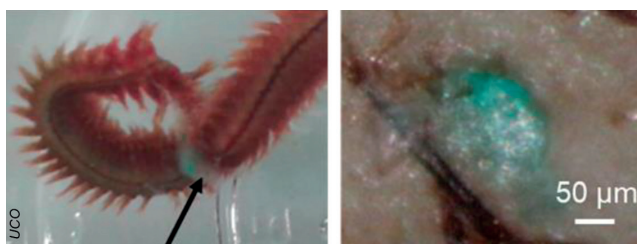


FIGURE 48 Microplastique dans le mucus du ver *H. diversicolor*.

Pour évaluer les **effets potentiels des microplastiques sur le copépode *Eurytemora affinis***, ce dernier a été exposé à une eau enrichie par un mélange de microplastiques [Encart n°5 – Réalisation d'un mélange de microplastiques représentatif de l'estuaire de la Seine] tout au long de son cycle de vie, et ce durant trois générations. Les résultats indiquent une mortalité accrue dans les populations exposées

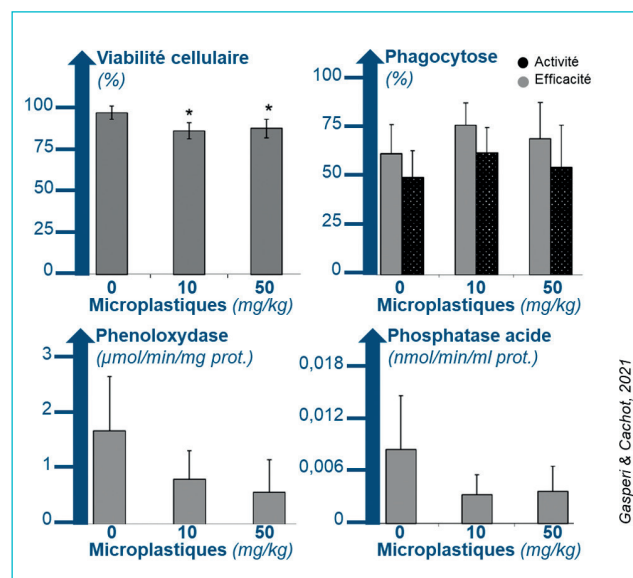


FIGURE 49 Marqueurs d'effets immunitaires chez des vers exposés 10 jours à un mélange de microplastiques (PE et PP).

aux microplastiques, à partir de la deuxième génération. Sur la troisième génération, des retards de développement sont également observés, avec une modification de la structure de la population (plus d'individus au stade juvénile) pour la concentration la plus élevée en microplastiques. Le sexratio est également modifié par l'exposition aux microplastiques (diminution du pourcentage de mâles), alors qu'il est en faveur des mâles pour la population présente en estuaire de Seine. Enfin, il a été constaté que la fécondité des femelles ovigères diminue à la première génération, pouvant indiquer une allocation moindre en énergie vers la reproduction pour lutter contre le stress induit par la présence de microplastiques, même en quantité très faible. A la deuxième et troisième génération, la fécondité remonte pour les femelles exposées aux microplastiques, témoignant d'un effet densité-dépendant connu chez cette espèce, une forte mortalité engendrant un faible nombre de descendants et stimulant la fécondité individuelle [Figure 50].

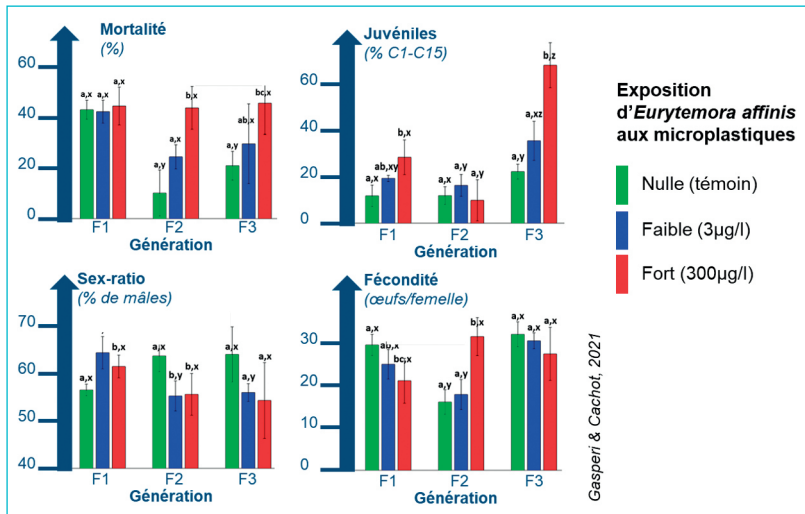


FIGURE 50 Effets d'une exposition à des microplastiques sur une population du copépode *Eurytemora affinis*.

Les effets potentiels des microplastiques sur le poisson plat *Solea solea* ont été étudiés en nourrissant des juvéniles de soles pendant 20 jours par des vers *Hediste diversicolor* exposés à du sédiment enrichi par un mélange de microplastiques environnementaux [Encart n°5 – Réalisation d'un mélange de microplastiques représentatif de l'estuaire de la Seine] et d'origine industrielle (PVC), avec ou sans contamination à deux polluants modèles que sont le benzo(a)pyrène et l'oxybenzone. Les principaux marqueurs d'état de santé comme la survie, la croissance, le métabolisme énergétique (concentrations en glycogène et en lipides) et des mesures d'effets écotoxiques (TBARS, test des comètes, EROD) ne montrent pas de modifications significatives chez les soles nourries par des vers exposés aux microplastiques par rapport aux soles témoins. En revanche, une modification de la couleur de la peau (peau plus claire) et du comportement de camouflage des soles ayant été

nourries par des vers exposés aux microplastiques a été observée, témoignant d'un stress physiologique [Figure 51]. Une seconde expérimentation d'exposition des soles via la chaîne alimentaire a été menée sur des larves de soles nourries pendant 1 mois par des copépodes (*Acartia tonsa*) ou des artémias (*Artemia salina*) exposés à des microplastiques industriels (PVC), avec ou sans contamination à deux polluants modèles que sont le benzo(a)pyrène (BaP) et l'oxybenzone. Un ralentissement du développement des larves de sole exposées aux microplastiques enrichis au BaP a été observé, ainsi qu'une baisse de la capacité de nage. Ces différents résultats sur la sole ne montrent pas d'effets aigus suite à une exposition trophique aux microplastiques. Des effets sublétaux ont cependant été mis en évidence sur les réponses comportementales (choix de couleur de fond, activité locomotrice) des organismes nourris par des proies exposées à des microplastiques.

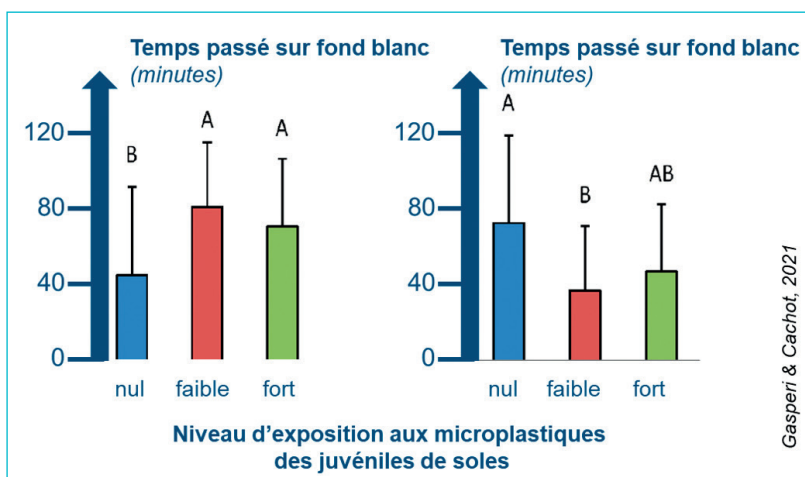


FIGURE 51 Temps passé par les juvéniles de soles sur fond noir ou fond blanc après avoir été nourries avec des vers exposés à un sédiment enrichi en microplastiques.

CONCLUSION

Les récents travaux scientifiques menés sur l'estuaire de la Seine ont permis **1)** de réaliser un premier état des lieux de la pollution plastique (du macroplastique au microplastique) dans les principaux compartiments environnementaux ; **2)** de déterminer les principaux facteurs guidant sa dynamique ; **3)** d'aborder les impacts sur la faune aquatique. L'omniprésence des plastiques a ainsi été documentée, que ce soit **1)** pour les macroplastiques qui transitent par la Seine, qui s'accumulent sur de nombreux sites sur les berges et qui sont présents sur les fonds subtidiaux de l'estuaire et de l'embouchure ; et **2)** pour les microplastiques qui sont retrouvés dans la colonne d'eau, dans les sédiments et dans toutes les espèces aquatiques investiguées (ver, moule, crevette, poissons) [Tableau IV]. Bien que très variable à tous les points de vue (spatial, temporel, nature, couleur, taille...), **la contamination plastique de l'estuaire de la Seine ressort comme modérée à forte par rapport à des milieux comparables**. Le débit de la Seine semble guider une partie des apports en plastiques qui sont plus importants en période de fort débit. Ce transit de l'amont vers l'aval du bassin versant se complexifie une fois dans l'estuaire, avec

des trajectoires plus aléatoires et bidirectionnelles liées à la marée. Cette double influence débit/marée et la variation des niveaux d'eau qu'elle engendre, détermine des séquences d'échouage et de remobilisation des déchets plastiques sur les berges, en lien également avec leur morphologie et leur typologie. **La dynamique estuarienne est ainsi favorable à la constitution de zones d'accumulation de déchets**, avec une persistance dans l'estuaire durant des années, voire des décennies et un lent transfert vers la mer. Les temps de résidences long des déchets plastiques dans l'estuaire est favorable à leur vieillissement et *in fine* à leur fragmentation, source de microplastiques secondaires et d'additifs dans l'estuaire. Les impacts d'une exposition de la faune aquatique aux microplastiques montrent une capacité d'ingestion et d'élimination des organismes (chez le ver *Hediste diversicolor*, le copépode *Eurytemora affinis* et la sole commune *Solea solea*), alors exposés via l'alimentation aux composés chimiques constitutifs des plastiques et adsorbés à leur surface. Aucun effet direct ou aigu lié à cette contamination en microplastiques n'a cependant été mis en évidence, mais des effets à moyen/

TABLEAU IV Chiffres clefs de la pollution plastique en estuaire de Seine.

ESTUAIRE DE LA SEINE	Macroplastiques	Microplastiques*
Berges	58 zones d'accumulation	/
Colonne d'eau	0,16 mg/m ³	< 45 particules/m ³
Sédiments / fonds marins	> 10 kg/km ² (embouchure)	300 à 3 000 particules/kg
Mollusques (moule bleue)	/	1,2 fibres/g de chair
Poissons (sole)	/	3 à 7 fibres/individu (<i>tractus digestif</i>)
Flux à la mer	100 à 200 t/an	Non évalués
Ramassages (Seine)	70 à 130 t/an	/

* Sans identification de la nature (synthétique ou naturelle) des microplastiques dénombrés, les chiffres indiqués concernent des microplastiques présumés.

long terme sur le comportement (chez la sole) et la structure de la population (chez le copépode *Eurytemora affinis*) ont été mis en évidence en laboratoire. Dans l'estuaire de la Seine, **la pollution plastique contribue au cocktail de contaminants chimiques auxquels sont exposés les organismes aquatiques et participe certainement à la dégradation de leur état de santé.**

Ces résultats, issus des travaux scientifiques menés ces dernières années, confirment la pollution plastique de l'estuaire de Seine et ouvrent de nouveaux questionnements et besoins de connaissances complémentaires. A ce titre, **un suivi spécifique des microplastiques tout au long de l'estuaire de la Seine** permettrait de mieux appréhender leur variabilité spatio-temporelle, d'identifier les sources et de quantifier les apports lors d'évènements particuliers (crue, orage). Cette connaissance pourrait être mobilisée pour le dimensionnement des opérations de ramassage des déchets et de réduction à la source, dans un objectif d'amélioration de la qualité des milieux estuariens et de limitation des flux de plastique vers la mer. **Une étude spécifique aux zones d'accumulation** semble quant-à-elle

nécessaire pour mieux comprendre les dynamiques de dépôt/remobilisation des macrodéchets plastiques sur les berges, leur devenir (fragmentation, vieillissement et remobilisation) et l'écotoxicité associée. Ces éléments pourraient être utiles aux aménageurs et gestionnaires de l'estuaire, notamment pour la définition des mesures de restauration écologique qui doivent considérer cette problématique. En effet, la renaturation de berges peut conduire à la création de nouveaux sites propices aux dépôts de déchets, pouvant aller à l'encontre des objectifs de restauration écologique de l'estuaire. A contrario, il peut également être envisagé de créer des zones d'accumulation préférentielles des déchets plastiques au niveau des berges (« pièges à déchets »), afin de faciliter et favoriser leur ramassage. Ces acquisitions de données et de connaissance permettront d'orienter au mieux les actions de gestion visant à réduire la pollution plastique de l'estuaire de la Seine, et participeront ainsi à la restauration de son fonctionnement environnemental.

ABRÉVIATIONS

ACHé : Acétylcholinestérase

AESN : Agence de l'Eau Seine-Normandie

CPIER : Contrat de Plan Interrégional Etat-Régions

EROD : 7-ethoxy-resorufin-O-deethylase

GIP : Groupement d'Intérêt Public

GPS : Global Positioning System

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

LEESU : Laboratoire Eau Environnement et Systèmes Urbains

MDE : Maison De l'Estuaire

OSPAR : Convention Oslo-Paris

PA : Polyamide

PBAN : Polybutadiène acrylonitrile

PE : Polyéthylène

PET : Polyéthylène téréphtalate

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PVC : Polychlorure de vinyle

SIAAP : Syndicat Interdépartemental pour l'Assainissement de l'Agglomération Parisienne

TBARS : Thiobarbituric Acid Reactive Substances

GLOSSAIRE

Coelomocyte : cellule du système immunitaire présente chez les vers.

Dépuration : étape préalable à une expérimentation qui permet de purger le système digestif des organismes.

Fibre plastique : particule de plastique, provenant des textiles synthétiques.

Fragment plastique : morceau de plastique de taille irrégulière, provenant de la fragmentation de macroplastiques.

Microbille plastique : particule sphérique millimétrique, provenant selon toute probabilité des usines de plasturgie présentes ou anciennes sur la zone de l'estuaire de la Seine.

Microplastique primaire : des poudres jusqu'aux granulés, les microplastiques primaires sont la matière première utilisée pour thermoformer les objets en plastiques ou pour être introduite telle quelle dans des préparations manufacturées.

Microplastique secondaire : microplastique provenant de la dégradation d'un produit plastique par l'utilisation de ce dernier. Il peut être produit dans l'environnement, par photodégradation et/ou contraintes mécaniques.

Microscopie : méthode de détection visuelle des plastiques (taille, forme, couleur) à l'aide d'un microscope ou d'une loupe binoculaire.

Particule plastique : dans le contexte des études présentées, les particules plastiques regroupent les fragments*, les fibres* et les microbilles*. Sans identification de leur nature (synthétique ou naturelle), les particules sont considérées comme des microplastiques présumés.

Spectroscopie : méthode de détection de la nature des plastiques, à l'aide d'une mesure de la réponse vibratoire des échantillons soumis à un rayonnement de photons et comparaison à des banques de signatures types (méthode Raman ou infrarouge).

BIBLIOGRAPHIE

- Cellule de Suivi du Littoral Normand (CSLN), 2020. **DCE : Suivi de l'ichtyofaune dans les masses d'eau de transition – campagne d'automne 2020**. Rapport de campagne réalisé pour l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, 79p.
- Département de Seine Maritime, 2021. **La Seine et ses déchets**. Plaquette, 5p.
- Dris, R., Gasperi, J., Bounoua, B., Rocher, V., Tassin, B., 2017. **Microplastics in Different Compartments of the Urban Water Cycle: From the Sources to the Rivers**, in: Fate and Impact of Microplastics in Marine Ecosystems. Elsevier, pp. 7–8.
- Fan, Y., Zheng, K., Zhu, Z., Chen, G., Peng, X., 2019. **Distribution, sedimentary record, and persistence of microplastics in the Pearl River catchment, China**. Environmental Pollution 251, 862–870.
- Gasperi J. & Cachot J. (coordinateurs), 2021. **Projet Plastic-Seine : Flux et impacts des microplastiques dans l'estuaire de la Seine**. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6, 118 p.
- Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., 2017. **Production, use, and fate of all plastics ever made**. Science Advances 3.
- International Resource Panel (IRP), 2021. **Policy options to eliminate additional marine plastic litter by 2050 under the G20 Osaka Blue Ocean Vision**. Report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya.
- Kazour, M., Jemaa, S., El Rakwe, M., Duflos, G., Hermabassiere, L., Dehaut, A., Le Bihanic, F., Cachot, J., Cornille, V., Rabhi, K., Khalaf, G., Amara, R., 2018. **Juvenile fish caging as a tool for assessing microplastics contamination in estuarine fish nursery grounds**. Environmental Science and Pollution Research 27, 3548–3559
- Kazour M. & Amara R., 2020. **Is blue mussel caging an efficient method for monitoring environmental microplastics pollution ?** Science of Total Environment 710
- Kazour M., Terki S., Rabhi K., Jemaa S., Khalaf G., Amara R., 2019. **Sources of microplastics pollution in the marine environment: Importance of wastewater treatment plant and coastal landfill**. Marine Pollution Bulletin 146, 608–618
- Lerond M., 1997. **Définition des conditions de mise en œuvre du nettoyage de la Seine**. Etude réalisée pour le Parc Naturel Régional des Boucles de la Seine Normande. 80p. et annexes
- Liro M, van Emmerik T., Wyzga B., Liro J., 2020. **Macroplastic storage and remobilization in rivers**. Water 12(7).
- Maison de l'estuaire (MDE), 2020. **Gestion des déchets 2019-2020**.
- Meijer L., van Emmerik T., van der Ent R., Schmidt C., Lebreton L., 2021. **More than 1000 rivers account for 80% of global riverine plastic emissions into the ocean**. Science Advances 7(18).
- OSPAR, 2018. **Monitoring of plastic particles in stomachs of fulmars in the North Sea area**. [en ligne] <https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/committee-assessments/eiha-thematic-assessments/marine-litter/plastic-particles-in-fulmar-stomachs-north-sea/>
- Phuong, N.N., Poirier, L., Lagarde, F., Kamari, A., Zalouk-Vergnoux, A., 2018. **Microplastic abundance and characteristics in French Atlantic coastal sediments using a new extraction method**. Environmental Pollution 243, 228–237.
- Rommel M., 2019. **Bilan des ramassages de macrodéchets sur les plages normandes / approche critique et propositions pour une gestion équilibrée et homogène à l'échelle du bassin Seine-Normandie**. Mémoire de stage de Master II, Université de La Rochelle, 122p.
- Simon-Sánchez, L., Grelaud, M., Garcia-Orellana, J., Ziveri, P., 2019. **River Deltas as hotspots of microplastic accumulation: The case study of the Ebro River (NW Mediterranean)**. Science of The Total Environment 687, 1186–1196.
- SOS Mal de Seine. [en ligne] <http://maldeseine.free.fr/>
- Tramoy, R., Gasperi, J., Colasse, L., Tassin, B., 2020a. **Transfer dynamic of macroplastics in estuaries — New insights from the Seine estuary: Part 1. Long term dynamic based on date-prints on stranded debris**. Marine Pollution Bulletin 152

- Tramoy, R., Gasperi, J., Colasse, L., Silvestre, M., Dubois, P., Noûs, C., Tassin, B., 2020b. **Transfer dynamics of macroplastics in estuaries – New insights from the Seine estuary: Part 2. Short term dynamics based on GPS-trackers.** Marine Pollution Bulletin 160
- Tramoy R., Tassin B. Gasperi J., en cours. **Projet PLASTOC.** Projet financé par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.
- Tramoy, R., Gasperi, J., Colasse, L., Tassin, B., 2021. **Transfer dynamic of macroplastics in estuaries — New insights from the Seine estuary: Part 3. What fate for macroplastics?** Marine Pollution Bulletin in press
- Tramoy R., Gasperi J., Tassin B., Rognard F., 2019. **Projet MACROPLAST : Estimation des flux de macrodéchets sur le bassin de la Seine.** Projet financé par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 96p.
- Treilles, R., Gasperi, J., Tramoy, R., Rocher, V., Tassin, B., 2019. **Evolution de la concentration en microplastiques dans le bassin de la Seine lors de la crue de janvier 2018.** Rapport PIREN-seine, synthèse phase 7.
- Van Calcar C., van Emmerik T., 2019. **Abundance of plastic debris across European and Asian rivers.** Environmental Research Letters 14(12).
- Van Emmerik T., Tramoy R., van Calcar C., Alligant S., Treilles R., Tassin B., Gasperi J., 2019. **SeinePlastic Debris Transport Tenfolded During Increased River Discharge.** Frontiers in Marine Science 6.

TABLES DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Production, usage et devenir des plastiques au niveau mondial, entre 1950 et 2015.	6
Figure 2 : Risque environnemental associé à la pollution plastique.	7
Figure 3 : Déchets plastiques dénombrés et pesés sur un prélèvement d'un mètre carré de berge de Seine (Tancarville, 2020).	10
Figure 4 : Zone d'accumulation de macrodéchets en bord de Seine.	11
Figure 5 : Zones d'accumulation de macrodéchets identifiées sur les berges de l'estuaire de la Seine.	11
Figure 6 : Prélèvement de microplastiques par filet.	12
Figure 7 : Comptage visuel des déchets plastiques transitant en Seine en période de faible et fort débit.	12
Figure 8 : Répartition moyenne des plastiques collectés à l'embouchure de la Seine par un filet pélagique de maille 1 cm.	13
Figure 9 : Campagnes de prélèvement des microplastiques dans l'eau.	13
Figure 10 : Etapes de purification des échantillons prélevés dans la colonne d'eau.	14
Figure 11 : Concentration en microplastiques (>50µm) dans la colonne d'eau.	14
Figure 12 : Concentrations en microplastiques quantifiées dans différents estuaires à travers le monde.	15
Figure 13 : Nature des microplastiques présents dans la colonne d'eau.	15
Figure 14 : Chalut à perche de 3 m utilisé pour les inventaires à l'aval de l'estuaire de la Seine.	16
Figure 15 : Déchets plastiques identifiés dans des traits de chalut.	16
Figure 16 : Concentration en macroplastiques sur les fonds à l'embouchure de la Seine.	17
Figure 17 : Contenu d'un trait de chalut réalisé en septembre 2018 à l'embouchure de la Seine.	17
Figure 18 : Concentration en microplastiques dans les sédiments de l'estuaire de la Seine.	18
Figure 19 : Distribution en taille des microplastiques observés dans les sédiments.	18
Figure 20 : Sites de prélèvements des espèces pour la mesure de leur imprégnation en microplastiques.	19
Figure 21 : Caractérisation des microplastiques suspectés retrouvés dans les crevettes blanches en Seine.	19
Figure 22 : Microplastiques retrouvés dans le tractus digestif des flets.	20
Figure 23 : Imprégnation en microplastiques de juvéniles de flet (tractus digestif).	20
Figure 24 : Proportion de fulmars en Manche - Mer du nord avec plus 0,1 g de plastique dans l'estomac.	22
Figure 25 : Prélèvement de microplastiques en point fixe.	24
Figure 26 : Profils de conductivité, turbidité et marégrammes lors des deux cycles de marée étudiés.	25
Figure 27 : Concentration en fragments et microbilles plastiques lors de deux cycles de marée.	25
Figure 28 : Concentration en fragments plastiques à la Bouille pour différentes conditions de débit.	26
Figure 29 : Lien entre le débit de la Seine et le flux de plastique capturé par les barrages flottants sur la Seine, en amont et en aval de Paris.	26
Figure 30 : Débit de la Seine et quantité de déchets collectés mensuellement sur les berges de Seine, à l'aval de Rouen.	26
Figure 31 : Déchets plastiques sur une zone avec de la végétation aquatique.	27
Figure 32 : Flux de plastique et stocks remobilisables dans l'eau et sur la berge inondable, entre Melun et Poses.	27

Figure 33 : Présence d'un déchet marqué en Seine.	28
Figure 34 : Taux de collecte des déchets marqués en fonction des différents lâchers et des hauteurs d'eau de la Seine à Caudebec-en-Caux.	28
Figure 35 : Balise GPS suivie en Seine.	28
Figure 36 : Trajectoires GPS de balises lâchées en conditions d'étiage (octobre 2018).	29
Figure 37 : Trajectoires GPS de balises lâchées en conditions de crue (mars 2018).	29
Figure 38 : Datation des Microlax® et des Capri-Sun® collectés à Villequier entre mars 2018 et avril 2019.	30
Figure 39 : Bilan quantitatif des déchets ramassés sur le littoral normand et les berges de la Seine.	32
Figure 40 : Bennes de déchets remplies au niveau des centrales hydroélectriques de Port-Mort et de Poses.	33
Figure 41 : Estimation du flux de macroplastiques à la mer et du flux capté par les opérations de ramassage en Seine. ...	33
Figure 42 : Méthodes mobilisées pour estimer les flux de plastiques en Seine.	35
Figure 43 : Granulés plastiques industriels et fragments de plastiques retrouvés dans l'estomac d'un fulmar boréal du littoral normand.	36
Figure 44 : Observation de microbilles dans le tube digestif du ver <i>Hediste diversicolor</i>	37
Figure 45 : Proportion de microbilles de polyéthylène observées dans le tube digestif des vers <i>H. diversicolor</i> après une heure d'exposition (T0) et une période de dépuraton.	37
Figure 46 : Microplastiques ingérés par <i>Eurytemora affinis</i>	38
Figure 47 : Cinétique d'élimination de microplastiques par des larves de soles.	38
Figure 48 : Microplastique dans le mucus du ver <i>H. diversicolor</i>	40
Figure 49 : Marqueurs d'effets immunitaires chez des vers exposés 10 jours à un mélange de microplastiques (PE et PP).	40
Figure 50 : Effets d'une exposition à des microplastiques sur une population du copépode <i>Eurytemora affinis</i>	41
Figure 51 : Temps passé par les juvéniles de soles sur fond noir ou fond blanc après avoir été nourries avec des vers exposés à un sédiment enrichi en microplastiques.	41
Figure A : Diversité de la pollution plastique.	9
Figure B : Points de suivis des microplastiques dans le port du Havre et sur le littoral.	22
Figure C : Concentration en microplastiques en sortie de la station d'épuration (Effl.), dans le port du Havre (stations 1 à 4) et à proximité de la décharge littorale de Dollemard (station 5), dans les 3 compartiments eau, sédiments et moules.	23
Figure D : Déchets ramassés en bord de Seine par l'entreprise Naturaul'un.	31
Figure E : Filet collecteurs de déchets posé sur un exutoire du réseau d'assainissement.	34

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Niveau de connaissance de la pollution plastique en estuaire de Seine.	8
Tableau II : Imprégnation en microplastiques présumés des organismes aquatiques prélevés en estuaire de Seine.	21
Tableau III : Composition des deux mélanges environnementaux en microplastiques.	39
Tableau IV : Chiffres clefs de la pollution plastique en estuaire de Seine.	42

ICI COMMENCE LA MER, PROTÉGEONS-LA



Les déchets jetés dans les caniveaux et sur les trottoirs de votre quartier peuvent aller dans la rivière du Cailly, pour finir dans la Seine, puis dans la mer.

Pour contribuer à lutter contre cette pollution, ici, un filet a été installé par la Métropole.

Le filet n'impacte pas la faune du milieu.



Crédit photo :
sauf mention contraire : GIP Seine-Aval

Conception/réalisation :
www.partenairesdavenir.com

FASCICULES SEINE-AVAL

FASCICULES SERIE 3

- 3.1 L'estuaire de la Seine : état de santé et évolution
- 3.2 Qualité des eaux de l'estuaire de la Seine
- 3.3 Fonctionnement hydro-sédimentaire de l'estuaire de la Seine
- 3.4 Usages et perceptions de l'estuaire de la Seine par le citoyen : aménager, valoriser, restaurer
- 3.5 Les niveaux d'eau en estuaire de Seine : risque inondation et changement climatique
- 3.6 Industrialisation de l'estuaire de la Seine : quel héritage pour la qualité des eaux ?
- 3.7 La pollution plastique en estuaire de Seine : imprégnation environnementale, dynamique et impact sur le vivant

FASCICULES À TÉLÉCHARGER SUR : <http://fascicules.seine-aval.fr>

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il doit être cité sous la forme suivante :

Fisson C., Cachot J., Gasperi J., Halm-Lemeille M.P., Tassin B., Tramoy R., 2021.

La pollution plastique en estuaire de Seine : imprégnation environnementale, dynamique et impact sur le vivant.

Fascicule Seine-Aval 3.7, 52 p.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval : gipsa@seine-aval.fr

Le GIP Seine-Aval est financé par :

