
Rapport de stage 4^{ème} année

Analyse critique des protocoles et des outils associés créés par le bureau d'étude Territoires, Environnement, Océan (TEO) dans le but d'harmoniser les techniques de suivi des flux de microplastiques.

Territoires, Environnement, Océan (TEO)

15 rue Alfred Kestler, 17000 La Rochelle



Tuteur entreprise : Maud Fourmanoit
Directrice des projets

Tuteur académique :
Catherine Boisneau

Ninon Durand
Étudiante

IUT

2023 - 2024

Table des matières

Remerciement	4
Listes des acronymes	5
INTRODUCTION	6
1 ETAT DE L'ART : Les enjeux des microplastiques dans l'environnement	8
1.1 Mais qu'est-ce que le plastique : de l'objet au déchet	8
1.2 Du macroplastique au microplastique	10
1.2.1 Les microplastiques : plus petits mais toujours dangereux.....	10
1.2.2 Les processus de fragmentation.....	11
1.2.3 Les processus de transport et de mobilisation des microplastiques.....	13
1.3 Les défis environnementaux du plastique	15
1.3.1 L'assimilation des microplastiques dans un écosystème	15
1.3.2 Les microplastiques véhiculent de la toxicité	16
1.3.3 Les enjeux complexes du recyclage.....	17
1.4 Les défis de la quantification	18
1.4.1 L'échantillonnage : défis d'harmonisation.....	19
1.4.2 Les techniques d'analyse	21
1.4.3 Les types de résultats	22
1.5 Conclusion	24
2 Analyse critique des protocoles d'utilisation des outils microplastiques, premiers résultats, enjeux, et limites	25
2.1 Contexte.....	25
2.2 Présentation technique des outils microplastiques.....	28
2.2.1 Déflecteur à bulles.....	28
2.2.2 Support trois filtres.....	30
2.3 Terrains d'applications et résultats	32
2.3.1 Présentation des sites d'études.....	32
2.3.2 Expérimentations avec l'outil déflecteur à bulles.....	38
2.3.2.1 Les ingénieurs EIGSI, test de 2023	38
2.3.2.2 Expérimentation du déflecteur à bulles en juillet 2024.	39
2.3.3 Expérimentation avec l'outil support trois filtres	40
2.3.4 Les premiers résultats	42
2.4 Discussions.....	50
2.4.1 Pertinence de l'outil et des résultats	50
2.4.2 Mise en œuvre	52
2.4.3 Coût de maintenance	53

2.4.4	Coût énergétique.....	53
2.4.5	L'aspect financier	55
2.4.6	Impact écologique.....	56
CONCLUSION		58
BIBLIOGRAPHIE.....		60
Table des figures.....		65
Table des tableaux.....		67
Annexes		68

Remerciement

Je tiens à remercier Fabrice Faurre et Maud Fourmanoit, les gérants de la structure Territoires, Environnement, Océan (TEO), qui m'ont permis de choisir mon stage de quatrième année en toute conscience et avec intérêt. Je les remercie pour leur bonne humeur constante et nos échanges toujours intéressants et bienveillants.

Je remercie Maud tout particulièrement, qui m'a permis d'orienter mon mémoire pour qu'il soit pertinent et qu'il puisse aider TEO dans leurs projets futurs. Merci de m'avoir aidé à donner un sens à mon travail. Merci pour nos discussions toujours pertinentes et pour l'aide précieuse que tu as apportée à mon mémoire et au développement de mon esprit critique et scientifique.

Merci à Fabrice pour sa disponibilité, son esprit ingénieux et son ouverture d'esprit, qui m'ont accompagné tout au long du stage et surtout lors des expérimentations mises en place. Merci pour ton éternel optimisme.

Je souhaite accorder un remerciement tout particulier à Mathilde Sourisseau, qui a été une binôme de stage merveilleuse et qui est surtout devenue une amie. Merci pour tes conseils avisés lors de mes éternelles questions de cartographie, d'analyse et de mise en page. Merci pour les moments de « brainstorming » au bureau concernant nos mémoires, et nos sorties terrains, toujours constructives et enrichissantes. Merci d'avoir toujours remis en question ce que j'écrivais et pour tes questionnements sur la pertinence de mes analyses. Merci pour ta bonne humeur et ton humour, ce stage a été génial à tes côtés.

Je voudrais remercier Elsa Lim également, avec qui nous avons formé un super trio pendant les sept premières semaines de stage.

Un grand merci à Catherine Boisneau, qui est restée très disponible pendant le stage et qui a su m'accompagner dans mes réflexions et mes questionnements concernant la rédaction de ce rapport de stage.

Je remercie également tous les acteurs professionnels que j'ai pu rencontrer lors de ce stage et avec qui j'ai eu des discussions toujours intéressantes.

Listes des acronymes

AAI : Appel à Initiatives.

BAM: Bac à Marées.

CEHTRA: Consultancy for Environmental and Human Toxicology and Risk Assessment.

COV : Composés Organiques Volatiles.

FPA : Focal Plan Array.

FTIR : spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier.

FTIR ATR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier en mode Réflectance Total Atténuée.

GPI : Granulés plastiques industriels.

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

MPs : Microplastiques.

PE : Polyéthylène.

PET : Polyéthylène téréphtalate.

POPs : Polluants Organiques Persistants.

PP : Polypropylène.

PS : Polystyrène.

PVC : Polychlorure de Vinyle.

SAPEA: Science Advice for Policy by European Academies.

SARL : Société à Responsabilité Limitée.

SCIC : Société d'Intérêt Collectif.

TEO : Territoires, Environnement, Océan.

UV : Ultraviolets.

INTRODUCTION

La révolution du plastique a commencé en 1955, marquée par l'essor des produits à usage unique comme les couverts, les pailles et les assiettes en plastique. Leur utilisation est très appréciée et change la vie de milliards de personnes, car ces produits sont peu coûteux, légers, durables, et leur diversité permet d'en fabriquer un grand nombre (Rochman, 2020). Les premières découvertes scientifiques sur les débris plastiques marins ont été publiées en 1972, faisant référence à de petites particules de plastique trouvées dans la mer des Sargasses, à des milliers de kilomètres de la terre ferme. En 1996, le capitaine Charles Moore découvre le "Great Pacific Garbage Patch" (ou « vortex de déchets du Pacifique Nord ») et publie le premier rapport sur l'accumulation de déchets plastiques au milieu du gyre subtropical du Pacifique Nord (NOAA / National Geographic Society & National Geographic, 2018). Le plastique fait aujourd'hui partie des écosystèmes, et on trouve des débris dans tous les écosystèmes. D'ici 2050, toutes les espèces d'oiseaux marins ingéreront du plastique, et environ 700 espèces d'animaux marins ont déjà ingéré du plastique ou ont été piégées dedans (Le Plastique En 10 Chiffres, 2021). Les débris plastiques de petite taille sont omniprésents dans les océans du monde, les écosystèmes, les habitats et les réseaux trophiques, mais également au sein des organismes vivants et dans les cycles biogéochimiques naturels. Ces impacts entraînent des conséquences indéniables sur l'ensemble des écosystèmes de la planète, y compris sur nous. Une étude récemment publiée dans « Toxicological Sciences » révèle des concentrations élevées de microplastiques dans les testicules humains (Chelin et al., 2024). Ces récentes recherches questionnent également le lien entre la présence de microplastiques et la baisse de fertilité chez les hommes, une corrélation ayant été observée chez les canidés testés lors de cette étude. Ces résultats montrent l'omniprésence des débris plastiques dans l'environnement et les problèmes que cela peut engendrer pour la santé humaine, même si aucune conclusion définitive n'a pu être tirée sur les liens de cause à effet avec certains cancers ou maladies (Chelin et al., 2024).

Pour limiter l'impact des déchets plastiques, le gouvernement français a mis en place, entre autres, un plan d'action « zéro plastique en mer » (2020-2025), qui a pour but de réduire la production de plastique, d'améliorer les infrastructures de gestion des déchets, de créer des actions de sensibilisation, et d'encourager les projets de recherche et de développement de nouvelles technologies innovantes (systèmes de filtration, dispositifs de collecte...) (Ministère de la Transition écologique et solidaire, 2020). Il existe également de nombreux plans de lutte contre le plastique à l'échelle locale, et un traité international sur le plastique est actuellement en discussion pour être mis en place d'ici la fin de l'année 2024 (Vers un traité mondial pour mettre fin à la pollution plastique | Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires, s.d.).

Les études permettent aujourd'hui de mieux comprendre les sources de contamination, le devenir des plastiques une fois dans l'océan, et la manière dont ils se transforment par des processus physiques et biologiques, interagissant avec les écosystèmes aquatiques et les modifiant. Plusieurs lois et décrets ont été promulgués par le gouvernement pour continuer à lutter contre le plastique. En 2015, la loi relative à la transition énergétique et à la croissance verte a été adoptée, prévoyant l'interdiction de l'utilisation des sacs plastiques à usage unique. En 2016, la loi sur la Biodiversité interdit l'usage des microbilles dans les produits cosmétiques. En 2020, la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire prévoit l'interdiction de plusieurs produits plastiques à usage unique, tels que les gobelets, couverts, pailles et assiettes (Laurène, 2024).

Des efforts sont faits aujourd'hui pour tenter de réduire l'impact des plastiques sur notre planète, mais en Europe, seulement 30 % des débris plastiques sont recyclés (Bajt, 2021). Plusieurs millions de

déchets plastiques atteignent l'océan chaque jour, 80 % de ces déchets provenant des fleuves (Bajt, 2021).

Le bureau d'études TEO (Territoires, Environnement, Océan) s'engage aujourd'hui activement dans cette lutte contre la pollution plastique. TEO est une Société Coopérative d'Intérêt Collectif (SCIC). Il s'agit d'une structure qui place l'intérêt collectif au cœur de son fonctionnement, rassemblant des personnes physiques ou morales autour d'un projet commun alliant efficacité économique, développement local et utilité sociale (Tout Savoir Sur le Statut de Scic, s.d.). TEO permet à la fois aux collectivités, aux citoyen.nes et aux associations de participer aux projets mis en place tout en assurant une gouvernance démocratique. Cette SCIC prend la forme commerciale d'une SARL à gestion désintéressée où chaque personne équivaut à une voix lors des assemblées générales. Créée en 2011 par un groupe de personnes cherchant à protéger les espaces côtiers et l'océan de la pollution plastique, TEO s'étend désormais aux fleuves et rivières pour analyser encore plus précisément les impacts du plastique (TEO, 2024). L'engagement collectif de TEO est au centre de chacune de leurs actions, valorisant la coopération, l'expertise scientifique et le travail collectif pour atteindre leurs objectifs environnementaux.

Le bureau d'études coopératif TEO collabore étroitement avec des entreprises d'insertion pour promouvoir leurs projets écologiques et solidaires. Depuis 12 ans, TEO s'implique dans l'étude de l'impact et des flux des plastiques dans l'océan. Les projets s'articulent autour du littoral grâce à la mise en place de dispositifs tels que le Bac à marée depuis 2018 (marque déposée), qui ont vocation à s'étendre sur l'ensemble du littoral français, afin d'évaluer la pollution plastique. Ce dispositif repose sur la participation citoyenne, permettant à chacun de collecter les débris plastiques trouvés sur la plage. La SCIC TEO développe des projets à la croisée de la recherche, de l'opérationnel et du coopératif, notamment en nouant des partenariats avec les opérateurs de terrain. Pour cela, TEO se concentre aujourd'hui sur la question des microplastiques et de la pollution de l'eau. En répondant à plusieurs appels à projets et appels à initiatives, la SCIC TEO se rapproche d'un réseau d'acteurs afin de mettre en place des campagnes d'analyse des microplastiques sur les cours d'eau. Le but est d'acquérir des données fiables et à long terme pour aider les politiques publiques à agir face à la problématique plastique. Afin de pouvoir réaliser des prélèvements réguliers sur des stations choisies par un réseau d'acteurs, le bureau d'études TEO souhaite mettre en place un protocole simple, reproductible et peu coûteux pour suivre la pollution microplastique. C'est dans ce cadre que s'inscrit mon stage et ce présent mémoire, pour se poser la question suivante :

Quelles sont les limites et les critiques relatives aux enjeux des protocoles mis en place par le bureau d'études TEO ? Étude des outils microplastiques : déflecteur à bulles et support trois filtres.

Pour répondre à cette problématique, la première partie constituera un état des connaissances actuelles sur les déchets plastiques, leurs origines et les processus par lesquels ils deviennent des microplastiques. Nous examinerons ensuite les défis environnementaux qu'ils posent et nous ferons un état des techniques de quantification pour analyser leur présence. Dans une deuxième partie, nous réaliserons une analyse critique de la mise en place des protocoles de quantification et de suivi des microplastiques par le bureau d'études TEO. Cette partie commencera par poser le contexte de ce mémoire, puis nous explorerons les terrains d'application où les outils ont été implantés, ainsi que les premiers résultats obtenus. Enfin, nous conclurons par une discussion critique sur la pertinence de l'utilisation de ces outils pour la société coopérative TEO.

1 ETAT DE L'ART : Les enjeux des microplastiques dans l'environnement

1.1 Mais qu'est-ce que le plastique : de l'objet au déchet

Le plastique est une mixture complexe de plusieurs polymères de synthèse en chaîne, couplés à des additifs qui peuvent être toxiques (Herzke, 2023). Les polymères sont constitués de plusieurs monomères assemblés en chaîne. Ils peuvent être naturels, comme la cellulose, ou synthétiques, comme le PVC (polychlorure de vinyle). Les additifs servent à améliorer les propriétés du plastique, par exemple en le rendant antiadhésif, résistant à l'eau ou antioxydant. La toxicité du plastique dépend de plusieurs facteurs : la nature des matrices, la taille, la forme, le type de polymère, la surface et sa composition chimique, ainsi que les additifs utilisés (Herzke, 2023). C'est le cas du PVC et du polystyrène (PS), qui contiennent des additifs particulièrement toxiques et difficiles à recycler. Ils représentent plus de 30 % de la production globale de plastiques (Bouguerra, 2022). Les polymères les plus abondants retrouvés à la surface des océans sont les polyéthylènes de haute densité (PEHD), les polypropylènes (PP) et les polyéthylènes (PE) (Dabboub, 2023). Ces polymères sont largement utilisés dans la production d'emballages plastiques, de produits plastiques à usage unique et d'autres applications courantes (automobile, tuyauterie, jouets...). Tous ces polymères appartiennent à la catégorie des thermoplastiques. Ils sont facilement recyclables car, étant sensibles à la chaleur, leurs liaisons chimiques se brisent facilement, permettant au matériau de prendre la forme souhaitée et de la conserver en refroidissant (Poulain-Zarcos, 2020 ; Dabboub, 2023) (figure 1).

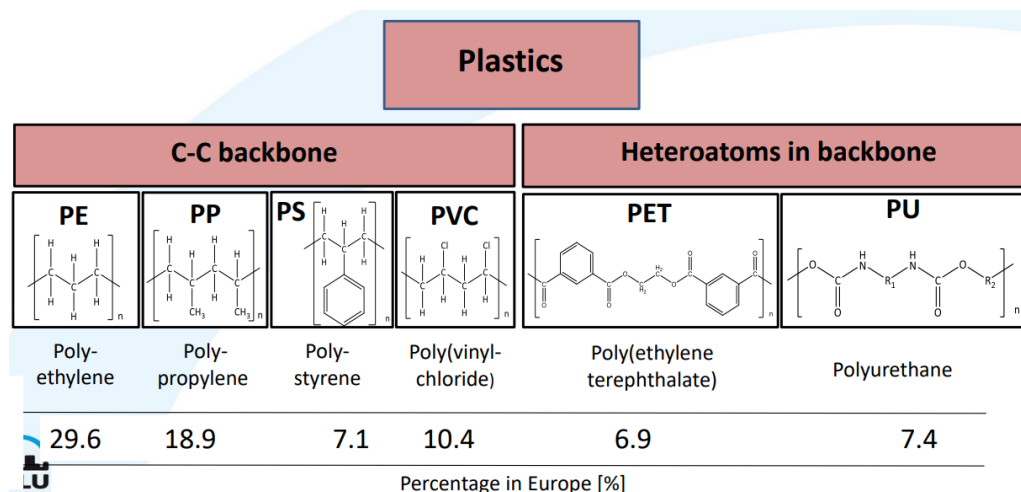


Figure 1 : Différents types de polymères utilisés dans la fabrication du plastique et leur pourcentage d'utilisation en Europe (Herzke, 2023).

Le plastique en tant que tel n'est pas un déchet, mais il le devient lorsqu'il est abandonné ou jeté. La quantité de déchets plastiques se retrouvant dans les fleuves, puis dans les océans, provient

en grande majorité d'une mauvaise gestion des déchets terrestres. Environ 1 million de tonnes de macroplastiques sont rejetées chaque année dans les océans via les fleuves (Tramoy, 2023). Ces macrodéchets sont principalement des emballages, constituant des plastiques à usage unique. Ce secteur représente 40 % des plastiques produits (Tramoy, 2023).

Les macrodéchets ont une taille supérieure à cinq millimètres et représentent le plus grand pourcentage de plastique flottant dans les océans en termes de poids. Cependant, ce sont les microplastiques (taille inférieure à 5 mm) qui en constituent le plus grand nombre. Les études montrent que la surface des océans pourrait contenir jusqu'à 51 mille milliards de particules de microplastiques. Ces chiffres concernent uniquement la surface, mais des microparticules ont également été retrouvées à de plus grandes profondeurs, leur nombre étant difficilement quantifiable (Rochman, 2020). Selon Geyer (2017), il est estimé qu'en 2015, 6 300 millions de tonnes de plastiques ont été produites dans le monde, dont environ 9 % ont été recyclées, 12 % incinérées et 79 % accumulées dans les décharges ou dans l'environnement naturel (figure 2). Ainsi, en 2015, les déchets plastiques mal gérés sur terre représentaient entre 60 et 99 millions de tonnes (Tramoy, 2023). Si l'on continue « business as usual », 12 000 millions de tonnes de plastiques pourraient se retrouver dans l'environnement d'ici 2050 (Greyer, 2017) (figure 2). Le problème du plastique est aujourd'hui multiple. Sa toxicité peut provenir des caractéristiques ajoutées lors de sa fabrication, mais surtout de sa capacité à absorber des Polluants Organiques Persistants (POP's) à sa surface (Matthias et al., 2021).

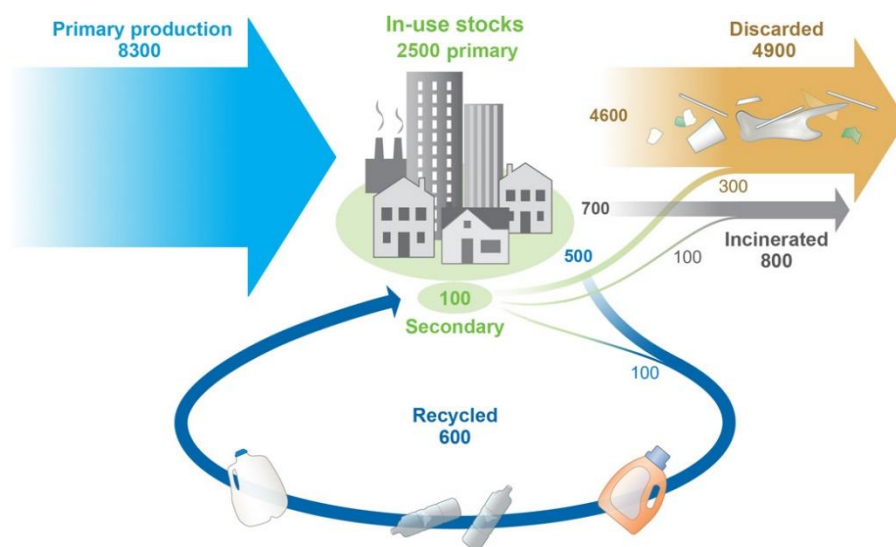


Figure 2 : Production mondiale, utilisation et devenir des résines polymères, des fibres synthétiques et des additifs (1950 à 2015 ; en millions de tonnes métriques) (Geyer, 2017).

Le plastique ne pose pas uniquement des problèmes de pollution ou de risque pour la santé humaine, mais contribue également à l'épuisement des énergies fossiles. La production de plastique est étroitement liée à la pétrochimie et aux matières premières fossiles, représentant 8 à 9 % de la consommation mondiale de pétrole et de gaz (Nielsen et al., 2020). En effet, 99 % des matières premières utilisées pour la production de plastique proviennent de combustibles fossiles. La production de plastiques et l'incinération de ces déchets génèrent annuellement 400 millions de tonnes de CO₂ (Nielsen et al., 2020). Ce bilan pourrait être réduit si la production de plastique biosourcé (utilisant des

matières premières d'origine biologique) augmentait. Actuellement, celle-ci ne représente que 1 % de la production globale de plastique, soit environ 4 millions de tonnes par an (Nielsen et al., 2020).

La complexité des matières composant le plastique en fait un matériau dangereux lorsqu'il entre dans l'environnement. Il peut subir divers processus mécaniques, chimiques et biologiques qui entraînent sa fragmentation, augmentant parfois même sa toxicité.

1.2 Du macroplastique au microplastique

1.2.1 Les microplastiques : plus petits mais toujours dangereux

A force d'altération les macrodéchets présents dans l'environnement vont se fragmenter et devenir des microplastiques dits secondaires. Plus petits mais pas moins dangereux (Bouguerra, 2022).

L'abondance des microplastiques augmente avec la taille des fragments qui diminue. Leur gamme de taille fait débat au sein de la communauté scientifique. On arrive aujourd'hui à un consensus disant que les microplastiques ont une taille inférieure à 5mm jusqu'à 1 μm , et pour une taille inférieure à 1 μm , on parle de nano plastiques (Li et al., 2018). Les particules inférieures à 20 μm peuvent pénétrer les membranes cellulaires et exacerber les risques liés au plastique (Hale et al., 2020). Cette exposition peut engendrer des problèmes dans les processus physiologiques, de reproduction, de comportement, d'alimentation pour tous les organismes vivants (Hale et al., 2020). Cependant de plus amples recherches sont nécessaires pour annoncer avec certitudes des liens de causes à effet sur l'ingestion de microplastiques et l'apparition de maladies, troubles ou autres dérèglements du système (Li et al., 2018 ; Bouguerra, 2022 ; Hale et al., 2020).

Les microplastiques primaires sont originellement manufacturés pour avoir une taille inférieure à 5 mm. Ces plastiques sont majoritairement produits dans les industries textiles, la cosmétique, la peinture industrielle, les médicaments, l'électronique. Ces microplastiques sont aisément transportés par les rivières, les rejets des stations d'épuration, le vent et les eaux de ruissellement de surface (Li, 2018 ; Bouguerra, 2022). Dans cette catégorie on retrouve les Granulés Plastiques Industriels (GPI), parfois appelés « larmes de sirènes ». Ils sont définis par le décret français n°2021-461 comme des « matières plastiques commercialisées sous différentes formes, dont les dimensions externes sont supérieures à 0,01 mm et inférieures à 1 cm » (CEDRE, 2023). Il s'agit de la matière brute utilisée par les plasturgistes et transformateurs pour produire l'ensemble des objets plastiques (Figure 3). La production mondiale annuelle de GPI représente entre 300 et 400 millions de tonnes. Ces granulés sont composés à 90% de polymères et 10% d'additifs chimiques (CEDRE, 2023).



Figure 3 : Photo de Granulés Plastiques Industriels (GPI) trouvés sur une plage (CEDRE, 2023).

Les impacts environnementaux des pertes opérationnelles ou accidentelles sont encore peu étudiés. Ces pertes engendrent une contamination diffuse des écosystèmes aquatiques, qui est

difficilement mesurable. Les granulés de plastiques industriels (GPI) sont aujourd'hui omniprésents sur les littoraux français. Il n'existe actuellement aucune réglementation internationale ou européenne à ce sujet. Une seule réglementation française, entrée en vigueur en 2022, vise à lutter contre le gaspillage et à promouvoir l'économie circulaire. Elle impose de limiter la distance entre les sites de production et les industries utilisant ces GPI afin de réduire le risque de perte lors du transport (CEDRE, 2023).

La provenance des microplastiques est très variée. L'Union Internationale pour la Conservation de la Nature a annoncé que les microplastiques relâchés par les vêtements synthétiques lors des lavages en machine contribuent à hauteur de 35 % au nombre total de microplastiques présents dans les océans (Hale et al., 2020). Ainsi, les fibres textiles libérées lors de l'utilisation des machines à laver se retrouvent dans les stations d'épuration et sont relâchées dans l'environnement sans pouvoir être traitées correctement (Hale et al., 2020). Une étude réalisée par Zambrano et al. en 2019 a montré que les fibres de polyester provenant des vêtements étaient biodégradées à seulement 4 % en 243 jours, comparé à 76 % pour le coton. Dans la revue de Hale et al. (2017), la contamination de l'air intérieur par les microplastiques a également été étudiée, et ces concentrations parfois élevées proviennent généralement des matériaux isolants utilisés.

Les études sur les effets perturbateurs des microplastiques sur la biodiversité sont encore très récentes, et il devient primordial de réaliser des évaluations toxicologiques sur les risques engendrés par les microplastiques. Il est également très difficile d'estimer la quantité de microplastiques présents dans les différents compartiments environnementaux (terrestre, marin, eau douce, atmosphérique). Les difficultés rencontrées par les scientifiques proviennent en grande partie des techniques d'échantillonnage. Il est aujourd'hui plus facile de quantifier les plastiques à la surface des eaux marines que dans l'air. Les microplastiques sont trop facilement mobilisables pour être quantifiables. En effet, ils bougent constamment sous l'effet de divers facteurs biotiques (organismes vivants) ou abiotiques (vent, marées, courants...) qui régissent l'ensemble des écosystèmes (Hale et al., 2020).

Ces plastiques sont donc soumis à de nombreux facteurs environnementaux qui entraînent leur fragmentation.

1.2.2 Les processus de fragmentation

Les plastiques sont des éléments extrêmement résistants à la dégradation. La fragmentation ou la dégradation d'un plastique dans l'environnement peut prendre plusieurs dizaines voire centaines d'années. Une fois abandonné dans l'environnement l'objet sera charrié par le vent et les eaux de surfaces et subira une première fragmentation à partir de ces éléments. C'est la fragmentation mécanique par le biais des roches, poussières, etc... Cette altération est également conditionnée par l'humidité, l'oxygène, la chaleur et le soleil (Bajt, 2021) (figure 4).

La photo dégradation est un processus qui entraîne la dégradation d'un composé par les radiations et l'absorption de photons des rayons du soleil. Cette dégradation entraîne une modification des caractéristiques physiques (couleur, forme...) et chimiques (oxydation, etc...) du plastique (Bajt, 2021). Ces processus de dégradation entraînent la fragmentation des plastiques en microplastiques secondaires, des objets d'une taille inférieure à 5 millimètres et qui représentent la majorité des microplastiques retrouvés dans la nature (Bajt, 2021). L'exposition de ces composés au soleil et surtout aux ultraviolets (UV) est le facteur le plus important de la dégradation du plastique (Li, 2018).

L'absorption de l'énergie lumineuse va rompre les liaisons chimiques du plastique, provoquer des changements physiques et chimiques, et entraîner la fragmentation du matériau polymère (Li, 2018). Cette destruction peut entraîner la création de composés polymères dissous qui sont biodisponibles pour les micro-organismes. Ces organismes peuvent ensuite métaboliser les composés polymères en CO_2 , mais il s'agit d'un processus très lent et souvent impossible (Bajt, 2021). Ces composés peuvent également s'accumuler dans les organismes vivants et ensuite s'accumuler dans la chaîne alimentaire rendant les molécules toxiques biodisponibles pour l'ensemble de l'écosystème (Bajt, 2021 ; Li, 2018). Par exemple le PVC peut relarguer des molécules oestrogéniques, pouvant dérégler les cycles hormonaux des organismes, ce sont des perturbateurs endocriniens (Ullah, et al. 2023 ; Bajt, 2021). La photo dégradation augmente la libération de Composés Organiques Volatiles (COV) comme des carbonyles, des esters, des alcools, des acides reconnus pour leur toxicité élevée et responsables de bons nombres de maladies (cancer du poumon) (Saalberg & Wolff, 2016). L'étude de Bajt (2021) illustre que les processus de fragmentation d'un plastique entraînent plusieurs millions de particules par millilitres à être relâchées dans l'eau en 112 jours de dégradations.

L'eau fragmente également le plastique par le processus d'hydrolyse. Ce processus semble être pour le PE, le facteur de dégradation le plus important (Bajt, 2021). Une étude montre qu'en 25 semaines d'altération dans l'eau 90% des fragments de PE avaient atteint une taille inférieure à 1 mm. Cette étude a montré que l'altération dans l'eau nécessite des délais plus longs pour produire des microparticules (Bajt, 2021).

Un dernier processus de fragmentation est engendré par les microorganismes : c'est la biodégradation. Cette dégradation dépend de différentes conditions d'exposition (température, humidité, pH, nutriments disponibles), des micro-organismes impliqués, et des caractéristiques du substrat (morphologie, groupes fonctionnels, poids moléculaire...). La biodégradation des plastiques dans le milieu marin est un processus très long et très complexe. C'est la formation d'un biofilm microbien à la surface du polymère qui initie ces étapes de dégradation. La détérioration et la fragmentation du polymère en monomère par l'activité enzymatique des micro-organismes, suivis de l'étape finale de minéralisation, terminent ce processus de biodégradation (Herzke, 2023 ; Bajt, 2021).

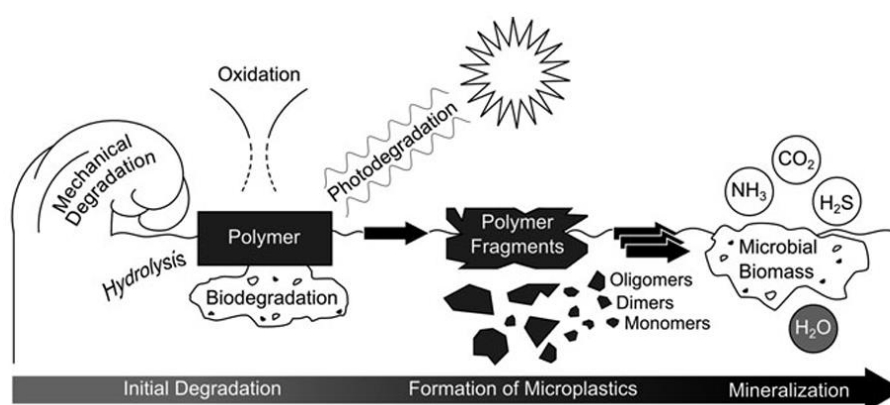


Figure 4 : Voies de dégradation des polymères synthétiques dans l'environnement aquatique avec les processus de dégradation impliqués et les étapes intermédiaires jusqu'à la minéralisation complète (Klein et al., 2018).

Les objets plastiques sont des produits révolutionnaires et on voit aujourd'hui les effets de leur durabilité et persistance dans l'environnement. On estime qu'une bouteille en plastique peut mettre entre un et dix siècles à se dégrader, environ 400 ans pour un sac et un millénaire pour le polystyrène (« Les Plastiques Dans L'environnement », 2021). Malgré qu'ils soient soumis à des processus de fragmentation et réduit à l'état de microplastiques ils sont mobilisés en permanence dans le milieu naturel. Ils font partie intégrante des cycles biogéochimiques.

1.2.3 Les processus de transport et de mobilisation des microplastiques

Les processus qui régissent le transport des microplastiques dans l'environnement entre et à travers des compartiments écologiques sont sous l'influence de multiples facteurs. Leur trajectoire dépend de leurs caractéristiques physiques, de la dynamique de l'écosystème dans lequel ils se trouvent, des conditions météorologiques qu'ils subissent.

L'étude pour la compréhension des processus de transport des microplastiques est extrêmement difficile lorsque l'on sait à quel point leurs caractéristiques physiques varient énormément. Finalement, peu d'études ont réussi aujourd'hui à examiner collectivement l'importance des forces hydrodynamiques, de l'environnement de dépôt ou de la densité et de la taille des microplastiques dans les dynamiques de transports (Zhang, 2017). L'omniprésence des MPs dans l'environnement prouve également à quel point leur transport est multiple. Dans sa thèse Charlotte Lefebvre (2022) explique que les MPs se déversent dans l'océan par dépôts atmosphériques, déversements d'effluents traités, par les vents, apports par les eaux continentales (cycle de l'eau, fleuves et rivières), voire par des dépôts directs.

Les processus de transport atmosphérique des microplastiques ont finalement été peu étudiés. Dans la revue de Hale et al., (2020) une étude de 2016 montre que la déposition atmosphérique de fibres synthétiques pouvait atteindre 3 à 10 tonnes par an sur une surface de 2 500 km², équivalent à la surface de Paris. Ce transport atmosphérique représente 118 particules/jours/m² en moyenne à Paris (Hale et al., 2020). Il a été montré également que la déposition et le transport des MPs dans l'atmosphère est plus important dans les zones urbaines qu'en périphérie des villes. De plus ce mouvement des MPs dans l'air entraîne un déchargement important dans les environnements aquatiques (océans, lacs, rivières...). Dans l'article Petersen & Hubbart, (2021), environ 34% des microparticules qui proviennent de l'usure des pneus automobiles ont été déposées par transport atmosphérique, c'est presque 2 fois plus que par le transport fluvial. Le transport atmosphérique entraîne la contamination des zones les plus reculées et isolées et reste la voie de contamination la plus analysée aujourd'hui (Petersen & Hubbart, 2021).

Certes, le transport atmosphérique est une source majeure de diffusion de microplastiques (MPs), mais les estuaires et les rivières jouent également un rôle important. Le transport par les voies d'eau continentales est largement influencé par différentes forces hydrodynamiques et les conditions environnementales du milieu. Les vagues, les marées, la stratification de l'eau douce et les débits fluviaux sont autant de facteurs qui influencent le transport des microparticules (Zhang, 2017). La vitesse des systèmes de transport aquatique entraîne le mouvement, la concentration ou l'accumulation de MPs dans l'environnement. Une étude menée dans la rivière Tame, en Angleterre, a démontré que le transport de MPs et leur variation en termes de concentration dépendaient énormément de la vitesse d'écoulement du système (Petersen & Hubbart, 2021). Les particules ont tendance à s'accumuler plus rapidement dans les zones où la vitesse d'écoulement est plus faible.

Plusieurs études ont montré que la concentration en microparticules était plus importante dans les lacs, les plaines inondables et les barrages, comparée à celle observée dans les rivières et fleuves (Ballent et al., 2016 ; Hoellein et al., 2019; Kataoka et al., 2019; Migwi et al., 2020). Ces systèmes d'eau plus ou moins fermés fonctionnent comme des puits de MPs, tandis que les rivières et les fleuves servent de moyens de transport (Petersen & Hubbard, 2021).

La densité des particules de microplastiques est une caractéristique critique pour déterminer la mobilité de ces particules dans l'eau (Zhang, 2017). Selon l'étude de Zhang (2017), une particule non flottante avec une densité supérieure à celle de l'eau de mer aura tendance à couler et à s'accumuler sur les fonds océaniques. À l'inverse, une particule avec une densité inférieure aura tendance à flotter à la surface ou à proximité de celle-ci, et donc à être transportée plus aisément. Cependant, le transport des particules dans l'océan est très complexe en raison de la complexité des dynamiques hydrologiques de mixage et de la coagulation des particules qui peut se produire. Zhang (2017) conclut que les particules à forte densité sont transportées sur de longues distances, tandis que celles à faible densité sont retrouvées dans les sédiments benthiques des mers côtières et au fond des océans (figure 5).

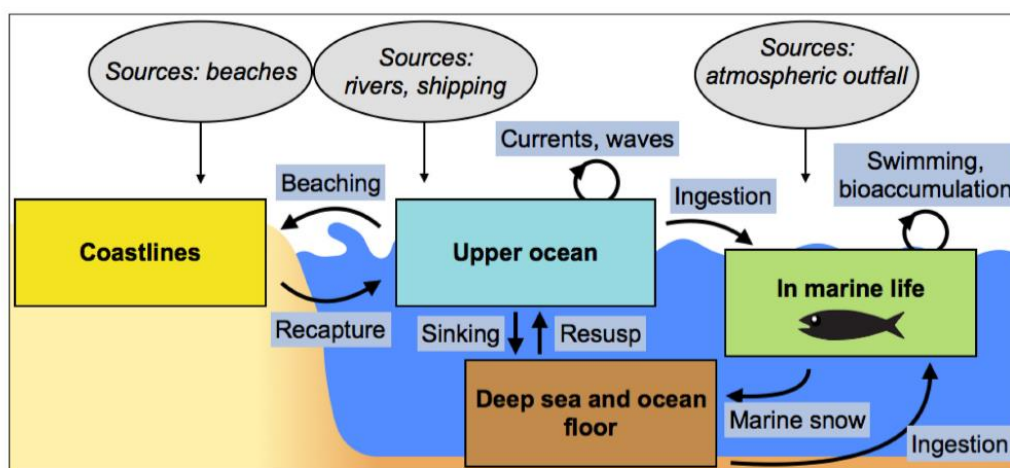


Figure 5 : Les sources des déchets anthropiques qui pénètrent dans les océans (ovales), les réservoirs, ou les compartiments océaniques où les débris s'accumulent (box) et les processus avec lesquels les particules bougent entre les compartiments (Hardesty et al., 2017).

Les estuaires ont été décrits comme des puits temporaires de microplastiques (MPs) avant que ces derniers ne rejoignent l'océan (Malli et al., 2022). Leur rôle dans le transport de ces particules vers l'environnement marin est indéniable en raison de leurs caractéristiques uniques, étant à la confluence des eaux douces des rivières et de l'eau salée océanique (Zhang, 2017). Cet échange est influencé, en amont (estuaire supérieur), par les débits fluviaux et le déchargement des rivières, et en aval (estuaire inférieur), par le cycle des marées du côté marin. La sédimentation des particules de MPs dans les sédiments estuariens constitue un facteur de transport important dans ces systèmes (Malli et al., 2022). Cette sédimentation est régie par plusieurs caractéristiques, notamment celles des MPs (densité, taille, forme, composition chimique...), ainsi que par les propriétés physicochimiques des sédiments. Ensuite, les processus de « biofouling » modifient les caractéristiques des MPs en raison de la formation d'un biofilm créé par la colonisation de la particule par certaines bactéries. Cette colonisation est facilitée par la nature hydrophobe des MPs, qui attire les molécules organiques

présentes dans l'eau à leur surface, permettant ainsi la fixation des microorganismes. Cela induit un changement de densité des MPs, affectant ainsi leur sédimentation et leur transport (Malli et al., 2022).

Il est également important de noter que ce processus de « biofouling » ralentit les processus de dégradation des microplastiques dans l'environnement, les rendant ainsi encore plus persistants et potentiellement vecteurs de certains polluants (Malli et al., 2022).

1.3 Les défis environnementaux du plastique

1.3.1 L'assimilation des microplastiques dans un écosystème

Les mécanismes de transport des MPs les rendent biodisponibles pour les organismes minuscules tels que le plancton mais également de plus large animaux filtreurs comme des mollusques ou des requins-baleines (Anbumani & Kakkar, 2018). L'ajout d'additifs et leurs compositions polymériques entraînent des effets toxiques incontestables sur les écosystèmes. L'absorption de ces particules entraîne une multitude d'effets indésirables sur le biote marin (Anbumani & Kakkar, 2018). Par exemple les MPs perturbent l'alimentation des algues, augmentent la mortalité et décroient la fertilité des copépodes, perturbent également les mécanismes de filtrations chez les organismes sessiles (Anbumani & Kakkar, 2018). Ce ne sont que quelques exemples parmi les fonctionnalités impactées par la présence de MPs dans l'eau (Anbumani & Kakkar, 2018). La figure 6 montre les différents transferts des microplastiques à travers l'exemple de la chaîne alimentaire dans un écosystème de l'Arctique. Cet exemple peut s'appliquer à tous les types d'écosystèmes avec des variations évidentes. Les MPs peuvent induire des impacts physiques sur les organismes, tels que des abrasions internes et/ou externes, des ulcères pouvant aller jusqu'au blocage des voies digestives entraînant la satiété, la famine et une détérioration physique de l'individu (Hale et al., 2020).

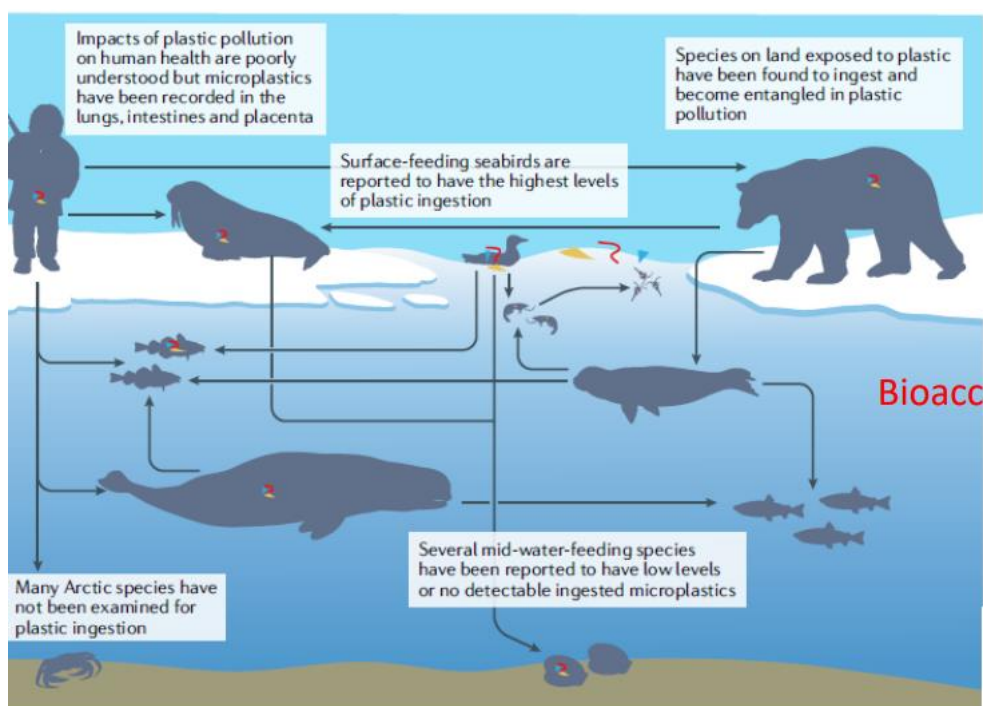


Figure 6 : Différentes voies de transfert des microplastiques à travers la chaîne alimentaire dans les régions de l'Arctique (Herzke, 2023).

Plusieurs modes de transfert de ces particules ont été examinés dans l'article de Pironti et al. (2021). Les microplastiques (MPs) peuvent être capturés activement (par confusion avec une proie), passivement (filtration de l'eau par les branchies) ou par ingestion de proies contaminées. Les microplastiques ont été largement retrouvés dans les crustacés, les bivalves, les mollusques, et d'autres espèces de poissons courants. Ces espèces constituent la base alimentaire de nombreuses autres, facilitant ainsi le transfert de ces particules à travers toute la chaîne alimentaire jusqu'à atteindre notre assiette (Pironti et al., 2021). L'accumulation des microplastiques dépend énormément des particularités biologiques et physiques des individus concernés. En effet, les MPs peuvent être retrouvés dans les muscles, les branchies, ou les intestins des espèces étudiées, démontrant les différentes voies de contamination possibles au sein des communautés aquatiques. Ces différences sont également liées aux caractéristiques physiques et chimiques de l'eau, notamment la salinité, qui joue un rôle important (Pironti et al., 2021). La salinité affecte la capacité d'adsorption des MPs dans l'environnement marin, cette capacité diminuant à mesure que la salinité augmente. L'adsorption correspond à la capacité d'un solide de retenir à sa surface des molécules ou des ions en phase gazeuse ou liquide, ici les MPs avec les polluants (Liu et al., 2019).

Une fois ingérés par la faune, les MPs sont transférés dans la chaîne alimentaire par des processus de bioaccumulation, les polymères s'accumulant au sein des organismes. Les MPs jouent ainsi un rôle de vecteur de bioaccumulation pour des molécules chimiques toxiques, ce processus étant défini par l'augmentation de la concentration d'un polluant au sein d'un niveau trophique (Petersen & Hubbart, 2021; Bourgeon, 2023). Les microplastiques jouent donc un rôle important en tant que vecteurs de polluants dans les milieux aquatiques.

1.3.2 Les microplastiques véhiculent de la toxicité

Tout comme mentionné plus haut les plastiques sont des mixtures complexes de polymères couplés avec des additifs souvent toxiques. Lors de leur parcours dans l'environnement, les MPs vont être soumis à un tas de facteurs biotiques et abiotiques qui vont entraîner le relargage de ces molécules chimiques et l'adhésion d'autres. Pour mentionner quelques-uns de ces additifs, on peut retrouver les ignifuges bromés (BFRs, Brominated flame retardants), les phtalates, ou encore les bisphénols A pour les plus connus (Cverenkárová et al., 2021). Ces polluants sont classés comme perturbateurs endocriniens et très dangereux pour la santé humaine (Wright et al., 2013). Les MPs peuvent agir comme véhicule pour les Polluants Organiques Persistants (POPs) mais également pour les métaux lourds et des agents pathogènes humains potentiels (Pironti et al., 2021 ; Cverenkárová et al., 2021 ; Petersen & Hubbart, 2021 ; Wright et al., 2013).

Les POPs sont retrouvés dans les pesticides, les molécules chimiques servant à la fabrication industrielle, mais aussi tous les produits dérivés (Bourgeon, 2023). Ces molécules sont parmi les plus utilisées dans le monde industriel, mais comptent parmi les plus problématiques. Ce sont des molécules retrouvées dans presque tous les produits du quotidien, de la poêle à frire, aux cosmétiques, en passant par les produits d'entretien, les jouets et les emballages alimentaires. Il peut s'agir des HAPs (Hydrocarbures aromatiques polycycliques), des PFAS (polyfluoroalkylées), des DDT (Dichlorodiphényltrichloroéthane), des PCB (polychlorure bisphénols) pour ne citer que les plus connus (Bourgeon, 2023). Ils sont tous catégorisés comme extrêmement dangereux pour la santé humaine et

pour l'environnement, car leur durée de vie est très longue (voire éternelle). Ils peuvent s'accumuler dans les tissus et dans les compartiments environnementaux et pour certains augmenter leur toxicité avec le temps (Bourgeon, 2023). Plusieurs molécules ont déjà fait l'objet d'interdiction gouvernementale, mais elles restent toujours très présentes dans l'environnement et encore nombre d'entre elles sont encore utilisées (Pironti et al., 2021 ; Cverenkárová et al., 2021 ; Wright et al., 2013).

Beaucoup d'études ont prouvé que les plastiques permettent le transport de POPs (Koelmans et al., 2013). Les POPs sont extrêmement persistants dans l'environnement, non-dégradables et sont capables d'être transportés par plusieurs voies de transferts. Ces polluants peuvent s'adsorber sur les surfaces plastiques, car ces surfaces sont hydrophobes tout comme ces polluants organiques. Ils peuvent donc s'agglutiner à la surface du MPs et être véhiculés (Bourgeon, 2023). Ce sont donc les caractères hydrophobes et lipophiles de ces composés organiques qui permettent aux MPs de concentrer ces contaminants. La capacité des MPs à fixer les POPs est 2 fois plus élevée que pour les sédiments et jusqu'à 6 fois plus élevée que l'eau de mer (Rodrigues et al., 2019).

Cette accumulation de molécules toxiques rend les MPs extrêmement dangereux à la fois pour la biodiversité et pour la santé humaine. Le recyclage de ces objets pose aujourd'hui de grandes questions notamment sur leur capacité à relarguer des polluants pendant les processus de recyclage et après la conception du nouvel objet.

1.3.3 Les enjeux complexes du recyclage

Traditionnellement, le modèle industriel est linéaire, c'est-à-dire que des matières premières sont utilisées pour fabriquer un produit qui, une fois en fin de vie, devient un déchet (Conesa et al., 2021). Avec une population mondiale croissante, la quantité de matières premières utilisées augmente. Ce modèle a malheureusement engendré des impacts négatifs significatifs à la fois sur l'environnement social et naturel que nous connaissons aujourd'hui.

Pour répondre à cela, l'économie circulaire semble être une alternative durable et plus efficace pour gérer les ressources et améliorer nos conditions de vie sur Terre (Conesa et al., 2021). En plus de cela, le plastique recyclé permet une grande économie d'eau, d'énergie et de limitation des rejets de gaz à effet de serre (CO₂). En Europe, le taux de recyclage est de 32,5%, la valorisation énergétique représente 42,6% et 25% des déchets sont mis en décharge (Conesa et al., 2021).

Une économie circulaire pour les plastiques est possible si les plastiques disponibles sont propres et contiennent peu ou pas de substances préoccupantes. Comme mentionné précédemment, une fois dans l'environnement, le plastique a la capacité de se charger en polluants. La présence de ces substances nocives représente une difficulté supplémentaire dans le processus de recyclage. En effet, en raison de leur composition complexe en polymères et monomères, les objets plastiques sont difficilement recyclables (Conesa et al., 2021). Le problème réside aujourd'hui à la fois dans les quantités importantes de plastique présentes et les techniques de recyclage utilisées qui ne sont pas toujours efficaces et opérationnelles. Les plastiques contiennent des additifs et des polluants qui, lorsqu'ils interagissent entre eux et avec l'environnement, peuvent créer des sous-produits dangereux, ce qui constitue une des limites du recyclage des plastiques aujourd'hui (Hansen et al., 2014). Ces sous-produits peuvent se retrouver dans différents compartiments environnementaux (air, eau, sol, biote) et représenter des pollutions importantes. Pour un meilleur recyclage, il est important de prendre en compte les produits chimiques dangereux, mais cet aspect est souvent difficilement maîtrisable par les

infrastructures de recyclage. Les nouveaux produits de consommation en matière recyclée peuvent ainsi présenter un risque pour l'environnement et la santé en contenant des polluants très nocifs (Conesa et al., 2021).

L'hétérogénéité de la composition des plastiques empêche souvent leur tri et recyclage. Le recyclage est généralement induit par des processus thermiques qui exacerbent les effets toxiques des substances constituant le plastique (Alassali et al., 2021). Les difficultés de recyclage proviennent également des matériaux très sales (après avoir séjourné longtemps en mer, par exemple) qui arrivent au centre de recyclage. Ensuite, le matériel peut perdre des propriétés intéressantes lorsqu'il est soumis au processus de recyclage. Une fois le plastique recyclé, il peut être de nouveau altéré lors de son utilisation par le lavage, l'exposition à l'eau, aux UV, aux changements de température, et donc relarguer les composés chimiques et les polluants qui se sont accumulés à sa surface (Hansen et al., 2014 ; Alassali et al., 2021).

Le coût du recyclage est souvent un des principaux freins dans la lutte contre la pollution plastique. C'est un processus non profitable d'un point de vue économique pour les gouvernements et les pouvoirs publics (Williams & Rangel-Buitrago, 2022). Les pays du Sud, ne possédant pas les infrastructures pour le recyclage ni les moyens financiers nécessaires, sont les plus touchés par cette pollution. Le recyclage dépend également des bonnes pratiques des citoyens et citoyennes et de leur sensibilisation à cette problématique, ce qui peut représenter un frein (Williams & Rangel-Buitrago, 2022).

Les alternatives à l'enfouissement, pour la récupération des ressources comprennent le recyclage mécanique (primaire et secondaire), la récupération chimique (tertiaire) et la valorisation énergétique (quaternaire) (Hahladakis et al., 2018). Le recyclage primaire peut substituer les polymères vierges dans certaines applications, mais la variabilité des polymères et la contamination post-usage compliquent le recyclage en boucle fermée (Hahladakis et al., 2018). La plupart des déchets plastiques nécessitent un tri intensif pour produire un recyclat de haute qualité. Le recyclage secondaire transforme les plastiques usagés en applications matérielles différentes et souvent moins exigeantes.

En dépit de ces défis, la nécessité de comprendre et de gérer la présence des microplastiques dans l'environnement est cruciale. La quantification des MPs est une tâche ardue menée par la communauté scientifique depuis plusieurs années afin d'en comprendre les risques et les enjeux.

1.4 Les défis de la quantification

La quantification des microplastiques représente un énorme défi pour les scientifiques aujourd'hui. En effet, les résultats diffèrent énormément d'une étude à l'autre et la difficulté d'harmoniser à la fois les techniques d'échantillonnage et les techniques analytiques rendent les résultats difficilement comparables et fiables. Dans la publication d'Assoumani et al., (2020) il est mentionné que le consortium SAPEA (2019) a mis en évidence le nombre exponentiel d'études sur les microplastiques qui ont été publiées sans pour autant augmenter proportionnellement le niveau de connaissance sur ce sujet. Une analyse critique a été menée par Koelmans et al., (2019) mettant en lumière 9 critères de qualité dans l'analyse de 50 études sur les microplastiques. Ils dénoncent la pauvreté de ces études notamment du fait de l'absence de définition harmonisée du mesurande (définition de la notion de microplastique et des unités de mesure). La base de cette définition pour les MPs est leur taille, mais on peut aussi les définir par leurs formes et leurs natures. Pour la forme, 5 catégories sont

généralement utilisées selon les équipes de recherche : fragments, sphères, fibres, GPI et mousses (polystyrènes expansés ou autre polymère avec une structure cellulaire) (Assoumani et al., 2020). Mais on peut également ajouter la nature du polymère pour caractériser les MPs. Cependant, ces trois caractéristiques sont intrinsèques à la particule et ne suffisent parfois pas à définir un mesurande. La variabilité des protocoles d'échantillonnages et la définition des résultats en sont pour quelque chose (Assoumani et al., 2020).

1.4.1 L'échantillonnage : défis d'harmonisation

Pour l'échantillonnage, plusieurs techniques sont souvent utilisées par les scientifiques, ces techniques de prélèvement vont beaucoup dépendre des moyens disponibles (financiers, humains matériels), des conditions dans lesquelles on prélève et comment on souhaite analyser les échantillons par la suite. Pour le prélèvement de surface en eau continentale, les filets à plancton ou filets Manta peuvent être privilégiés. L'ouverture de maille, la profondeur et la durée d'exposition du filet vont conditionner et orienter les résultats (Assoumani et al., 2020). Ces techniques sont extrêmement dépendantes des conditions à la fois environnementales mais aussi humaines. Chaque prélèvement sera différent bien que l'on standardise les méthodologies, il est nécessaire d'en avoir bien conscience pour l'analyse des résultats ensuite. De plus, le choix du type d'échantillonnage pourra induire plusieurs traitements : tamisage, tris, nettoyage. Il est nécessaire pour l'analyse des MPs de prélever une grande quantité d'eau, car leur concentration est souvent diffuse et faible. Les techniques d'échantillonnage peuvent être résumées dans la figure 7 d'après Assoumani et al., (2020). Cependant, il faut noter que certaines techniques utilisent des matériaux polymères qui composent le plastique, comme certains filets fabriqués avec du nylon et parfois des flacons de collecte en polyéthylène. Ce type de matériaux engendre des risques de contaminations lors des prélèvements et de fausser les résultats attendus. Une vigilance accrue doit être apportée lors de ces manipulations et sur le matériel utilisé. De plus, d'après la figure 7, le manque de normalisation dans l'utilisation des filets et la différence des maillages utilisés empêchent la comparabilité des données quantitatives sur les concentrations en MPs retrouvées dans les milieux aquatiques (Assoumani et al., 2020).

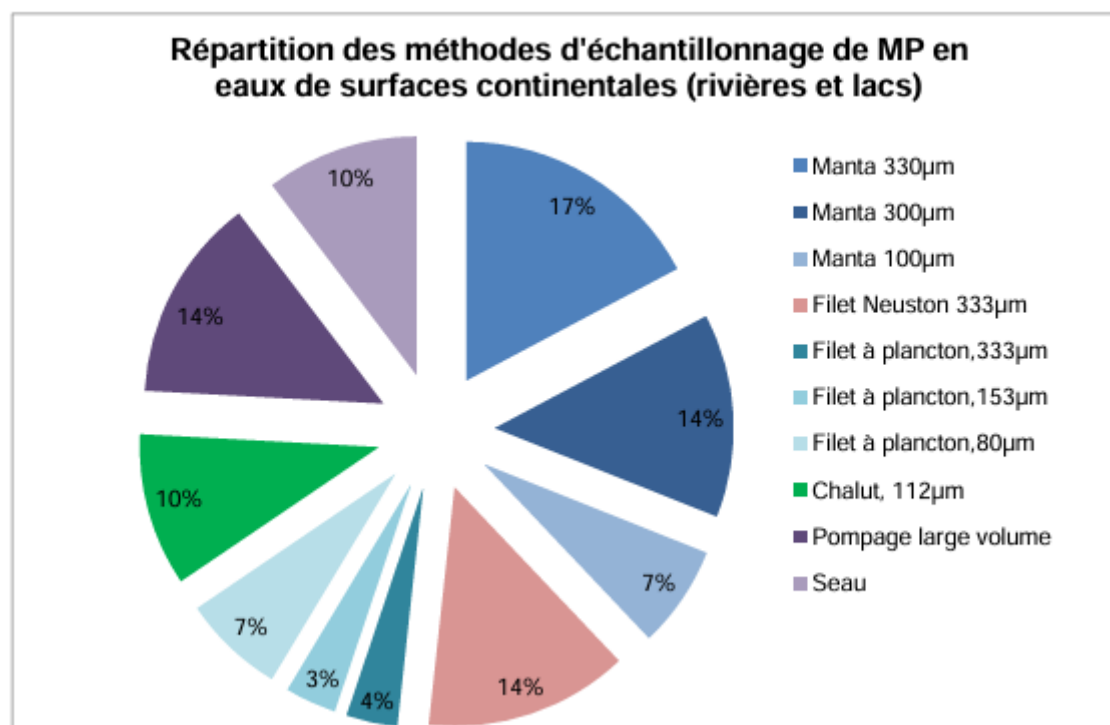


Figure 7 : Répartition des méthodes d'échantillonnage de microplastiques en eaux de surface continentales (d'après la revue de Koelmans et al. (2019)) (Assoumani et al., 2020).

Lors de l'utilisation des filets, il y a un grand nombre de facteurs à prendre en compte lors de l'échantillonnage. Notamment, la durée de l'échantillonnage, les caractéristiques d'écoulement de l'eau, les conditions météorologiques du jour, la quantité d'eau prélevée (par calcul). Mais aussi les caractéristiques du filet : ouverture, longueur, largeur, diamètre, maille, la profondeur du prélèvement, l'utilisation de produits pour éviter la contamination des échantillons (rinçage entre les prélèvements avec de l'eau ultra pure par exemple), le transfert des échantillons dans les récipients pour les stocker (Scherer et al., 2020). Il y a énormément de paramètres qui influencent l'échantillonnage et donc le type de résultats lors de l'étude de la concentration des microplastiques en milieu aquatique (Scherer et al., 2020).

La revue de Tirkey & Upadhyay, (2021) présente également les voies de contamination par le biais du port de vêtements non appropriés, il est inévitable que les fibres synthétiques de nos vêtements se retrouvent dans les échantillons à analyser. Pour éviter toutes les contaminations possibles par les vêtements et les équipements utilisés Tirkey & Upadhyay, (2021) proposent un contrôle de qualité pouvant réduire ces sources de contamination. Pour cela, il est indispensable d'utiliser du matériel en verre ou en métal non contaminé, pour cela les rincer avec de l'eau Milli-Q suivie de l'éthanol, est une solution proposée dans cette revue. Porter des vêtements en coton et protéger les échantillons de la contamination atmosphérique en les couvrant toujours avec une feuille d'aluminium, ou les conserver dans des récipients fermés en verre ou métal. Le plan de travail doit toujours être nettoyé avec de l'éthanol à 70 % et les boîtes de pétri peuvent être utilisées ouvertes comme contrôle pour analyser la contamination de l'air ambiant (Tirkey & Upadhyay, 2021).

Les techniques d'échantillonnage des microplastiques sont variées et dépendent des ressources disponibles et des conditions spécifiques de prélèvement et du milieu prélevé. Malgré les efforts de standardisation, chaque prélèvement reste unique, influencé par divers facteurs

environnementaux et humains, et présente évidemment des risques d'être contaminé. Cette diversité des protocoles induit forcément une pluralité dans les techniques d'analyse effectuées ensuite.

1.4.2 Les techniques d'analyse

La diversité des formes, des tailles et des compositions chimiques des microplastiques (MPs) rend difficile l'élaboration d'un protocole universel pour leur détection optimale. Selon plusieurs études récentes, la spectroscopie infrarouge par transformée de Fourier (FTIR) est la méthode la plus fiable pour identifier et quantifier les MPs (Dabboub, 2023). Il s'agit de la technique la plus couramment utilisée pour cette analyse, permettant d'identifier automatiquement les différents MPs présents sur une membrane de filtre sans avoir à les trier au préalable. Cette méthode a considérablement réduit le temps d'analyse et augmenté l'exactitude des résultats obtenus (Dabboub, 2023). La FTIR permet d'analyser toutes les liaisons chimiques des plastiques pour identifier les différents polymères. Cette technique est largement utilisée dans la littérature scientifique (Scherer et al., 2020 ; Rodrigues et al., 2018 ; Koelmans et al., 2019 ; Tirkey & Upadhyay, 2021 ; Chen et al., 2020 ; Mintenig et al., 2017 ; Jung et al., 2018 ; Li et al., 2018). Il est essentiel, lors de l'utilisation de toute technique analytique, de réaliser un blanc pour détecter la présence de microplastiques dans l'air et les liquides de rinçage (eau ultrapure, eau déminéralisée). Pendant l'analyse et l'échantillonnage, les microfibrilles présentes dans l'air constituent une source majeure de contamination des échantillons, pouvant entraîner une surestimation de la densité de MPs présents (Mendoza & Balcer, 2019).

Il existe deux formes de FTIR : la micro-FTIR et la FTIR en mode réflectance totale atténuée (ATR), décrites ci-dessous :

- μ -FTIR

Les particules plus fines nécessitent l'utilisation d'un microscope couplé à la FTIR (micro-FTIR). Le μ -FTIR est équipé d'une matrice plan focal (FPA) qui permet d'analyser et d'identifier automatiquement une large gamme de polymères en un temps record de moins d'une dizaine d'heures, contre plusieurs jours pour les anciennes techniques (sur un filtre de 47 mm de diamètre) (Chen, 2020). La FPA augmente également la précision des résultats. Cette technique nécessite des échantillons suffisamment fins, inférieurs à 100 μ m ; cependant, des échantillons trop fins (inférieurs à 5 μ m) peuvent poser des problèmes de sensibilité de détection. Elle est plus adaptée pour des analyses détaillées et quantitatives. Les échantillons sont d'abord filtrés pour concentrer les microplastiques sur une membrane filtrante. La membrane est placée sous le microscope μ -FTIR, et le FPA capture les images spectrales, permettant d'analyser chaque microplastique. Les spectres infrarouges individuels des microplastiques peuvent ensuite être comparés à une base de données pour les identifier (Mintenig et al., 2017).

- FTIR - ATR

Cette méthode permet d'obtenir des informations sur les liaisons chimiques des échantillons, déterminant ainsi la composition polymérique des microplastiques (Dabboub, 2023). L'analyse est spécifique à l'identification des matériaux en surface des échantillons. Les microplastiques extraits sont directement déposés sur le cristal ATR. Un faisceau infrarouge est dirigé à travers le cristal, et la lumière réfléchie est analysée pour obtenir le spectre infrarouge de l'échantillon (Reis de Carvalho, 2021 ; Jung, 2018 ; Dabboub, 2023).

J'ai choisi de détailler ces deux méthodes d'analyse, car elles sont les plus couramment utilisées dans les articles scientifiques. Il existe également des techniques moins coûteuses, comme l'analyse par tamisage suivie d'un comptage au microscope, bien que cette méthode soit chronophage selon la taille des échantillons. Cette technique est mieux adaptée aux matrices sédimentaires telles que le sable. On peut également effectuer une séparation par flottaison après filtration de la matrice aquatique, puis analyser au microscope. Ces techniques permettent de connaître la densité des MPs, mais pas leur nature. D'autres méthodes, comme la spectroscopie Raman, les techniques chromatographiques ou l'analyse thermogravimétrique, ont également été utilisées, mais elles ne sont pas aussi répandues dans la communauté scientifique (Horton et al., 2017).

Le choix de différentes techniques d'analyse entraîne une pluralité des résultats et des unités associées.

1.4.3 Les types de résultats

Autant que les techniques d'échantillonnage les résultats obtenus dans la littérature scientifique varient beaucoup et notamment à cause de l'unité choisie par les scientifiques pour exprimer la quantité de microplastiques. En effet, il est souvent choisi d'exprimer les résultats en nombre de particules ou bien en poids par unité de mesure dans un solide, un liquide ou sur une surface. La variabilité dans l'expression des résultats à la suite d'analyses de MPs rend difficile la comparaison voire impossible. D'après Assoumani et al., (2020) L'unité d'expression des résultats ne doit pas être biaisée par une extrapolation trop grande. L'unité choisie dépend de la technique d'échantillonnage utilisée. S'il s'agit d'échantillon en vrac la densité de MPs devra se rapporter en nombre/L car les prélèvements n'excèdent généralement pas 100L. Alors que la densité des échantillons de filet est exprimée en nombres/m³ nous conseillent Mendoza & Balcer, (2019). De plus ces auteurs interpellent sur le fait d'extrapoler les résultats d'un échantillonnage sur une plus grande unité de surface ou de volume et que cette extrapolation surestime souvent la densité de MPs alors présent dans cet environnement. Il est difficile de rapporter un nombre de MPs retrouvés dans un échantillon de 300 mL d'eau à plusieurs mètres cubes. Les valeurs sont alors trop élevées et ne font pas fi de la réalité. En plus de cela, ces extrapolations peuvent induire un.e lecteur.ice en erreur face aux vrais résultats de l'échantillon prélevé (Mendoza & Balcer, 2019 ; Rodrigues et al., 2018 ; Assoumani et al., 2020).

L'association de la pagaie sauvage a réalisé un tableau (tableau 1) regroupant des résultats provenant de leurs campagnes de prélèvement et d'articles scientifiques avec les différentes méthodes utilisées. Ce tableau de résultats ne permet pas du tout de comparer les concentrations de microplastiques du fait de la variété des méthodes d'échantillonnage utilisées et des types d'analyses réalisés. De plus, on peut bien voir les ordres de grandeur des résultats très disparates (La Pagaie Sauvage, s. d.). La standardisation des méthodes à la fois analytiques et d'échantillonnage est absolument nécessaire afin de pouvoir comparer la quantité de MPs présente dans un environnement. Les conditions dans lesquelles les prélèvements sont réalisés devraient également être reportées afin de comprendre les influences sur les résultats d'un échantillon à l'autre parfois sur le même site.

Tableau 1 : Tableau des résultats résumés par la pagaie sauvage sur différentes études (La Pagaie Sauvage, s. d.).

Concentrations en MPs/m ³ des cours d'eau en France, Europe et dans le monde					
Cours d'eau	Min	Max	Moyennes	Méthodes	Sources
Garonne	0	1,43	0,12	Filet Manta Pas de traitement	La Pagaie Sauvage, 2020
Adour	0,01	0,81	0,27	Filet Manta Méthode NOAA	La Pagaie Sauvage, 2020
Seine	0,28	0,47		Filet Manta Filtration sur papier de verre	Dris et al. 2017
Rhin	1	20		Filet Manta Traitement enzymatique Séparation par densité	Mani et al. 2015
Gave de Pau			3,34 ± 0,20	Filet Manta Méthode NOAA Pas de séparation par densité	Bruges et al. 2020
Baie de Douarnenez 11 cours d'eau	0,04	0,83	0,30	Filet B.A.S.A Méthode NOAA	EPAB, La Pagaie Sauvage, 2020
Estuaire de la Tamar Angleterre		0,04		Filet Manta Sans traitement	Sadri et al. 2014
Danube		141	0,9	Sans traitement Séparation par densité	Lechner et al. 2014
Aufibe Italie	1	13		Méthode NOAA	Campanale et al. 2019
Aufibe Italie	1	13		Méthode NOAA	Campanale et al. 2019
Fleuve Los Angeles			9	Filet Manta	Moore et al. 2011
Fleuve San Gabriel			153	Sans traitement	
Rivière de Saïgon (Vietnam)	10	220		Filet maille 300 µm Traitement oxydatif Séparation par densité	Lahens et al. 2018

Le tableau des résultats des études sur les microplastiques est extrêmement varié voire complexe à analyser et comparer. La distribution des microplastiques dans l'environnement n'est pas uniforme et malgré les études réalisées on ne peut encore tirer de conclusion claire sur leur comportement au sein des matrices environnementales. Cet aspect rend ainsi difficile l'échantillonnage

et donc l'interprétation des résultats qui peuvent varier de quelques dizaines à plusieurs centaines de MPs suivant l'unité, la matrice d'échantillonnage, et la technique analytique choisie.

1.5 Conclusion

Cette première partie d'état de l'art explore en profondeur les défis environnementaux associés au plastique. Ces particules représentent aujourd'hui un défi majeur pour la santé environnementale et humaine influençant drastiquement les écosystèmes marins et terrestres à l'échelle planétaire. Ces débris plastiques sont omniprésents, de taille, de nature et de composition chimique variés. De plus ces particules se propagent très rapidement et facilement à travers les différents compartiments environnementaux dans les milieux terrestres et aquatiques et au sein même des organismes vivants pouvant causer des dommages irréversibles. Ils transportent avec eux leur lot de substances toxiques et de polluants qui peuvent s'adsorber à leur surface et être transportés dans les chaînes alimentaires. Leur dangerosité est de plus en plus étudiée mais reste encore un aspect flou et difficilement quantifiable.

Les effets des microplastiques sur les écosystèmes sont très variables allant des impacts physiques tels que des abrasions internes, des blocages digestifs et/ou respiratoires à la contamination chimique par des polluants ultra toxiques. Leurs effets sont multiples et posent de graves soucis sur la santé humaine lorsque les polluants s'accumulent dans les animaux disponibles à la consommation humaine. Ces particules posent de grands défis environnementaux. A cela s'ajoute le recyclage, bien qu'indispensable pour promouvoir un modèle d'économie circulaire plus durable, il advient aujourd'hui que le recyclage des plastiques entraîne des problèmes de contamination et est entravé par la complexité de leur composition chimique. Les techniques actuelles de recyclage ne parviennent pas toujours à éliminer efficacement ces substances dangereuses, ce qui limite leur efficacité à long terme pour la réduction de la pollution plastique.

Enfin, la quantification précise des microplastiques reste un défi majeur pour la recherche scientifique, en raison de la diversité des méthodologies d'échantillonnages et d'analyses utilisées. La standardisation des protocoles d'échantillonnages et d'analyse est essentielle pour améliorer la comparabilité des données et l'exactitude des résultats, tout en minimisant les risques de contamination croisée assurant la fiabilité des études sur les MPs.

En conclusion, à l'échelle globale bien que les défis posés par les microplastiques soient nombreux et complexes, il est impératif de continuer à développer des stratégies de gestion et de réduction efficaces pour limiter leur impact sur l'environnement et la santé humaine. Une collaboration internationale et interdisciplinaire est nécessaire pour assurer un niveau de connaissances suffisant sur les MPs et pouvoir prendre des décisions efficaces et assurer la bonne santé des écosystèmes terrestres et aquatiques allant de pair avec celle de la population.

A l'échelle locale, il est essentiel de continuer la recherche pour améliorer la connaissance et la quantification des microplastiques dans les fleuves et rivières. C'est l'objectif des protocoles proposés par le bureau d'étude TEO dans le cadre des projets BUL'STOP et MICR'EAU. Le sujet de ce présent mémoire a pour but l'analyse critique des protocoles correspondant aux outils utilisés dans le cadre du suivi des concentrations et des flux de microplastiques dans les cours d'eau.

2 Analyse critique des protocoles d'utilisation des outils microplastiques, premiers résultats, enjeux, et limites

Les estuaires constituent des puits de microplastiques mais peuvent également jouer le rôle de source et de voie de transfert des MPs. Les dynamiques hydrologiques des estuaires étant si particulières il est très difficile encore aujourd'hui d'affirmer leur rôle dans les dynamiques de plastiques (Tramoy et al., 2020). En plus d'être un environnement aux dynamiques singulières les estuaires se présentent comme des écosystèmes les plus productifs du monde d'un point de vue biologique. Cette productivité entraîne un intérêt grandissant pour les activités anthropiques qui s'y sont installées au fil des années (Tramoy et al., 2020). Ces écosystèmes ont une valeur économique importante pour les sociétés humaines. Des pêcheries, des stations d'épuration des eaux usées, des centrales nucléaires, des ports et des propriétés résidentielles ont pu s'implanter sur les estuaires et les rendre vulnérables à la pollution plastique. La distribution des MPs dans ces eaux dépend surtout du gradient de salinité et de la turbulence couplée à d'autres facteurs environnementaux (vent, pluie, crue) qui vont influencer leur dynamique. Ainsi étant donné ces facteurs, le comportement des MPs dans un estuaire sera très variable d'un point de vue spatial et temporel. Il est donc essentiel aujourd'hui d'amener des études afin de mieux comprendre ces dynamiques et de pouvoir remonter aux sources des déchets pour permettre aux pouvoirs publics d'agir efficacement dans la lutte contre le plastique (Malli et al., 2022).

C'est dans ce contexte de réflexion autour des microplastiques que TEO a développé deux projets et outils : le déflecteur à bulles (projet : BUL'STOP), et le support 3 filtres (projet : MICR'EAU). L'enjeu de ce mémoire est double : participer à la définition et à la standardisation des protocoles liés à ces outils d'une part, et apporter un regard critique sur leur mise en œuvre d'autre part. Pour ce faire, nous étudierons dans un premier temps le contexte général dans lequel s'inscrivent ces dispositifs, puis nous verrons une présentation détaillée des outils techniques utilisés. Ensuite nous étudierons les terrains d'application dans lesquels les outils ont été mis en place et les premiers résultats obtenus pour ensuite discuter des limites et des préconisations pour l'utilisation de ces outils dans les projets de TEO.

2.1 Contexte

Depuis maintenant quelques années TEO s'est détaché de la vision centrée sur le littoral pour se déplacer sur les fleuves et estuaires. C'est dans cette idée-là que TEO propose de coordonner un Observatoire Régional de la pollution plastique en Nouvelle Aquitaine (figure 8). Deux enjeux majeurs : compiler les données d'un réseau d'acteurs partenaires d'une part, et créer des outils qui servent d'indicateur de la pollution microplastiques d'autre part. TEO a aujourd'hui deux cibles d'études les microplastiques et les macroplastiques. Sur les MPs TEO a mis en place 2 projets expérimentaux BUL'STOP et MICR'EAU détaillés dans le schéma figure 9.

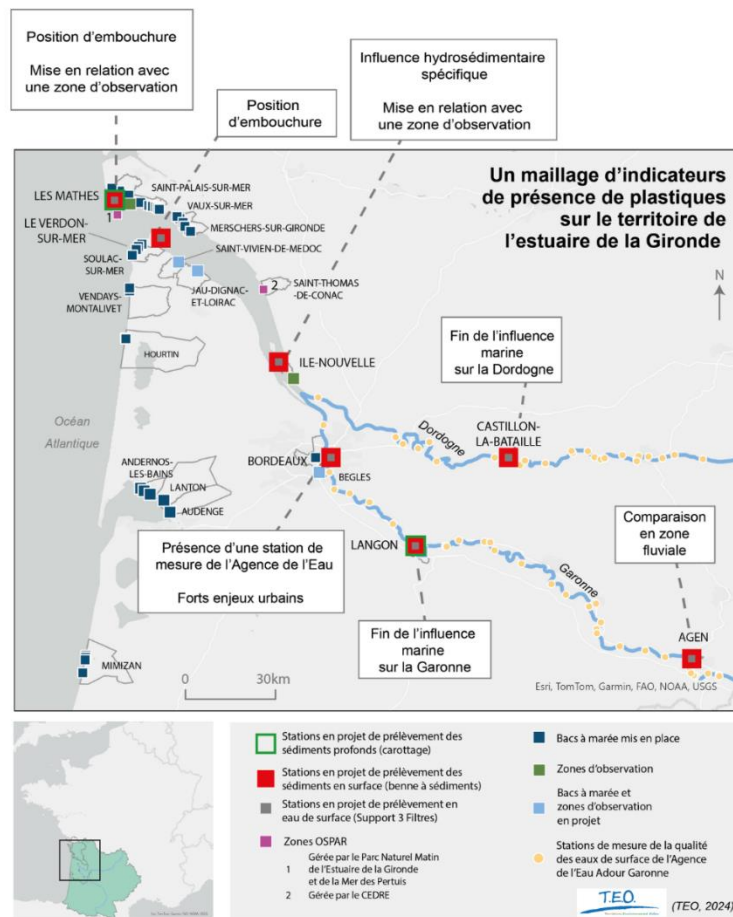


Figure 8 : Cartographie du maillage d'indicateur de la présence de plastique sur le territoire de l'estuaire de la Gironde (TEO, 2024).



Figure 9 : Schéma résumant le contexte dans lequel s'inscrit ce mémoire et les projets de TEO associés (Durand, 2024).

En 2022 l'agence de l'eau Loire et Bretagne lance un Appel à initiative (AAI) pour la lutte contre les macrodéchets plastiques. La SCIC TEO se présente comme porteur du projet « BUL'STOP » avec l'aide scientifique du laboratoire d'analyses QUALYSE ainsi que du Laboratoire Littoral Environnement et Sociétés (LIENSs) de La Rochelle. Le projet « BUL'STOP » a pour objectif la compréhension et la réduction des flux de déchets plastiques sur l'exutoire d'eaux pluviales du Port de Plaisance de La Rochelle, ainsi que l'interception des déchets par la porte éclose du Gabut. Le dispositif innovant opérationnel et multi partenarial nommé « barrage à bulles » (renommé « déflecteur à bulles » aujourd'hui) servira d'outil d'indicateur de pollution plastique. Ce projet s'inscrit également dans une démarche de réduction des phénomènes d'eutrophisation¹ et des nuisances sonores causées par les travaux portuaires et maritimes. Ce dispositif permet également la libre circulation des bateaux sur les voies navigables. TEO souhaite aujourd'hui utiliser ce dispositif sur les cours d'eau et le coupler avec le support trois filtres (outil développé dans le projet MICR'EAU). Ce double protocole, associant les deux outils, permettrait de définir s'il peut y avoir une corrélation entre la quantité de macrodéchets et de microplastiques. Et, dans une analyse plus poussée de démontrer si le type de polymère des

¹ L'eutrophisation correspond à l'apport d'une quantité excessive de nutriments dans l'eau engendrant la multiplication de certaines algues obstruant le passage de la lumière et consommant tout l'oxygène disponible dans le milieu ce qui engendre l'asphyxie de l'écosystème (Pollutec, 2023).

microplastiques retrouvés correspondrait aux types des débris plastiques plus imposants présents dans l'environnement étudié.

Cette approche microplastique fait parfaitement écho aux engagements du SDAGE 2022-2027 Adour Garonne concernant l'amélioration des connaissances sur les sources des microplastiques, et les flux atteignant le milieu marin par les fleuves. Ainsi que les impacts de ces derniers sur les écosystèmes continentaux, littoraux et estuariens, ainsi que la santé humaine.

Le bureau d'études coopératif TEO, porte le projet MICR'EAU en lien avec le laboratoire QUALYSE et l'Université de La Rochelle. Il propose d'assurer une surveillance environnementale, au travers d'un réseau de stations de prélèvements de microplastiques, réparties sur le territoire de l'estuaire de la Gironde. Ce projet propose de réaliser des analyses à la fois des sédiments et de l'eau en effectuant un prélèvement par saison. Soit 4 prélèvements par an au total sur plusieurs sites-pilotes de l'estuaire de la Gironde. La saisonnalité influence à la fois les activités humaines et les mécanismes physiques au sein de l'estuaire. Sa prise en compte dans l'étude permet d'étudier la distribution temporelle des flux et des stocks de microplastiques au sein de l'estuaire de la Gironde. Pour cela TEO a développé l'outil support trois filtres qui permet de filtrer une grande quantité d'eau directement sur le terrain.

La description et l'analyse critique des protocoles d'utilisation de ces deux outils seront développées dans les parties suivantes.

2.2 Présentation technique des outils microplastiques

2.2.1 Déflecteur à bulles

Le déflecteur à bulles est un système qui a été mis en place pour la première fois en 2019 à l'une des sorties des canaux historiques dans la rivière IJ de la ville d'Amsterdam. Appelé « The Great Bubble Barrier », le dispositif a pour but de nettoyer l'eau et d'empêcher les déchets plastiques des canaux de se déverser dans la mer du nord. « The Great Bubble Barrier » marche 24/7 et est alimentée par un compresseur électrique qui utilise de l'énergie renouvelable. 4 tonnes de déchets plastiques ont été récupérées en 5 ans. La faisabilité de ce projet a été prouvée et déployée dans d'autres villes comme au Portugal ou dans d'autres parties des Pays-Bas (« Bubble Barrier Amsterdam », s. d.).

Sur ce modèle TEO souhaite développer une version de la « Great Bubble Barrier » appelée « déflecteur à bulles » car ne faisant pas office de barrage pour les déchets plastiques mais plutôt de courant permettant d'orienter les déchets vers un point stratégique.

Le déflecteur à bulles est un système permettant de réduire le nombre de déchets plastiques dans un cours d'eau. On lui distingue 3 parties importantes :

- Le **tuyau** : celui-ci génère le rideau de bulles, il est situé au fond du cours d'eau. Il doit être orienté en fonction des conditions du cours d'eau (la vitesse de celui-ci, la profondeur ou encore la taille). Il est constitué de diffuseurs d'air permettant d'éjecter des bulles d'air. Le tuyau est percé tous les 10cm de trous d'un diamètre de 1mm environ (figure 11). Ce tuyau est associé à un tube en inox à l'intérieur pour être lesté au fond du cours d'eau. Voici les caractéristiques de ces derniers :

- Tuyau : 25m et 12,5kg
- Hauban : 15m et 9kg

Un premier prototype de tuyau lesté (figure 20) avec une chaîne fixée à l'extérieur du tuyau a été créé en 2023 avec les caractéristiques suivantes (il s'agit de 2 tuyaux connectés) :

- Tuyau : 2 x 20m
 - Chaîne : 30m
 - Poids total de 46,5kg
- Le **réceptacle à déchets aquatiques** : celui-ci récupère les déchets plastiques déviés par le rideau de bulles. Il est généralement situé sur l'une des rives, mais il peut aussi être positionné dans le cours d'eau (tout dépendra de la manière dont on voudra le vider). Il a la forme de la coque d'un semi-rigide avec un filet d'environ 1m de profondeur et la surface totale ferait 10m² (figure 11). On peut également penser à collecter les déchets avec une épuisette par les berges ou dans un engin nautique.
 - Le **compresseur d'air** : celui-ci récupère l'air de surface, le comprime puis le transmet au tuyau. Il doit être alimenté en énergie électrique ou thermique pour fonctionner (figure 11).

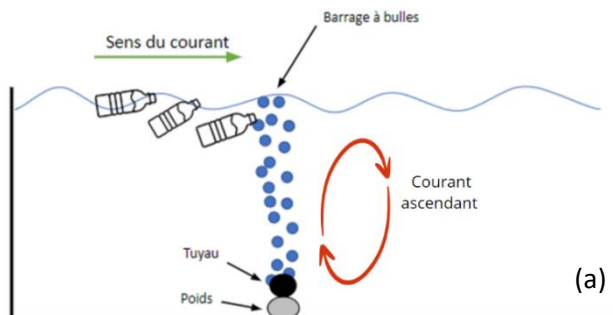


Figure 10 : (a) schéma du fonctionnement du déflecteur à bulles (TEO, 2024), (b) deuxième prototype du déflecteur à bulles en fonctionnement à la darse du vieux port (bassin des Yachts) de La Rochelle (N. Durand).

Le fonctionnement du dispositif est assez simple. Tout d'abord, le compresseur d'air récupère l'air ambiant, le comprime, puis le transmet au tuyau préalablement troué par la présence des diffuseurs d'air. L'air va alors continuer son cheminement dans celui-ci. Se faisant, lorsque l'air arrive au niveau des diffuseurs, une partie est éjectée du tuyau pour être transmise dans l'eau du bassin : cela génère alors les bulles. Celles-ci sont produites en quantité suffisante grâce au bon nombre de

diffuseurs et de la bonne gestion de la puissance désirée : cela forme alors la barrière de bulles. Ces dernières permettent ensuite d'entraîner une partie des déchets se situant dans la colonne d'eau vers la surface par un courant ascendant (figure 10). Ainsi, les déchets, présents désormais à la surface, sont alors poussés dans la direction désirée par le courant et par l'orientation de la barrière de bulles, et ce, jusqu'au réceptacle où les déchets sont récupérés (figure 11).

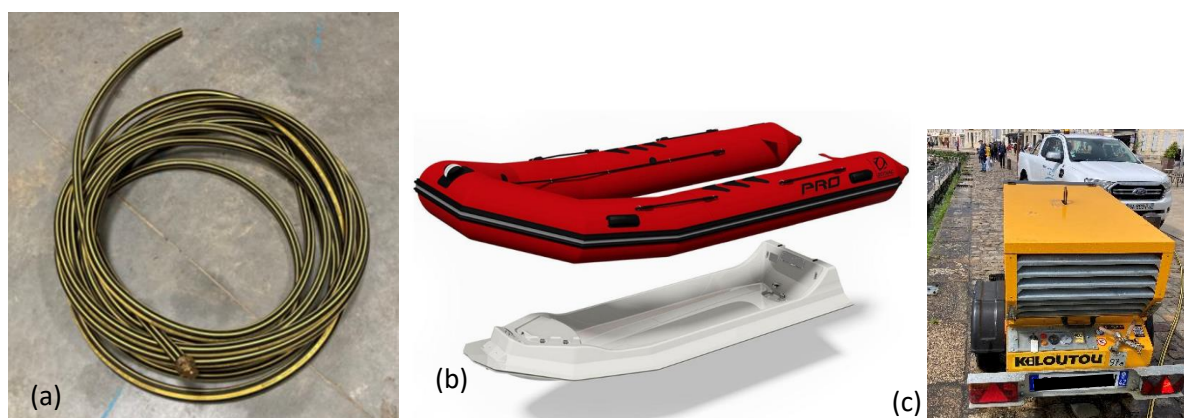


Figure 11 : matériels utilisés pour l'utilisation du déflecteur à bulles. (a) tuyau de 25 mètres de long (second prototype), (b) réceptacle à déchets aquatiques (TEO, 2024), (c) le compresseur d'air (Durand, 2024).

L'investissement financier pour le dispositif du déflecteur à bulles s'est élevé à quelques milliers d'euros et est considéré raisonnable par la structure TEO au vu de l'enveloppe financière de l'agence de l'eau. Le coût du fonctionnement représente une part importante du financement car le coût énergétique est élevé lors de la mise en marche du déflecteur à bulles. Le coût humain est lui aussi important et plus complexe que prévu, au moins deux personnes sont nécessaires et du personnel qualifié peut être obligatoire suivant les situations.

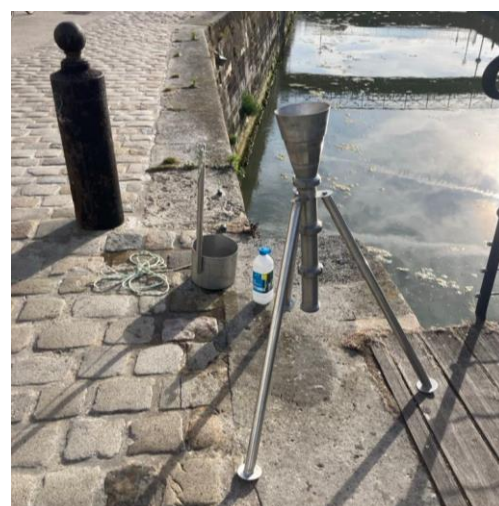
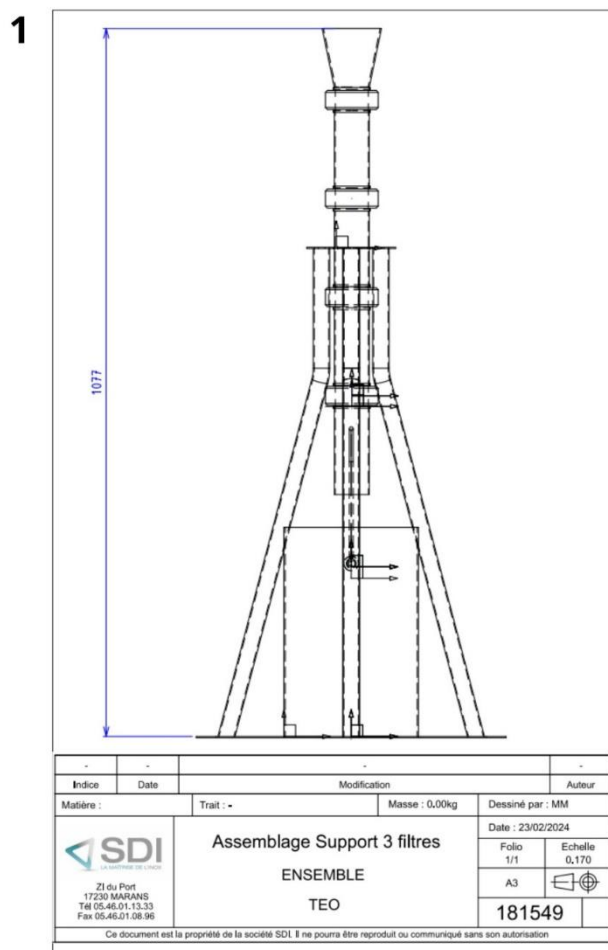
2.2.2 Support trois filtres

Il s'agit d'un outil conçu par Fabrice Faure et Arno Bringer, totalement en inox et réalisé dans le but d'effectuer des prélèvements d'eau directement sur le terrain. C'est un outil réalisé en partenariat avec le laboratoire d'analyse QUALYSE et TEO, c'est donc QUALYSE qui assure l'analyse des échantillons par FTIR.

C'est une structure en inox de 1 mètre de haut, montée sur 3 pieds et composée de 4 tubes emboîtés les uns aux autres et séparés par des membranes filtrantes en inox. Trois filtres sont disposés entre chaque tube avec des porosités variables de 1 millimètres, 350 micromètres puis 100 micromètres. Ces filtres font entre 35 et 40 mm de diamètre, ce qui correspond à la circonférence du tube. Le haut du support a une forme d'entonnoir et contient une maille de 5mm de diamètre directement soudée sur la structure. Il est conçu pour n'échantillonner que les microplastiques (taille inférieure à 5mm). Les tubes sont attachés les uns autres par des bagues vissées qui permettent facilement de les désolidariser et de récupérer les filtres. Chaque tube est équipé de joint en acier pour assurer une étanchéité totale du support.

Le support est accompagné d'un seau en acier de 10 litres et d'un seau de 5L équipé d'un manche extensible pouvant faire jusqu'à 2m pour prélever l'eau de surface depuis une berge, un ponton, ou un bateau. Tous ces équipements sont en inox, un acier inoxydable qui permet de réduire les contaminations plastiques, de limiter la corrosion et qui est facilement nettoyable.

Le support trois filtres permet de prélever et de filtrer 10 litres d'eau sur le terrain. Cet aspect évite les contaminations et permet de gagner du temps sur les analyses en laboratoire. Le fait de filtrer 10 L d'eau permet également d'avoir des analyses plus robustes car l'échantillon prélevé est plus grand.



(b)

(a)

Figure 12 : (a) Schéma du modèle d'assemblage du support trois filtres (TEO, 2024), (b) le support trois filtres pendant son utilisation sur le Quai Maubec (La Rochelle) (Durand, 2024).

L'investissement pour la construction de ce dispositif est revenu à environ 1500 € pour TEO, un coût très raisonnable au vu de son utilisation très simple. Le coût majoritaire de son utilisation revient dans les coûts de l'analyse à posteriori en laboratoire par QUALYSE.

2.3 Terrains d'applications et résultats

2.3.1 Présentation des sites d'études

Les expérimentations que j'ai réalisé tout au long de ce stage ont toujours été accompagnés de Fabrice Faurre, cogérant de TEO qui a imaginé ces dispositifs pour quantifier la pollution plastique et dans un but d'harmonisation des protocoles.

- Déflecteur à bulles

Le port de plaisance de La Rochelle est un site d'étude assez propice pour ces tests. En effet, les démarches pour pouvoir accéder aux différents sites voulus sont fluides. TEO est un bureau d'études connu et travaille avec un grand nombre de partenaires, à la fois avec l'université et des acteurs du territoires comme le port de La Rochelle. C'est un port communal qui peut accueillir 5000 navires de plaisance (TEO, 2024).

○ Site 1

Le projet BUL'STOP a pour but d'intercepter les déchets par la porte écluse du Gabut (figure 13) et ceux présents au déversoir du bassin des Yachts (figure 14, 15). Le port de plaisance de La Rochelle fait face à un défi constant d'amoncellement de déchets plastique. Pour cela une brigade bleue a été initiée afin de nettoyer régulièrement les eaux du port. L'association Echo mer créée il y a 20 ans travaille de concert avec le port de plaisance. Elle s'inscrit également dans la lutte contre les pollutions marines en mettant en place depuis le printemps 2020 l'action « EPUISE TON DECHET ». Trois fois par semaine, une équipe de bénévoles prête main forte à la Brigade Bleue du port, et collecte les déchets des bassins à flot du centre-ville (*Les interventions pédagogiques que nous proposons, s. d.*). Dans un souci de lutte active contre la pollution plastique le port de plaisance de La Rochelle devient le terrain d'expérimentation parfait pour le déflecteur à bulles de TEO. L'implantation du dispositif à cet endroit fait face à une problématique ultra locale mais qui s'étend à l'ensemble des ports. Le but de l'installation du projet à cet endroit permettrait de limiter l'apport et la sortie de déchets dans le port et de pouvoir les intercepter (figure 16).



Figure 13 : Image satellite de la situation géographique du pont levant du Gabut (Google earth, 2024).

○ Site 2

L'idée ici est de placer le déflecteur à bulles au niveau du ponton Y4/Y5 proche de l'exutoire des eaux pluviales de la darse du vieux port dans le bassin des Yachts (figure 14). Il s'inscrit dans le but de limiter le flux de déchets urbains emportés par les pluies. Cet exutoire est déjà équipé d'un filet pour récupérer les déchets mais les problèmes de colmatage du filet le rendent compliqué à entretenir et sa maintenance nécessite des moyens humains importants (editeur_port, 2021) (figure 15).

Nous avons testé le nouveau prototype amélioré de déflecteur à bulles le 18 juin 2024. Cet endroit du port contenait beaucoup d'algues accumulées ainsi que des déchets (mégots de cigarettes, canette en aluminium, emballage plastique...) (figure 15). De plus, les vents dominant ouest de La Rochelle entraînent une accumulation des résidus plastiques flottant et des algues présentent à la surface de l'eau. Ce coin du bassin des Yachts est donc bien propice à l'accumulation de déchets plastiques et donc à la mise en place du dispositif.

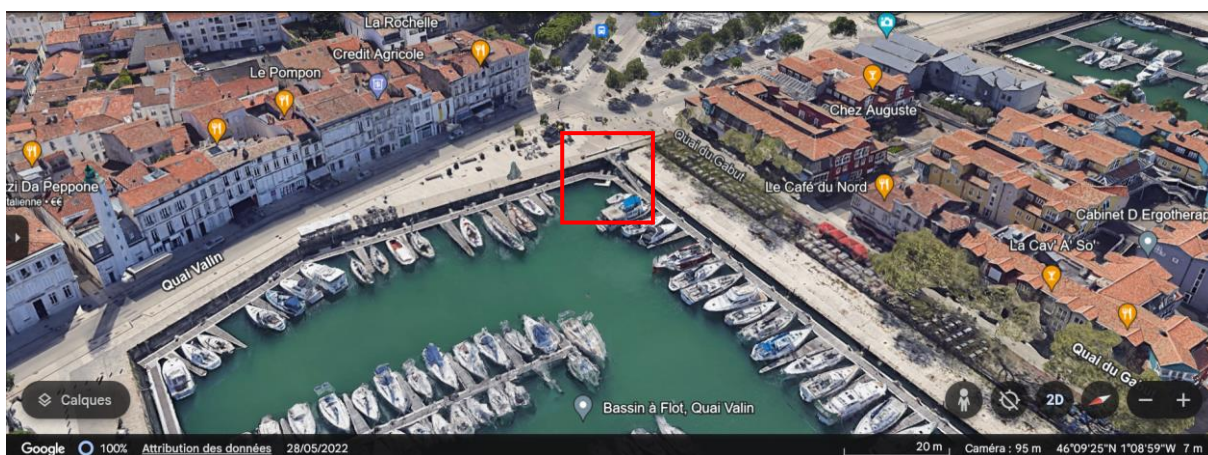


Figure 14 : Image satellite de la situation géographique de la Darse du vieux port à l'exutoire des eaux pluviales (Google earth ; Durand, 2024).



Figure 15 : Photo de la darse du vieux port et son accumulation de déchets et d'algues au niveau du déversoir d'eaux pluviales (Durand, 2024).

○ **Site 3 :**

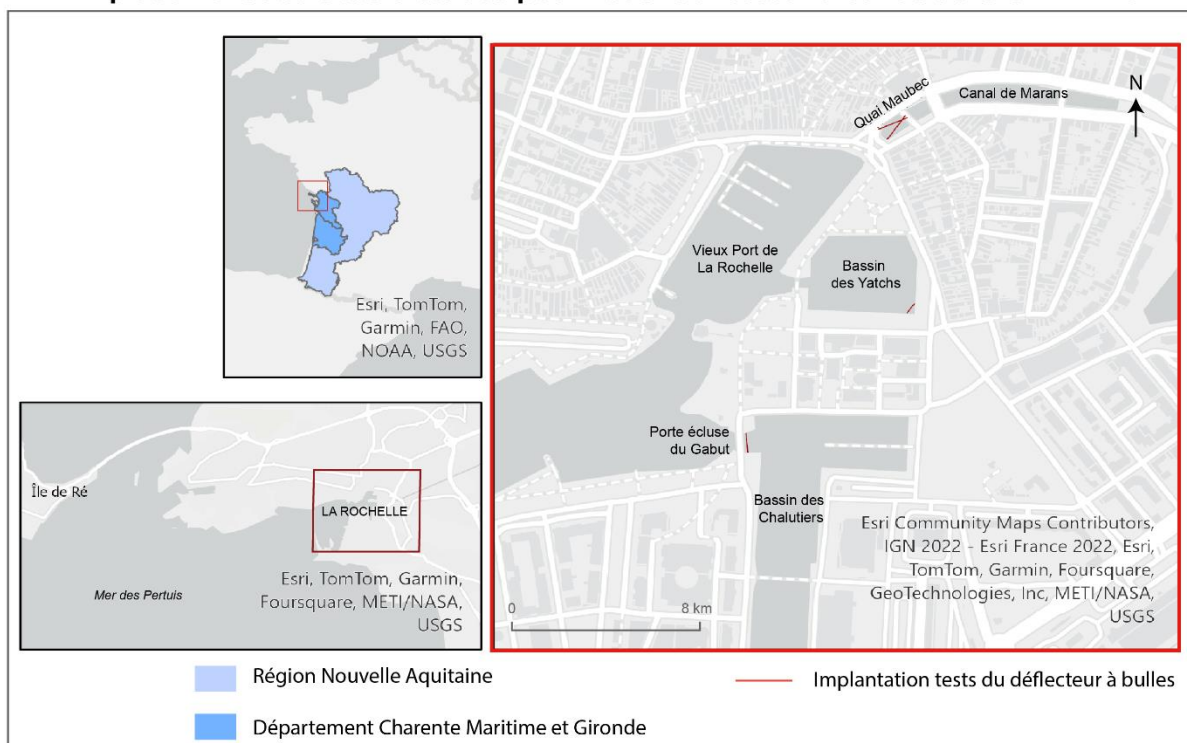
Une expérimentation a fait l'objet d'une matinée de test le 5/07/2024 sur le canal de Marans à la porte écluse Maubec lors de la vidange d'une partie du canal.

Le projet de canal de Marans ou canal de Rompsay reliant La Rochelle à son arrière-pays a débuté au 18^e siècle pour améliorer l'écoulement de l'eau dans le Marais poitevin et désenvaser le port de La Rochelle. Le canal est vidangé plusieurs fois dans le mois en fonction des cycles de marée. Cette vidange est principalement réalisée pour désenvaser le canal. Il s'agit d'une technique « plus naturelle » pour réduire l'envasement du cours d'eau. L'autre solution revient à draguer le cours d'eau à l'aide de machine. Une solution beaucoup plus invasive et impactante pour la biodiversité et très coûteuse. Ainsi la ville de La Rochelle continue régulièrement de vidanger le canal de Marans par la porte écluse de Maubec pour faire face au phénomène d'envasement (Communication personnelle).

L'implantation du déflecteur à bulles sur ce site devient intéressante lorsque l'on remarque que lors de la vidange d'une partie du canal un grand nombre de déchets se trouvent transportés et transférés dans le vieux port (et par extension dans l'océan). L'enjeu d'implanter le dispositif ici permettrait lors des vidanges de limiter le transfert des déchets, de les collecter et de les caractériser pour compiler de la donnée et connaître leur origine. Collecter les déchets avant qu'ils n'atteignent l'océan permet de réduire leurs impacts, d'éviter qu'ils contaminent d'autres écosystèmes et de diminuer les risques de fragmentation en microplastiques (figure 16).

Lors de la vidange du canal faite le 5 juillet 2024 les portes écluses se sont ouvertes à 7h30 et ont été refermée à 16h15. Ce jour-là, la pleine mer était à 5h16 et 17h31 et la basse mer à 11h03 avec un coefficient de 72 le matin. Cette journée de test avait **pour but de définir si le déflecteur à bulles pouvait être opérationnel avec un courant important** et si cet outil pouvait **servir à la retenue des microplastiques autant que les macroplastiques**.

Emplacement des sites d'études pour l'outil déflecteur à bulles de la SCIC TEO



Durand, 2024

Figure 16 : localisation des différents test réalisés du projet BUL'STOP à La Rochelle entre l'année 2023 et 2024 (Durand, 2024).

- Support trois filtres

Le support trois filtres est facilement transportable. Nous avons déjà pu effectuer des tests dans le bassin des Chalutiers, dans la Garonne lors d'une sortie terrain, et à la Baie de Bonne Anse (figure 19). Cet outil peut être utilisé facilement sur n'importe quel site tant qu'un accès facile au plan d'eau est disponible.

Nous avons pu réaliser les premiers prélèvements avec le support trois filtres dans le bassin des chalutiers pour tester le support qui venait d'être fabriqué. Le bassin des Chalutiers est un environnement propice à l'accumulation de déchets qui restent souvent bloqués dans ce bassin. Les vents dominants Ouest entraînent cette accumulation. Les déchets peuvent provenir à la fois de la porte écluse du Gabut lors de son ouverture mais également des déchets urbains envolés, parfois abandonnés par les particuliers (figure 17). Lors de ce test nous avons prélevé 3 fois 1L d'eau dans des bouteilles d'analyses prévues à cet effet (triplicats) et 3 fois 10 litres avec le nouveau dispositif, afin de comparer les deux types de prélèvement sur un même site.

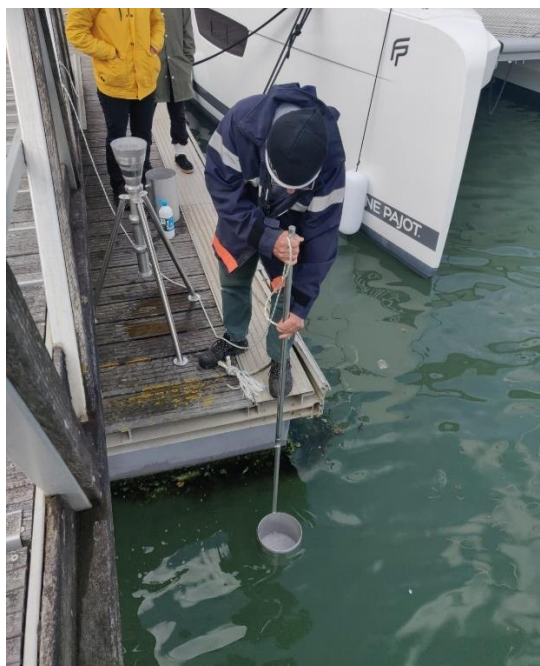


Figure 17 : Photo prise lors du premier test du support trois filtres dans le bassin des chalutiers le 10 mai 2024 (Durand, 2024).

Ensuite le deuxième test a été fait dans la Garonne à Saint-Louis-de-Montferrand lors d'une sortie pour aller à la rencontre des acteurs pour un des projets de TEO (figure 18). Lors de cette sortie nous avons pu constater la présence importante de déchets sur les bords de la Garonne. Les débris plastiques accumulés s'étendent sur plusieurs kilomètres au bord de la route. Ils proviennent à la fois de la Garonne et des dépôts volontaires des particuliers.

Une étude de Carvalho et al., (2021) a démontré la présence de microplastiques dans la Garonne. Ces concentrations varient énormément en fonction de la saison et de la localisation des prélèvements. Des concentrations plus élevées ont été relevées en aval des zones urbaines et des zones industrielles (de Carvalho et al., 2021). Cette étude a été effectuée aux alentours de la ville de Toulouse dans le Sud-Ouest de la France. Dans le cadre de l'Observatoire Régional nous avons effectué un prélèvement à Saint-Louis-de-Montferrand pour tester encore une fois le support trois filtres.

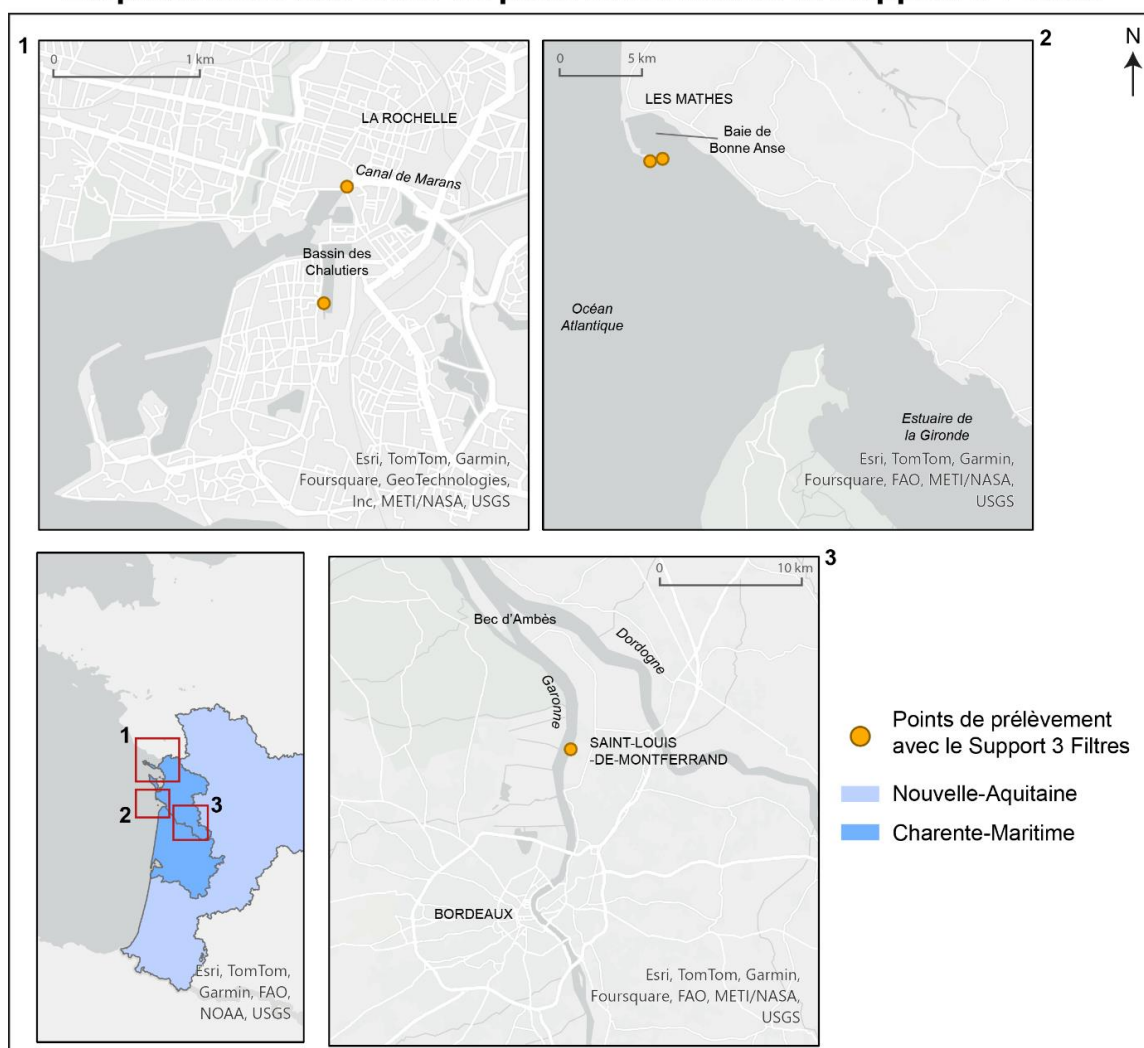


Figure 18 : Photo prise lors du prélèvement d'eau à l'aide du support trois filtres dans la Garonne à Saint-Louis-de-Montferrand (Durand, 2024).

Enfin, le support a pu servir pour réaliser des prélèvements d'eau lors de l'utilisation du déflecteur à bulles sur le canal de Marans afin de savoir si cet outil pouvait également servir pour quantifier les microplastiques. Pour cette expérimentation datant du 5/07/2024 deux prélèvements sont effectués avant la mise en place du dispositif et après à marée basse.

Et pour finir deux derniers prélèvements ont été réalisés à Bonne Anse dans le cadre du mémoire de Mathilde Sourisseau, alternante chez TEO. La baie de Bonne Anse est une zone d'accumulation de déchets plastique, en raison de sa position géographique à l'embouchure de la Gironde, de son éloignement qui empêchent toutes collectes, et de ses enjeux de protection. Dans ce cadre-là Mathilde a voulu prélever 10L d'eau à deux sites différents pour montrer la présence ou l'absence de microplastiques potentiellement corrélée avec la quantité importante de macrodéchets.

Emplacement des sites de prélèvement avec le Support 3 Filtres



Durand, 2024

Figure 19: Localisation des zones de prélèvement du support trois filtres.

2.3.2 Expérimentations avec l'outil déflecteur à bulles

2.3.2.1 Les ingénieurs EIGSI, test de 2023

Entre mars et août 2023, 2 étudiants en quatrième année dans l'école d'ingénieur EIGSI basée à La Rochelle ont réalisé un stage chez TEO dans le but de mettre en place et créer le dispositif du déflecteur à bulles. C'est à la suite de l'Appel à Initiative de l'agence de l'eau en 2022 pour lutter contre les macrodéchets plastiques que TEO se présente comme porteur du projet BUL'STOP. L'objectif des étudiants est de créer un prototype fonctionnel stoppant les déchets plastiques afin de recueillir des données sur la pollution des cours d'eau. Pour ce faire, un prototype de déflecteur à bulles a été conçu, dimensionné, réalisé et testé en conditions réelles.

Ce sont les étudiants qui ont déterminé les caractéristiques du déflecteur à bulles : la chaîne, le tuyau, et tout le dimensionnement du dispositif (figure 20). Le premier test effectué a été réalisé sur une partie du canal de Marans depuis le quai Maubec afin de déterminer si le déflecteur fonctionnait correctement après les simulations sur ordinateur et sa construction finale. Pendant le test il n'y avait pas de courant dans le canal de Marans, ou très peu car les portes écluses étaient fermées.



Figure 20 : photo du premier prototype de déflecteur à bulle réalisé par les étudiants ingénieur d'EIGSI (TEO,2023).

Le test est réussi et s'ensuit un test à la porte écluse du Gabut là où a été défini le problème d'entrée et de sortie des déchets plastiques. Ce deuxième test avec le prototype figure 20 est un échec car le courant crée lors de l'ouverture de la porte écluse est trop important pour le poids du dispositif (46 kg). Le déflecteur est alors déporté et ne sert plus du tout à orienter les déchets dans le réceptacle ou vers le point stratégique de prélèvement. Un courant trop important empêche le dispositif de fonctionner correctement et de servir de barrière pour les déchets. Lors de ce test il a été mis en évidence la nécessité d'orienter le déflecteur suivant un certain angle (qui reste à définir) pour pallier l'effet du courant. Mais également le fait de lester plus ou moins le dispositif en fonction de la force du courant.

Ensuite, un test sur le canal de Rompsay, également appelé canal de Marans a été effectué. Cette partie du cours d'eau en amont de l'écluse Maubec ne présente pas de courant important. Lors de ce test le déflecteur à bulles réussit à dévier la plupart des déchets et les plastiques sont récupérés à l'aide d'une épuisette par les étudiants.

A la suite de ces trois test, Fabrice Faurre a voulu repenser le dispositif et le tester à nouveau dans le cadre de mon stage.

2.3.2.2 Expérimentation du déflecteur à bulles en juillet 2024.

Pour mon expérimentation lors de mon stage nous sommes allés tester le déflecteur à bulles sur le quai Maubec lors de la vidange d'une partie du canal de Marans le 5/07/2024.

Le matériel utilisé pour utiliser le déflecteur à bulles est le suivant :

- Un compresseur à 2000L/min – 7 bars
- Le tuyau percé avec la chaîne de lestage
- Cordage
- Plot de signalisation
- Equipement de Protection Individuel : gilet jaune et gilet de sauvetage
- Voiture pick-up TEO
- Sac de collecte
- Peson
- Epuisette
- Annexe gonflable (engin nautique)

Lors de l'utilisation du déflecteur à bulles il est intéressant d'avoir le débit relatif au courant lors de l'ouverture de la porte écluse. Cela permet d'avoir une idée de la quantité d'eau qui est filtrée par le déflecteur à bulles lorsqu'il est en position. Dans le but de ramener le nombre de déchets à un volume d'eau. Pour cette matinée test le débit est estimé à $8,85\text{m}^3/\text{s}$ selon Mickaël Guédon gestionnaire milieux aquatiques (Services Eaux Pluviales, Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations). Il m'a communiqué que « lors de la dernière manœuvre le 12/06 dernier, le niveau d'eau a baissé de 2,10m en 4h00 pour une surface en eau estimée à 60700 m², soit un débit moyen de $8,85\text{ m}^3/\text{s}$ ». Ils ne possèdent pas de « mesure de débit sur ce double-ouvrage constitué d'une porte tournante et d'une vanne levante » sur la porte écluse du quai Maubec (Communication personnelle). On se basera alors sur cette donnée pour connaître la quantité d'eau filtrée.

Pour la réalisation du protocole nous avons loué un compresseur Kiloutou monté sur remorque qui a pu être déplacé par le pick-up et ensuite 2 personnes sont nécessaires pour le mettre en marche et le positionner à l'endroit voulu sur le site. Avant de commencer à mettre en place le dispositif nous avons effectué un premier prélèvement de 10L d'eau « AVANT » dans la zone supposée d'accumulation des déchets pour le comparer avec l'« APRES » mise en place du déflecteur.

Une fois arrivé sur le site, la première chose à faire est de s'équiper d'un gilet réfléchissant jaune et d'un gilet de sauvetage. Ensuite on place les plots de signalisation autour du compresseur et de la voiture pour signaler aux passant.e.s que des travaux sont en cours. Une fois le site sécurisé on peut passer à la mise en place du dispositif. On utilise pour cela le premier dispositif créé par les ingénieurs EIGSI. Il est nécessaire d'avoir 30m de tuyau percé et lesté pour pouvoir faire toute la longueur du bassin du canal Maubec. L'angle voulu pour pallier les effets du courant est quasiment parallèle au quai (figure 21).

Le tuyau est connecté au compresseur qui se trouve sur le quai Louis Durand au niveau de la porte écluse. Par sécurité il est entouré à une bite d'amarrage si l'autre extrémité lâche. L'autre bout du tuyau

est encordé de plusieurs mètres et transporté sur la passerelle de Godet en face de l'écluse, ou il sera arrimé. Le déflecteur est ensuite mis à l'eau et pourra être déplacé par l'extrémité depuis la passerelle. Une fois l'outil positionné et l'angle choisi visuellement (sans calcul) le compresseur peut être mis en route (figure 21). Une fois les observations faites sur l'efficacité du déflecteur, on choisit de le changer de position afin d'analyser son utilité avec un autre angle. Pour cela on arrête le compresseur, on débranche le tuyau en veillant bien qu'il soit sécurisé et arrimé correctement des deux côtés. On déplace le compresseur, puis le tuyau et on le rebranche.

Dans le cadre de cette expérimentation l'annexe nautique ne sera pas utilisée au vu des conditions dangereuses dues au fort courant induit par l'ouverture des vannes et l'absence d'une personne agréée pour l'utilisation d'un engin nautique.

Localisation des positions du déflecteur à bulles lors de l'expérimentation du 5/07/2024 à La Rochelle.



Figure 21 : Localisation de la mise en place du déflecteur à bulles lors de la journée test du 5/07/2024 et prise de vue lors des tests (Google earth, Durand, 2024).

2.3.3 Expérimentation avec l'outil support trois filtres

Le matériel nécessaire est décrit ci-dessous (figure 22):

- Seau de 5L inox avec manche pour le prélèvement sur le terrain
- Seau de 10L en inox

- Support 3 filtres inox
- 3 filtres en inox de 32 à 40mm de diamètre : maille de 100µm, 350µm, 1mm.
- Boîte de pétri en verre
- Scotch et marqueur
- Eau déminéralisée en bouteille

MATÉRIELS

Le Support 3 Filtres :

- Support sur pied¹
- Seau de 10L (pour le versement)²
- Seau de 5L (pour le prélèvement)³
- Filtres (1000/ 350 / 100 micromètres)⁴

Matériels complémentaires :

- Eau déminéralisée
- Boîte de pétri en verre
- Etiquette et marqueur



Le support trois filtres

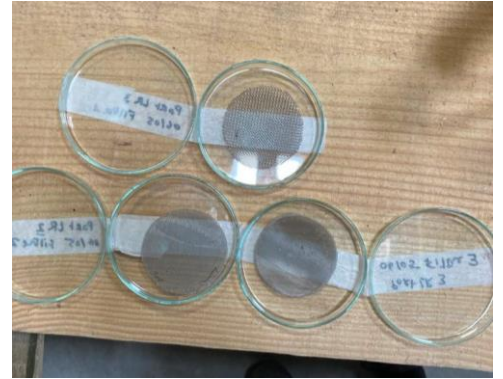


Figure 22 : représentation du matériel utilisé pour l'utilisation du support trois filtres (Durand, 2024).

- Montage du filtre

Pour monter les filtres nous avons d'abord posé le filtre à l'envers sur le sol pour assembler les différentes parties plus facilement. Il suffit de dévisser les bagues une à une et de placer les filtres du plus large (1000 µm) en haut, au plus fin (100 µm) en bas. Tout le matériel est rincé à l'eau déminéralisée afin d'éviter toute contamination pas d'autres microplastiques présents dans l'environnement.

- Prélèvement de l'eau

Pour prélever les 10L d'eau de surface on utilise le seau de 5L et son manche extensible pour la transvaser ensuite dans le seau de 10 litres. Cette manipulation est réalisée 2 fois pour obtenir 10L (figure 17, 18).

Une fois le seau rempli on verse l'intégralité dans le support trois filtres, il n'y a pas de récipient pour récupérer l'eau elle coule directement par terre.

- Le démontage

Une fois les 10L versés, on nettoie correctement les filtres avec l'eau déminéralisée pour bien faire tomber les particules dans les filtres. Ensuite, on démonte la structure pour retirer les filtres un à un. Pour séparer les trois filtres on desserre d'abord le premier (filtre de 1mm) puis on s'occupe des deux autres. Le premier filtre étant dimensionné exactement à la taille du diamètre du support lors du dévissage il tombe facilement. Il faut donc le récupérer directement dans la boîte de pétri positionnée en dessous. Les deux autres filtres sont légèrement plus grands donc restent bloqués dans la structure il nous faut utiliser un autre manche en inox pour les pousser et les récupérer (le tube est préalablement rincé à l'eau déminéralisée). Une fois chacun des filtres récupérés ils sont mis dans les boîtes de pétri scotchées et annotées avec la date, le lieu et le numéro de filtres correspondant.



Figure 23 : Filtres dans les boîtes de pétris annotées (Durand, 2024).

- Réassemblage des filtres

Une fois les trois filtres récupérés il faut réassembler le support trois filtres voir technique du 1. Montage du filtre. Rinçage à l'eau déminéralisée.

Ce protocole est standardisé est peut-être effectuée partout tant qu'un accès à l'eau est possible via un escalier, un ponton, une descente à bateau... Le manche est extensible jusqu'à 3m facilitant ainsi les prélèvements. Une fois les prélèvements effectués et les boîtes de pétris fermées et annotées tout est envoyé au laboratoire QUALYSE pour analyse. Les échantillons sont accompagnés d'une fiche de prélèvements détaillée, demandée par QUALYSE.

2.3.4 Les premiers résultats

Ce sont les premiers résultats expérimentaux de ces deux outils qui seront développés dans cette partie. Aucune conclusion ne pourra être tirée de ces résultats, mais une analyse critique et approfondie sera menée afin d'aider TEO à améliorer ces outils et les protocoles associés. Nous sommes aux balbutiements de l'harmonisation des protocoles de prélèvement des MPs afin de créer un observatoire sur l'estuaire de la Gironde. Les premiers résultats des premiers prélèvements faits à l'aide du support trois filtres seront illustrés dans des tableaux avec les concentrations en MPs trouvées.

Le déflecteur à bulles, quant à lui, n'a pas produit de résultats bruts. Ici seront présentés les résultats techniques de la mise en fonctionnement du dispositif ; on présentera le déroulement de l'expérience et ce qu'il en ressort d'un point de vue de son fonctionnement. On identifiera les points défailants du dispositif et des pistes d'améliorations seront proposées ensuite.

Les résultats des prélèvements décrits précédemment sont illustrés dans les tableaux suivants. Les résultats ont été fournis par le laboratoire d'analyse QUALYSE. Au départ, les analyses étaient faites sur des bouteilles d'un litre d'eau prélevées directement sur le terrain et filtrées en laboratoire. Ces résultats sont illustrés dans le tableau 2. Ce tableau servira de comparaison avec les résultats d'analyse du tableau 3 pour les prélèvements du support trois filtres. La comparaison des résultats est très compliquée car, comme vu dans le tableau 1, il est aujourd'hui difficile de savoir si une certaine quantité de MPs retrouvés est importante, car aucun seuil n'existe. Selon le CEHTRA, il n'existe pas de seuil de contamination des MPs, car une seule particule est déjà considérée comme dangereuse pour

l'écosystème (CEHTRA - Consultancy for Environmental and Human Toxicology and Risk Assessment. & Durou, 2024).

L'eau déminéralisée utilisée pour réduire les contaminations et nettoyer tout le matériel a été utilisée comme blanc lors des analyses.

Tableau 2 : Tableau des résultats de l'analyse des trois bouteilles triplicats des trois prélèvements d'eau (3x 1L dans le bassin des chalutiers le 10/05/2024)(Durand, 2024)

	Bouteille de verre triplicats d'1L			Eau déminéralisée
Echantillons	R1	R2	R3	Eau déminéralisée
Volume analysé	1000 mL	1000 mL	1000 mL	1000 mL
Nombre de MP	4	13	32	2
MP/L	4	13	32	2

Ces résultats d'analyses peuvent servir de comparaison avec le support trois filtres, car les prélèvements ont été effectués sur le même site (Bassin des Chalutiers). On retrouve en moyenne 16,3 MPs par litre, sachant que ces prélèvements n'ont été faits que sur 3 litres d'eau au total, alors que ceux du support trois filtres représentent 30 litres au total (tableau 3). De plus, l'analyse sur les triplicats ne différencie pas les tailles de MPs retrouvés.

Tableau 3 : Résultats de l'analyse des trois filtres contenus dans le support lors des trois prélèvements d'eau (3x 10L) dans le bassin des chalutiers le 10/05/2024 (Durand, 2024).

	Port de La Rochelle 1			Port de La Rochelle 2			Port de La Rochelle 3		
Echantillons	PPLR 1 - F1	PPLR 1 - F2	PPLR 1 - F3	PPLR 2 - F1	PPLR 2 - F2	PPLR 2 - F3	PPLR 3 - F1	PPLR 3 - F2	PPLR 3 - F3
Volume analysé	9000 mL	9000 mL	9000 mL	9000 mL	9000 mL	9000 mL	9000 mL	9000 mL	9000 mL
Nombre de MP	1	13	11	2	9	34	0	0	7
MP/L	0,1	1,4	1,2	0,2	1	3,8	0	0	0,8

Les filtres sont notés F1 à F3 dans l'ordre d'apparition des filtres dans le support. F1 correspond au filtre de porosité 1 mm, F2 350 µm, et F3 100 µm. Ces résultats sont peu exploitables au vu des pertes d'eau importantes engendrées lors des prélèvements. Cependant, on peut toujours annoncer que des microplastiques sont présents, mais les résultats divergent énormément. Le prélèvement 1 (PPLR1) contient 13 MPs pour environ 9 litres d'eau pour le filtre 2, alors que le filtre 2 du troisième prélèvement n'en contient aucun. Les prélèvements ont tous été faits au même endroit dans le bassin des Chalutiers et seulement quelques minutes se sont écoulées entre chaque prélèvement. Cette divergence peut

être multifactorielle. Elle peut être due à la personne qui a prélevé et versé l'eau, à des contaminations extérieures possibles, ou encore à un changement dans l'eau. Ici, on retrouve en moyenne 1,2 MP/L en faisant la moyenne des trois prélèvements.

Le fait que le prélèvement avec le support trois filtres a eu quelques problèmes pourrait indiquer cette différence de résultats entre les deux tableaux. En effet, Arno Bringer, qui s'est occupé des analyses à QUALYSE, nous a fait part de la quantité importante de microplastiques qui se trouvaient coincés sur les bords externes des filtres. Ils étaient par conséquent impossibles à analyser. Cette différence majeure entre les tableaux 2 et 3 de résultats semblent provenir de cette raison en partie. De grandes pertes d'eau par les bagues vissées entre elles ont été notées lors du prélèvement.

Tableau 4 : Tableau des résultats de l'analyse de 2 filtres du support trois filtres lors de la sortie sur la Garonne à Saint-Louis-de-Montferrand (Durand, 2024).

	Garonne 1	
Echantillons	Garonne - F1	Garonne - F2
Volume analysé	10000 mL	10000 mL
Nombre de MP	1	0
MP/L	0,1	0

Les résultats du prélèvement de la Garonne n'indiquent aucun microplastique d'une taille inférieure à 1 mm. Ce n'est pas une valeur à prendre comme tendance pour la rivière ; il s'agissait d'un prélèvement ponctuel, encore une fois pour tester le support. Cette fois-ci, les problèmes de fuites ont été réglés.

Afin de comparer ces résultats, nous allons prendre plusieurs études ayant été faites dans des ports autour du monde. L'étude de Sparks et al., (2023) porte sur l'analyse des concentrations en microplastiques entre 2018 et 2020 dans le port de Cape Town en Afrique du Sud. Cette étude montre une concentration moyenne dans l'eau d'environ 12,03 MPs/L. Plusieurs centaines de prélèvements ont été faits pour arriver à cette valeur moyenne (Sparks et al., 2023).

Dans l'article de Preston-Whyte et al., (2021), un tableau (tableau 5) des différentes concentrations trouvées dans les ports à travers le monde a été réalisé. L'unité utilisée est le nombre de particules par litre pour pouvoir comparer ces résultats aux nôtres. En moyenne, les résultats de ces études ne dépassent pas plus de 2 particules par litre. Les méthodes de prélèvement et les techniques d'analyse ne sont pas les mêmes suivant les études, ce qui engendre des différences dans les résultats et leur interprétation. D'où le fait de manipuler ces résultats avec précaution et de les utiliser avec prudence pour les comparer. Ensuite, pour la majorité des études, il s'agit de prélèvements sur plusieurs mois voire plusieurs années pour arriver à avoir une concentration moyenne dans le site dédié (Preston-Whyte et al., 2021).

Tableau 5: Nombre de particules/L pour les eaux de surface rapportées dans la littérature pour plusieurs endroits. (S.D. : écart-type, S.E. : erreur-type) (Preston-Whyte et al., 2021).

Type of sample	Location	Number of particles L ⁻¹	Collection method	Mesh size	Reference
Port	Port of Durban, South Africa	Mean: 0.099 ± 0.036 ($\pm$ S.D)	Particle pump : meso- and microparticules	200 μ m to >5 mm	Preston- Whyte et al., 2021
Port	Port of Durban, South Africa	Mean: 0.093 ± 0.037 ($\pm$ S.D)	Particle pump Microparticles only (>5 mm excluded)	200 μ m– 5 mm	Preston- Whyte et al., 2021
Port	Durban, South Africa	Mean: 1.20 ± 0.13 ($\pm$ S.E.)	10 L buckets (100 L filtered volume) Microplastics only	63 μ m	(Nel et al., 2017)
Port	Durban, South Africa	Mean: 0.007 ± 0.012 ($\pm$ S.D.)	Conical zooplankton net Microplastics only	300 μ m	(Naidoo et al., 2015)
Port	Richards bay harbour	Mean: 0.41 ± 0.08 ($\pm$ S.E.)	10 L buckets (100 L filtered volume) Microplastics only	63 μ m	(Nel et al., 2017)
Port	Suva Harbour, Fiji,	1.10^{-4}	Plankton net Microplastics only	125 μ m	(Ferreira et al., 2020)
Port	Swedish west coast Industrial harbour of Stenungsund	0.15–2.40	Plankton net	80 μ m	(Norén, 2007)
		1.10^{-5} ; $1.4.10^{-4}$	Plankton net	450 μ m	
Port	The Gulf of Finland, Turku harbour	$7.3.10^{-4}$		≥ 300 μ m	(Magnusson, 2014)
Port	Port Philip and Western Port Bays, Greater Melbourne, Australia	0.06–2.5	Bottle sampling (5 L) Microplastics only	20 μ m	Su et al., 2020

Tableau 6 : Tableau des résultats des analyses microplastiques réalisé lors de l'expérimentation de juillet avec le support trois filtres (Durand, 2024).

	Quai Maubec AVANT			Quai Maubec APRES		
Echantillons	MAUBEC-PRL1 AVANT-F1	MAUBEC-PRL1 AVANT-F2	MAUBEC-PRL1 AVANT-F3	MAUBEC-PRL2 APRES-F1	MAUBEC-PRL2 APRES-F3	MAUBEC-PRL2 APRES-F3
Volume analysé	10000 mL	10000 mL	10000 mL	10000 mL	10000 mL	10000 mL
Nombre de MP	8	5	3	9	6	1
MP/L	0,8	0,5	0,3	0,9	0,6	0,1

On retrouve dans le tableau 6 des concentrations en microplastiques relativement peu élevées, ne dépassant jamais 1 MP par litre d'eau analysée. On obtient en moyenne 0,53 MP/L. Comme l'indiquent les noms des échantillons, nous avons fait un prélèvement de 10 litres avant la mise en place du déflecteur et un autre après son fonctionnement (une fois l'expérimentation complète). Le support trois filtres a très bien joué son rôle et très peu de perte d'eau n'a été à déplorer. Cependant, le bec verseur prévu pour le seau n'avait toujours pas pu être livré, la précision du litrage est donc relative. On a exactement le même nombre total de MPs (16) avant et après la mise en place du déflecteur. On ne peut évidemment pas tirer de conclusion ici, surtout sachant que l'outil déflecteur à bulles n'a pas du tout rempli ses fonctions (voir figure 24).

Chacun des tableaux décrits ici représente une quantité très différente de microplastiques. Il est également difficile de comparer nos résultats à ceux des différentes études mentionnées (tableau 5), car les techniques d'échantillonnage ne sont pas les mêmes et la taille des microplastiques varie. Afin de comparer nos résultats entre eux, voici le tableau suivant :

Tableau 7: Moyennes des résultats de prélèvements des différents sites analysés avec le support trois filtres (Durand, 2024).

Prélèvements	Moyennes du nb microplastiques / L
PPLR	1,2
PPLR triplicat	16,3
Quai Maubec	0,53

Ce tableau permet d'illustrer les disparités que l'on retrouve au sein des analyses effectuées. La différence la plus frappante est celle concernant le prélèvement dans le port de plaisance de La Rochelle avec les bouteilles d'un litre en verre (triplicat) et le support trois filtres sur le même site. Il est encore trop tôt pour donner des résultats fiables sur les quantités de microplastiques présentes dans les eaux de La Rochelle. En revanche, ces premiers résultats sont encourageants pour continuer dans cette démarche et mettre en place des suivis sur le long terme avec l'outil support trois filtres.

Les analyses des prélèvements effectués à Bonne Anse ne sont pas illustrées ici car ce site ne fait pas partie de la thématique de ce rapport. Cependant, la manipulation du filtre a été très simple, il

a pu être transporté dans un sac à dos pour arriver jusqu'à la zone de prélèvement et les résultats montrent une présence moyenne de 0,7 microplastiques. Le dispositif a parfaitement bien fonctionné.

Nous allons maintenant pouvoir analyser les résultats de l'utilisation du déflecteur à bulles. Pour cela la figure 24 représente un logigramme résumant les étapes de la mise en place de l'outil et les éléments observés lors de l'expérimentation.

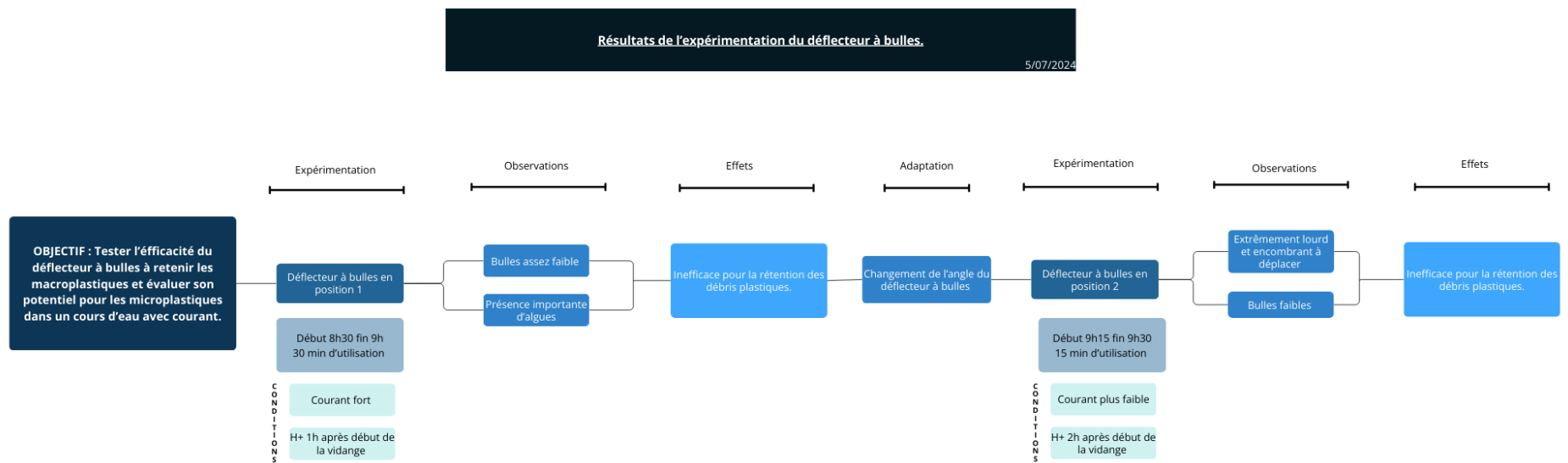


Figure 24 : logigramme des résultats du test du déflecteur à bulles pendant la matinée du 5/07/2024 (Durand, 2024).

Ici sont présentés les résultats techniques liés à l'utilisation du déflecteur à bulles. Aucun résultat tangible n'a pu être mis en évidence lors des expérimentations. Les résultats attendus et la pertinence du dispositif n'ont pu être vérifiés. La figure 24 relate le déroulement de l'expérimentation principale qui avait pour but de définir la pertinence de cet outil pour la retenue des microplastiques dans un cours d'eau avec courant.

Selon les rapports des ingénieurs d'EIGSI, les tests effectués l'année dernière montraient que le déflecteur à bulles était opérationnel dans la rétention et l'orientation des déchets dans un cours d'eau sans courant. Il a été testé sur le canal de Romsay à l'entrée de Périgny et sur le quai Maubec. À l'inverse, le test effectué à la porte-écluse du Gabut n'a pas été concluant, car le courant engendré par l'ouverture a emporté l'outil. La chaîne qui permettait de lester le déflecteur n'est pas assez lourde pour pallier la force du courant. Lors du test en juillet 2024, le dispositif était bien arrimé aux deux extrémités, ce qui a permis de le laisser en place. Nous avons observé la diminution de la force des bulles avec le courant, les rendant ainsi inefficaces. Malgré l'angle plus ou moins fermé que nous avons donné au tuyau, les bulles inefficaces l'ont rendu inopérant dans sa fonction d'orienter les déchets. Nous avons ce jour-là observé plusieurs débris plastiques venants du canal passer totalement au travers le rideau de bulles sans être déviés. Nous avons couplé l'outil support trois filtres afin d'analyser sa capacité dans la rétention des microplastiques. Les résultats d'analyse sont repris dans le tableau 6. Nous avons réalisé ces prélèvements pour témoigner de la présence plus importante (ou non) de MPs dans la zone d'accumulation des débris plastiques après la mise en fonctionnement du déflecteur à bulles. Les résultats sont difficilement interprétables, en voyant que le déflecteur n'a pas rempli sa fonction pour les macroplastiques on peut suggérer qu'il en va de même pour les microplastiques. On retrouve exactement le même nombre de MPs dans des gammes de tailles différentes (tableau 6), sûrement un hasard.



Figure 25 : Photo de l'accumulation des algues sur le dispositif pendant l'expérimentation (Durand, 2024).

Lors de l'expérimentation Quai Maubec la présence importante des algues (figure 24) a rendu le dispositif très difficile à manipuler et a sûrement entravé son efficacité. Nous étions deux ce jour-là mais une troisième personne aurait été appréciée afin de ne pas se blesser car il a été très difficile de remonter le dispositif hors de l'eau le long du quai.

Les expérimentations menées dans cette section ont permis de tester deux dispositifs innovants pour la réduction et la quantification des pollutions plastiques : le déflecteur à bulles et le support trois filtres. Le port de plaisance de La Rochelle, la Garonne, et d'autres sites ont été choisis pour leurs caractéristiques spécifiques favorisant l'accumulation de déchets plastiques, offrant ainsi un terrain d'expérimentation pertinent. Le déflecteur à bulles, initialement développé par des étudiants de l'EIGSI, a montré des résultats variés en fonction des conditions de courant et des sites. Bien que prometteur, ce dispositif nécessite des ajustements, notamment en matière de positionnement et de lestage, pour maximiser son efficacité. Le support trois filtres a, quant à lui, permis de collecter des microplastiques dans différents environnements aquatiques. Cependant, les résultats obtenus sont disparates, possiblement en raison de facteurs de contamination ou de variations naturelles des conditions d'eau. Cette divergence souligne l'importance de la standardisation des protocoles de prélèvement et d'analyse.

Ces premières expérimentations mettent en lumière les enjeux et les limites des deux outils étudiés. La section suivante, se concentrera sur une analyse critique de ces dispositifs. Nous évaluerons leur pertinence en fonction de critères tels que la pertinence des résultats, la fiabilité de l'outil, ses coûts opérationnels, financiers, et écologiques. Cette discussion visera à identifier les améliorations nécessaires et à orienter les futurs développements pour une meilleure gestion de la pollution plastique.

2.4 Discussions

Dans cette partie, nous émettrons un regard critique sur les résultats obtenus lors des différentes expérimentations. L'objectif est de déterminer la pertinence globale des outils afin que TEO puisse poursuivre et améliorer leur développement. Un tableau de scoring sera réalisé pour chaque thématique décrite ci-dessous afin d'évaluer les outils sur leur technicité, leur rigueur, leur mise en œuvre et leur coût environnemental, énergétique et financier. Chaque note sera comprise entre 1 et 3, et les détails de la notation seront expliqués à la fin de chaque partie.

2.4.1 Pertinence de l'outil et des résultats

- Support trois filtres

Nous évaluerons cette section pour déterminer si les résultats obtenus sont pertinents et répondent aux enjeux de l'harmonisation des techniques d'échantillonnage dans l'évaluation des flux de microplastiques. Le tableau 3 illustre les premiers résultats obtenus avec le support trois filtres. Le volume analysé est inférieur à 10 000 mL (10 L), car lors de la première manipulation de l'outil, les joints en acier n'ont pas été correctement positionnés, ce qui a entraîné de nombreuses fuites d'eau. De plus, le seau de 10 L utilisé pour verser l'eau dans le support n'est pas équipé d'un bec verseur, ce qui empêche un versement précis. Le jet d'eau est également trop fort, ce qui repousse les microplastiques sur les bords externes du filtre, les rendant inanalysables. Ces problèmes ont été améliorés après les premiers tests, et le support trois filtres est désormais complètement opérationnel. La fiabilité des résultats du dispositif peut cependant encore être remise en question. En effet, comme indiqué dans le tableau 2, l'analyse des triplicats des bouteilles en verre montre environ 15 fois plus de microplastiques que l'analyse des filtres du support. L'analyse réalisée au quai Maubec donne des résultats proches des ordres de grandeur retrouvés dans la littérature, mais les techniques d'échantillonnage et d'analyses n'étant pas similaires, la comparaison est difficile.

Pour déterminer la pertinence de l'utilisation du support, il serait nécessaire de refaire les mêmes tests au bassin des Chalutiers avec les améliorations apportées à l'outil et d'ajouter des prélèvements dans les bouteilles en verre pour comparer les deux techniques. Les résultats produits sont pertinents et exploitables pour la suite des projets.

- Déflecteur à bulles

Les premiers tests ont permis à TEO de repenser le fonctionnement du déflecteur à bulles pour le coupler avec le support trois filtres afin de collecter des données sur les macroplastiques et les microplastiques (MPs). Les essais de 2023 ont mis en évidence deux aspects importants pour améliorer ce dispositif. D'une part, la manipulation du déflecteur à bulles est difficile dans cette première version, car il est trop lourd. D'autre part, le test sur le quai Maubec à la porte-écluse a montré la nécessité d'incliner le dispositif avec un certain angle pour pallier l'effet du courant et rendre le dispositif fonctionnel. Sur la base de ces observations, le déflecteur à bulles a été repensé et retesté lors de ce stage pour assurer un fonctionnement viable, durable et efficace. TEO souhaite aujourd'hui coupler l'utilisation de ce dispositif avec celui du support trois filtres et peut-être l'utiliser dans le cadre du projet « observatoire régional » expliqué précédemment. Le nouveau prototype vu figure 11 a été testé à l'exutoire de l'angle de la darse du vieux port (figure 15 et 16). Ce test n'a pas donné suite car le tuyau n'est pas étanche, de l'air s'échappe à une extrémité rendant les bulles inefficaces. De plus ce produit plus léger, et plus petit, le rendant plus maniable n'était pas assez lourd pour couler correctement.

Comme le montre la figure 24 dans le logigramme, les tests du 5 juillet avec le premier prototype n'ont pas été concluants pour démontrer la pertinence de l'utilisation du déflecteur à bulles dans le suivi des flux de MPs et de macro-déchets. L'outil n'a produit aucun résultat exploitable. Aucun débris plastique n'a été retenu ou dévié par le rideau de bulle. Le déflecteur à bulles n'a pas du tout servi pour aider à récupérer les débris plastiques venant du canal. Il est difficile ici d'affirmer son incapacité à dévier les microplastiques, car nous avons pu constater seulement son incapacité à orienter les plus gros plastiques. En ce qui concerne les microplastiques il a peut-être la capacité de les accumuler à un endroit. Ce ne sont que des suppositions.

Pour avoir des résultats plus viables et exploitables plusieurs prélèvements avec le support trois filtres sont nécessaires notamment des prélèvements en amont du déflecteur, en aval et sur une échelle de temps plus importante pour suivre l'évolution de la concentration en microplastiques dans la zone supposée d'accumulation.

Il est nécessaire de réaliser de plus amples recherches sur la manière dont le dispositif pourrait être utile même avec un courant important. Des calculs concernant la force du courant et le poids nécessaire pour le lestage du déflecteur seraient pertinents, ainsi que la réalisation de plusieurs tests en bassin artificiel pour améliorer le dispositif. Un gros travail d'ingénierie est indispensable pour le rendre opérationnel dans les mois qui suivent.

Tableau 8 : Notation et critères du bilan de pertinence de l'outil et des résultats obtenus (Durand, 2024).

Notation	Critères
1	L'outil n'est pas pertinent et ne produit aucun résultats
2	L'outil est plutôt pertinent, certains résultats sont exploitables mais il y a encore des améliorations
3	L'outil et les résultats sont pertinents et exploitables

2.4.2 Mise en œuvre

- Support trois filtres

La mise en œuvre du support trois filtres est remarquablement simple et efficace, nécessitant uniquement l'intervention d'une seule personne. Le protocole d'utilisation est écrit et standardisé, ce qui permet une répliquabilité facile et rapide dans divers environnements. Aucune compétence particulière n'est requise pour l'utiliser, rendant son emploi accessible à un large éventail de personnes. Cependant, certaines précautions sont à observer, notamment lors de la collecte d'eau, où il est possible de faire une chute selon le site choisi. De plus, le poids d'un seau de 10 litres d'eau peut être significatif, ce qui pourrait poser un problème pour une personne fragile ou en mauvaise condition physique. Malgré ces points de vigilance, la mise en œuvre du support trois filtres reste globalement simple et rapide.

- Déflecteur à bulles

En revanche, la mise en œuvre du déflecteur à bulles est plus complexe et exige davantage de ressources humaines et matérielles. Sa mise en place, souvent longue et fastidieuse, nécessite au moins deux personnes en raison du poids important du dispositif, qui pèse plusieurs dizaines de kilos. La mobilisation du compresseur, indispensable pour le fonctionnement du déflecteur, requiert une voiture équipée et des connaissances sur son utilisation. De plus, une personne doit posséder des compétences en nautisme, notamment pour faire des nœuds sécurisés, afin d'assurer la stabilité et la sécurité du dispositif ainsi que celle des personnes aux alentours. Des équipements de protection individuels sont également nécessaires pour garantir la sécurité des opérateurs.

Ainsi, la mise en œuvre du déflecteur à bulles ne peut être assurée par une personne sans connaissances spécifiques et sans une bonne condition physique. Ce besoin en compétences et en ressources supplémentaires rend l'utilisation de cet outil plus contraignante et moins accessible que celle du support trois filtres.

Ainsi le support trois filtres se distingue par sa facilité de mise en œuvre, nécessitant peu de ressources humaines et matérielles et aucune compétence particulière. Ce dispositif reste cependant encombrant à transporter et la création d'une mallette ou d'un sac (sans matière plastique) serait une amélioration nécessaire aujourd'hui. À l'inverse, le déflecteur à bulles, demande une mise en œuvre plus complexe et exigeante en termes de ressources humaines, de compétences et de matériel. Une amélioration possible qui a déjà été proposée par les étudiants de EIGSI serait l'obtention d'un enrouleur électrique monté sur roulette afin de transporter le barrage plus facilement et de rendre sa mise en place moins difficile.

Tableau 9 : Notation et critères de la mise en œuvre des outils (Durand, 2024).

Notation	Critères
1	Mise en œuvre difficile : longue, besoin de main d'œuvre
2	Mise en œuvre relativement facile : difficile seule mais faisable, pas très longue
3	Mise en œuvre simple : facile, pas besoin de main d'œuvre

2.4.3 Coût de maintenance

- Support trois filtres

La maintenance du support trois filtres est relativement simple et peu exigeante. Un nettoyage régulier après chaque utilisation est suffisant pour garantir son efficacité et sa longévité. Il est recommandé de le rincer à l'eau déminéralisée afin d'éliminer les éventuels résidus de végétaux coincés. En cas d'utilisation dans des environnements d'eau salée ou saumâtre, un nettoyage approfondi est nécessaire pour éviter la corrosion et l'accumulation de dépôts. Une fois nettoyé, le support doit être stocké dans un environnement propre et sec pour prévenir toute détérioration. Cette routine de maintenance, simple et peu coûteuse, peut être réalisée par une seule personne, ce qui minimise les coûts opérationnels et le temps investi.

- Déflecteur à bulles

En revanche, la maintenance du déflecteur à bulles est plus complexe et exige des ressources humaines et matérielles accrues. Après chaque utilisation, surtout si le dispositif est resté en fonctionnement pendant plusieurs heures, un nettoyage approfondi est nécessaire. Suivant l'environnement où il est installé, il est susceptible de se colmater avec des sédiments ou des végétaux, nécessitant une intervention de plusieurs personnes pour le nettoyer efficacement.

De plus, si le déflecteur à bulles est alimenté par un compresseur à énergie thermique, celui-ci doit être régulièrement rechargé et entretenu pour garantir un fonctionnement optimal. Cette nécessité d'entretien du compresseur ajoute une couche supplémentaire de complexité et de coûts à la maintenance globale du système. Ainsi, la maintenance du déflecteur à bulles, plus lourde et chronophage, représente un investissement continu en temps et en ressources humaines, rendant son exploitation plus coûteuse et exigeante que celle du support trois filtres.

Tableau 10 : Notation et critères de la maintenance des outils (Durand, 2024).

Notation	Critères
1	Maintenance importante : prends beaucoup de temps, coûte chère, nécessite plusieurs personnes.
2	Maintenance moyenne : prends du temps, coûte de l'argent, faisable seul.e
3	Faible maintenance : pas besoin de personne supplémentaire, pas de coût, rapide.

2.4.4 Coût énergétique

Le coût énergétique calculé ici correspondra au coût de la mise en fonctionnement de chacun des deux outils. On prendra comme terrain d'étude la journée test du 7 juillet au quai Maubec pour les calculs des trajets voiture nécessaires.

Le déflecteur à bulles n'est pas un dispositif autonome d'un point de vue énergétique. Il dépend d'un compresseur alimenté à l'énergie thermique. Le compresseur kiloutou fonctionne avec un moteur diesel qui consomme 4,3L/heure de carburant. Il a un réservoir de 30L et une puissance de 14kW. Il

pèse 500 kg. En prenant en considération toutes ces caractéristiques on peut réussir à calculer ses émissions carbone lorsqu'il fonctionne.

1L de carburant diesel rejette 2,6kg de CO₂ dans l'atmosphère on peut étendre ce chiffre à 3,6 kg si l'on prend en compte la fabrication et le transport du carburant (Noblet, 2021 ; « Rejets ou émission de CO₂ par Litre de carburant (Essence, Diesel, GPL) », 2008).

En faisant donc les estimations hautes en prenant les 3,6 kg d'émission de CO₂ pour 1 litre de diesel on obtient les calculs suivants pour une heure de fonctionnement : (un simple produit en croix est appliqué)

1L → 3,6 kg CO₂

4,3 → (4,3 * 3,6) / 1 = **15,48 kg de CO₂** émis par le compresseur pendant 1h de fonctionnement.

Emission carbone lors du transport :

A cela peut s'ajouter le transport du compresseur remorquable en voiture depuis le centre de location du compresseur et le site d'expérimentation :

Pour calculer la quantité de CO₂ émise par un pick-up Ford avec un compresseur remorquable de 500 kg sur un trajet aller-retour de 14 km, nous devons considérer plusieurs facteurs, y compris la consommation de carburant du véhicule et les émissions spécifiques de CO₂ par litre de carburant consommé.

On supposera une consommation moyenne de carburant d'environ 15 litres/100 km sans remorque pour le pick up. La consommation peut augmenter avec une remorque de 500 kg. Estimons une augmentation de 20%, donc environ 18 litres/100 km. Le trajet aller-retour est de 14 km (*Ford® - New Hybrid & Electric Vehicles, SUVs, Crossovers, Trucks, Vans & Cars, s. d.*).

Selon l'ADEME voici les calculs effectués (*Calculer les émissions de carbone de vos trajets, s. d.*) :

$$\text{Consommation de carburant} = \left[\frac{\text{Distance parcourue (km)}}{100} \right] \times \text{Consommation (L/100 km)}$$

Consommation de carburant = [14/100] * 18 = **2.52 L**

Comme vu précédemment la combustion d'un litre de diesel émet environ 3,6 kg de CO₂.

Calcul des émissions totales de CO₂:

Emissions de CO₂ = Consommation de carburant × Emissions de CO₂ par litres

→ Émissions de CO₂ = 2.52 * 3,6 = **9,1 kg de CO₂**

Donc, le pick-up avec un compresseur remorquable de 500 kg émettrait environ **9,1 kg de CO₂** pour un trajet aller-retour de 14 km.

Un peu moins de **24,6 kg de CO₂** a été émis au total pendant cette expérimentation. Le compresseur n'a pas fonctionné pendant une heure complète. A titre de comparaison, une voiture émet environ 120g de CO₂ par kilomètres soit 12kg pour 100km parcours (*Émissions de CO₂ des voitures*, 2019). Ainsi l'utilisation du déflecteur à bulle pendant 1h et le trajet associé correspond environ à un trajet en voiture de 200km (*Émissions de CO₂ des voitures*, 2019).

La mise en fonctionnement du support trois filtres revient uniquement à son transport en voiture de son lieu de stockage au site de prélèvement. La même voiture sera utilisée, le lieu de stockage du support trois filtres se trouve à Perigny dans les bâtiments de l'entreprise d'insertion ENVIE. Le trajet fait 5,5 km soit un aller-retour de 11km au total. On reprend les calculs précédents et on obtient un rejet de **5,94kg de CO₂** pour transporter le support trois filtres jusqu'au quai Maubec. On notera tout de même que les analyses des filtres par QUALYSE ont un certain bilan carbone mais qui ne sera pas déterminée ici car nous n'avons pas les informations le concernant.

L'idéal pour diminuer le bilan carbone du déflecteur à bulles serait de trouver une solution pour que le compresseur marche à l'énergie renouvelable et soit autonome.

Tableau 11 : Notation et critères du bilan carbone de la mise en fonctionnement des outils (Durand, 2024).

Notation	Critères
1	Bilan carbone très élevé, impact sévère (> 15kg CO ₂)
2	Bilan carbone moyen, impact modéré (entre 10 et 15 kg de CO ₂)
3	Bilan carbone très faible, impact négligeable (entre 5 et 10 kg de CO ₂)

2.4.5 L'aspect financier

- Support trois filtres

Le support trois filtres présente un coût de fabrication initial relativement bas, estimé à environ 1500 euros. Ce coût inclut les matériaux et la fabrication artisanale, ce qui permet de maintenir les dépenses à un niveau modéré. Un avantage notable est le coût de maintenance pratiquement nul, car les filtres peuvent être fabriqués à faible coût, de manière domestique. Cependant, le coût principal associé à l'utilisation de cet outil réside dans les analyses réalisées par le laboratoire QUALYSE. Chaque analyse de 10 litres d'eau, nécessitant l'utilisation de trois filtres, reviennent à 1 100 euros hors taxes. Cela représente un investissement récurrent significatif pour chaque cycle d'analyse, et ce coût pourrait augmenter proportionnellement à la fréquence des analyses nécessaires pour des études longitudinales ou des surveillances continues.

- Déflecteur à bulles

Le déflecteur à bulles, bien que moins coûteux en termes de fabrication, présente des coûts d'exploitation plus élevés. Les prototypes ont coûté environ 1000 euros en matières premières, des matériaux simples et facilement accessibles. Cependant, l'opération du déflecteur nécessite des ressources humaines et matérielles plus importantes.

Une matinée de test avec le déflecteur à bulles implique l'utilisation d'un compresseur pendant une heure, dont la location pour 24 heures coûte environ 100 euros. A cela s'ajoute le coût de l'essence consommée. De plus, l'utilisation de cet outil exige la présence d'au moins deux personnes pour assurer son bon fonctionnement, augmentant ainsi les coûts en ressources humaines. En cas de récupération de macrodéchets, une étape chronophage de tri est nécessaire, ce qui ajoute des coûts en main-d'œuvre. De plus, la collecte des déchets avec une épuisette nécessiterait deux personnes supplémentaires, ce qui augmenterait encore les coûts opérationnels. Pour une utilisation continue et en milieu nautique, il serait nécessaire d'employer une personne agréée pour la manipulation de l'engin nautique, ajoutant un coût supplémentaire.

Une solution envisagée pour mettre en place un barrage à bulles opérationnel, efficace et viable qui marche 24/27 serait de faire appel à la société Hollandaise : The Great Bubble Barrier. L'investissement pour l'implantation de leur dispositif serait extrêmement élevé, estimé à 350 000 euros (« Bubble Barrier Amsterdam », s. d.).

Bien que le support trois filtres présente un coût initial et de maintenance faible, les coûts élevés des analyses en laboratoire constituent un obstacle financier majeur pour des études à long terme. En revanche, le déflecteur à bulles, bien que moins coûteux à fabriquer, nécessite des investissements significatifs en ressources humaines et en équipements pour son fonctionnement et sa maintenance. L'optimisation des coûts opérationnels et l'évaluation continue de la pertinence financière des deux dispositifs sont donc cruciales pour un déploiement efficace et durable dans le cadre des projets de surveillance des microplastiques.

Tableau 12 : Notation et critères de l'aspect financier de la mise en œuvre, le fonctionnement et la maintenance des outils (Durand, 2024).

Notation	Critères
1	Coût élevé
2	Coût moyen
3	Coût faible

2.4.6 Impact écologique

Comme mentionné dans la section sur le coût énergétique des outils et leur utilisation, il est clair que leur emploi n'est pas neutre et entraîne certaines nuisances. Le déflecteur à bulles, bien que conçu pour minimiser l'impact écologique, pose des questions sur l'impact sonore du compresseur, qui génère 94 décibels. Ce niveau sonore constitue une nuisance pour les humains et les habitations environnantes, ce qui empêche l'utilisation continue du dispositif 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. Le compresseur, en générant du bruit et des vibrations, pourrait perturber certaines espèces. Une solution possible serait d'envisager l'installation du compresseur dans une boîte isolée phonétiquement, comme proposé dans le projet néerlandais "The Great Bubble Barrier".

Le mécanisme de rideau de bulles est couramment utilisé lors de travaux maritimes de grande envergure (tels que l'installation d'éoliennes offshore, les explosions maritimes, et les plateformes pétrolières) pour limiter la propagation du bruit dans l'eau et réduire les impacts sur la faune marine (Des rideaux de bulles pour atténuer les bruits sous-marins, s.d.). Cependant, nous ne pouvons pas encore confirmer si le rideau de bulles de notre dispositif a un impact sur la faune aquatique ou non.

Il est également important de noter que l'utilisation de ces dispositifs a un impact sur les émissions de gaz à effet de serre, en raison de leur transport par un véhicule thermique et de l'utilisation d'un compresseur à énergie thermique pour le déflecteur à bulles (voir section 2.4.4 sur le coût énergétique).

Tableau 13 : Notation et critères de l'impact écologique possible des outils (Durand, 2024).

Notation	Critères
1	Impact écologie important dommages irréversibles
2	Impact écologique modéré, dommages réversibles
3	Impact très faible

On peut résumer chacune des notes attribuées pour chaque outil dans le tableau suivant :

Tableau 14: Tableau de scoring final après l'analyse critique et l'étude comparative des deux outils utilisés par TEO (Durand, 2024).

	Support trois filtres		Déflecteur à bulles	
Critères	Note	Observations	Note	Observations
Pertinence des résultats	2	Résultats pertinents, nécessite encore des améliorations et des tests	1	Aucun résultat
Mise en œuvre	3	Très facile et simple d'utilisation	1	Difficile, longue et nécessite de la main d'œuvre
Maintenance	3	Maintenance quasi nulle mise à part un nettoyage à l'eau après utilisation	1	Maintenance lourde et coûteuse
Coût énergétique	3	Bilan carbone de 5,94 kg de CO2 lié au transport uniquement	1	Bilan carbone de 24,6 kg de CO2, lié au transport et l'utilisation du dispositif
Aspect Financier	2	Coût d'analyse élevé mais faible coût de fabrication	2	Coût de fabrication faible mais coût de maintenance et de mise en œuvre élevé
Impact écologique	3	Impact écologique faible	2	Nuisances sonores et impact sur la faune plausible
TOTAL / 18	16		8	

Le tableau 14 résume les notes attribuées à chacun des outils après l'analyse de leur utilisation et de leur impact. Le support trois filtres obtient une note de 16/18 et le déflecteur obtient 8/18. Il est évident à la vue de ces résultats que l'outil support trois filtres est plus fiable, pertinent et facile d'utilisation pour l'analyse des flux de microplastique. Mais également pour la mise en place d'un suivi

des concentrations sur l'estuaire de la Gironde dans le cadre de l'Observatoire régional, cet outil semble plus adapté. Il est facilement reproductible et ne coûte pas cher à la construction.

Le déflecteur à bulles nécessite plus amples recherches et tests pour le rendre optimal. Il ne faut pas exclure la pertinence de cet outil qui pourrait réellement servir d'indicateur de contamination des débris plastiques dans les cours d'eau. Il s'agit de réaliser une étude plus approfondie pour trouver le lieu le plus pertinent pour son installation, essayer également de trouver une autre source d'énergie plus durable pour l'alimenter (panneau solaire) et trouver des solutions pour faciliter sa mise en place. L'utilisation du support trois filtres pourrait être couplée avec une fiche de prélèvement afin de déterminer les conditions météorologiques à chaque prélèvement (annexe 1). Plusieurs facteurs peuvent influencer la présence de débris plastiques. On ne peut pas aujourd'hui dire avec certitude quels sont les facteurs influençant cette concentration et ces flux.

CONCLUSION

Pour conclure, ce rapport de stage fait l'état des connaissances sur les défis environnementaux posés par les déchets plastiques, qui affectent gravement les écosystèmes marins et terrestres et présentent des risques pour la santé humaine. Les déchets plastiques se retrouvent soumis à de multiples facteurs de fragmentation dans l'environnement et deviennent ainsi des microplastiques. La capacité de propagation des microplastiques au travers des compartiment environnementaux posent de graves problèmes d'accumulation dans les chaînes alimentaires. Ces particules extrêmement petites et dangereuses représentent également un enjeu mondial de pollution en devant le véhicule de substances toxiques pouvant se transmettre entre les organismes. De par leur taille et leur mobilité il est très difficile de les quantifier, afin de rendre compte de l'état de la pollution aujourd'hui. Un défi majeur d'uniformisation des protocoles d'échantillonnage et des techniques d'analyses des microplastiques est en cours. Les scientifiques tentent de fournir des données sur les contaminations des écosystèmes par ces particules dans le but d'aider les pouvoirs publics dans la lutte contre la pollution plastique. Le bureau d'étude TEO s'est ainsi proposé comme coordinateur du projet Observatoire régional dans un objectif double. Celui de compiler les données d'un réseau d'acteurs partenaires d'une part, et de créer des outils qui servent d'indicateur de la pollution microplastiques d'autre part. C'est dans cette optique que les outils déflecteur à bulles et support trois filtres ont commencé à être testés. Ils présentent chacun des avantages et des inconvénients qui nécessitent une analyse multidimensionnelle déterminant leurs impacts, leur coût, leur technicité et leur praticité.

Les expérimentations menées avec le déflecteur à bulles ont montré des résultats mitigés. Ce dispositif a été conçu pour intercepter les déchets plastiques dans des zones de faible courant, comme observé lors des tests dans le canal de Marans. Cependant, les tests en conditions de courant plus fort, comme à la porte éclose du Gabut, ont révélé des limites majeures. Le dispositif n'était pas suffisamment lesté pour résister aux courants plus intenses, ce qui a compromis son efficacité. Ces résultats soulignent la nécessité de revoir la structure du déflecteur à bulles pour améliorer sa robustesse et son efficacité dans des conditions variées. De plus, les coûts à la fois humains, financiers, et opérationnels de ce dispositif ne permettent pas d'en faire un outil simple d'utilisation et reproductible.

De même, le support trois filtres a montré des résultats inégaux lors des prélèvements mais répond à l'objectif énoncé et permet de gagner un temps précieux d'analyse. Cet outil a prouvé son efficacité et représente un dispositif adapté à la mise en place de l'Observatoire régional. Son protocole

est simple, reproductible et efficace. Bien qu'il ait permis de détecter des microplastiques, les résultats ont varié de manière significative, ce qui révèle la complexité des dynamiques des flux de microplastiques. Ces variations compliquent la comparaison des données et mettent en lumière le besoin crucial de standardiser les protocoles d'échantillonnage pour obtenir des données comparables et fiables comme pourra le faire cet outil.

Bien que les outils développés par TEO représentent des avancées significatives dans la surveillance des microplastiques, plusieurs défis techniques et méthodologiques doivent être surmontés. Pour améliorer l'efficacité des protocoles et la fiabilité des données, il est essentiel de continuer les recherches et les expérimentations, d'ajuster les dispositifs en fonction des leçons apprises, et de promouvoir une standardisation accrue des méthodes d'analyse. Ces efforts contribueront à renforcer la base de connaissances et de données nécessaire pour une gestion efficace des microplastiques, à l'échelle de l'Observatoire régional.

BIBLIOGRAPHIE

- Alassali, A., Picuno, C., Chong, Z. K., Guo, J., Maletz, R., & Kuchta, K. (2021). Towards higher quality of recycled plastics: Limitations from the material's perspective. *Sustainability*, 13(23), 13266.
- Anbumani, S., & Kakkar, P. (2018). Ecotoxicological effects of microplastics on biota: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 14373-14396.
- Assoumani, A., strub, M. P., Lardy-Fontan, S., Alasonati, E., & Galgani, F. (2020). Microplastiques dans les eaux de surface continentales.
- Bajt, O. (2021), From plastics to microplastics and organisms. *FEBS Open Bio*, 11: 954-966. <https://doi.org/10.1002/2211-5463.13120>
- Ballent, A., Corcoran, P. L., Madden, O., Helm, P. A., & Longstaffe, F. J. (2016). Sources and sinks of microplastics in Canadian Lake Ontario nearshore, tributary and beach sediments. *Marine pollution bulletin*, 110(1), 383-395.
- Bouguerra, M. L. (2022). Vers la plastification de l'environnement?. *Écologie et politique*, (1), 127-134.
- Bourgeon Sophie. (2023). Ecotoxicology in the Arctic: Persistent Organic Pollutants. UiT Arctic university of Norway, BIO3009. Support pédagogique.
- Bubble Barrier Amsterdam. (s. d.). *The Great Bubble Barrier®*. Consulté 2 juillet 2024, à l'adresse <https://thegreatbubblebarrier.com/bubble-barrier-amsterdam/>
- *Calculer les émissions de carbone de vos trajets*. (s. d.). Agir pour la transition écologique | ADEME. Consulté 18 juillet 2024, à l'adresse <https://agirpourlatransition.ademe.fr/particuliers/bureau/calculer-emissions-carbone-trajets>
- Charlotte Lefebvre. Distribution spatiale et temporelle des microplastiques et particules anthropiques au sein d'une lagune côtière mésotidale, le Bassin d'Arcachon. Approche multi-compartiments. Ecotoxicologie. Université de Bordeaux, 2022. Français. {NNT : 2022BORD0230}.
- CEDRE. (2023). Informations clés sur les granulés plastiques industriels. Dans <https://www.cedre.fr/Menu-secondaire/A-la-une/Informations-cles-sur-les-Granules-Plastiques-industriels>.
- CEHTRA - Consultancy for Environmental and Human Toxicology and Risk Assessment., & Durou, C. (2024). *Le contexte réglementaire sur les microplastiques : REACH : Microplastiques et nanoplastiques - Enjeux d'analyse*.
- Chelin Jamie Hu, Marcus A Garcia, Alexander Nihart, Rui Liu, Lei Yin, Natalie Adolphi, Daniel F Gallego, Huining Kang, Matthew J Campen, Xiaozhong Yu, Microplastic presence in dog and human testis and its potential association with sperm count and weights of testis and epididymis, *Toxicological Sciences*, 2024;, kfae060, <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfae060>
- Chen, Y., Wen, D., Pei, J., Fei, Y., Ouyang, D., Zhang, H., & Luo, Y. (2020). Identification and quantification of microplastics using Fourier-transform infrared spectroscopy: current status and future prospects. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 18, 14-19.
- Conesa, J. A., Nuñez, S. S., Ortuño, N., & Moltó, J. (2021). PAH and POP presence in plastic waste and recyclates: state of the art. *Energies*, 14(12), 3451.

- Cverenkárová, K., Valachovičová, M., Mackuľák, T., Žemlička, L., & Bírošová, L. (2021). Microplastics in the food chain. *Life*, 11(12), 1349.
- Dabboub, S. (2023). *Etude de la pollution par les microplastiques dans les sédiments et les eaux de surfaces au Golfe de Tunis, plages de Ghar El Melh et Chatt Mami* (Doctoral dissertation, Université de Tunis El Manar. Faculté des Sciences de Tunis).
- de Carvalho, A. R., Garcia, F., Riem-Galliano, L., Tudesque, L., Albignac, M., ter Halle, A., & Cucherousset, J. (2021). Urbanization and hydrological conditions drive the spatial and temporal variability of microplastic pollution in the Garonne River. *Science of The Total Environment*, 769, 144479. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144479>
- *Des rideaux de bulles pour atténuer les bruits sous-marins*. (s. d.). ENSTA Bretagne. Consulté 24 juillet 2024, à l'adresse <https://www.ensta-bretagne.fr/fr/des-rideaux-de-bulles-pour-attenuer-les-bruits-sous-marins>
- editeur_port. (2021, février 10). Port de Plaisance de La Rochelle - Environnement : Un engagement traduit par des actions. *Port de Plaisance de La Rochelle*. <https://www.portlarochelle.com/proprete-du-port-une-innovation-en-test/>
- *Émissions de CO2 des voitures : Faits et chiffres (infographie)*. (2019, mars 22). Thèmes | Parlement européen. <https://www.europarl.europa.eu/topics/fr/article/20190313STO31218/emissions-de-co2-des-voitures-faits-et-chiffres-infographie>
- minisFord®—*New Hybrid & Electric Vehicles, SUVs, Crossovers, Trucks, Vans & Cars*. (s. d.). Ford Motor Company. Consulté 18 juillet 2024, à l'adresse <https://www.ford.com/>
- Geyer, R., J.R. Jambeck, and K.L. Law. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3(7):e1700782, <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics : Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179-199. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>
- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., & Zeng, E. Y. (2020). A global perspective on microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(1), e2018JC014719.
- Hansen, E.; Nilsson, N.H.; Vium, K.S.R. (2014) *Hazardous Substances in Plastics*. Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency: Odense, Denmark. ISBN 8793283318.
- Hardesty BD, Harari J, Isobe A, Lebreton L, Maximenko N, Potemra JT, Van_sebille K, Vethaak D and Wilcox C (2017) Using numerical model simulations to improve the understanding of microplastic distribution and pathways in the marine environment. *Front. Mar. Sci.* 4:30.doi:10.3389/fmars.2017.00030
- Herzke Dorte, (2023). Plastic and microplastic in the environment. UiT Arctic university of Norway, BIO3009. Support pedagogique.
- Hoellein, T. J., Shogren, A. J., Tank, J. L., Risteca, P., & Kelly, J. J. (2019). Microplastic deposition velocity in streams follows patterns for naturally occurring allochthonous particles. *Scientific reports*, 9(1), 3740.
- Horton, A. A., Walton, A., Spurgeon, D. J., Lahive, E., & Svendsen, C. (2017). Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of the total environment*, 586, 127-141.

- *Iron and Steel Production* | EU-BRITE. (s.d.). Consulté 19 juillet 2024, à l'adresse <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/iron-and-steel-production>
- Jung, M.R., Horgen, F.D., Orski, S.V., Rodriguez C., V., Beers, K.L., Balazs, G.H., Jones, T.T., Work, T.M., Brignac, K.C., Royer, S.-J., Hyrenbach, K.D., Jensen, B.A., Lynch, J.M., 2018. Validation of ATR FT-IR to identify polymers of plastic marine debris, including those ingested by marine organisms. *Marine Pollution Bulletin* 127, 704–716. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.061>
- Kataoka, T., Nihei, Y., Kudou, K., & Hinata, H. (2019). Assessment of the sources and inflow processes of microplastics in the river environments of Japan. *Environmental pollution*, 244, 958-965.
- Klein, S., Dimzon, I. K., Eubeler, J., & Knepper, T. P. (2018). Analysis, occurrence, and degradation of microplastics in the aqueous environment. *Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?*, 51-67.
- Koelmans, A.A., Mohamed Nor, N.H., Hermesen, E., Kooi, M., Mintenig, S.M., De France, J., 2019. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water* <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.02.054>
- Koelmans, A. A., Besseling, E., Wegner, A., & Foekema, E. M. (2013). Plastic as a carrier of POPs to aquatic organisms: a model analysis. *Environmental science & technology*, 47(14), 7812-7820.
- *La Pagaie Sauvage*. (s.d.). La Pagaie Sauvage. Consulté 19 juin 2024, à l'adresse <https://lapagaiesauvage.org/>
- Laurène, L. F. (2024, 24 avril). *Lutte contre la pollution plastique*. Ministère de la Transition Écologique et de la Cohésion des Territoires. <https://www.ecologie.gouv.fr/lutte-contre-pollution-plastique>
- *Le plastique en 10 chiffres*. (2021, 26 mars). National Geographic. <https://www.nationalgeographic.fr/le-plastique-en-10-chiffres>
- *Les interventions pédagogiques que nous proposons*. (s.d.). Consulté 21 juillet 2024, à l'adresse <https://echo-mer.com/interventions-pedagogiques#epuisetdecem>
- Les plastiques dans l'environnement : Rapport de l'Académie des sciences. (2021). Dans <https://www.academie-sciences.fr>.
- Li, J., Liu, H., & Paul Chen, J. (2018). Microplastics in freshwater systems : A review on occurrence, environmental effects, and methods for microplastics detection. *Water Research*, 137, 362-374. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.056>
- Liu, G., Zhu, Z., Yang, Y., Sun, Y., Yu, F., & Ma, J. (2019). Sorption behavior and mechanism of hydrophilic organic chemicals to virgin and aged microplastics in freshwater and seawater. *Environmental Pollution*, 246, 26-33.
- Malli, A., Corella-Puertas, E., Hajjar, C., & Boulay, A. M. (2022). Transport mechanisms and fate of microplastics in estuarine compartments: A review. *Marine pollution bulletin*, 177, 113553.
- Matthias C. Rillig, Shin Woong Kim, Tae-Young Kim, and Walter R. Waldman (2021). The Global Plastic Toxicity Debt. *Environmental Science & Technology*. 55 (5), 2717-2719. DOI: 10.1021/acs.est.0c07781.
- Mendoza, L. M. R., & Balcer, M. (2019). Microplastics in freshwater environments: a review of quantification assessment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 113, 402-408.

- Migwi, F. K., Ogunah, J. A., & Kiratu, J. M. (2020). Occurrence and spatial distribution of microplastics in the surface waters of Lake Naivasha, Kenya. *Environmental toxicology and chemistry*, 39(4), 765-774.
- Ministère de la Transition écologique et solidaire. (2020). *Plan d'action "Zéro plastique en mer 2020-2025"*. Gouvernement de la République Française. [PDF]. Disponible à l'adresse : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/DGALN_plan-actions-zero-dechet-plastique_web.pdf
- Mintenig, S. M., Int-Veen, I., Löder, M. G., Primpke, S., & Gerdt, G. (2017). Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water research*, 108, 365-372.
- Nielsen, T. D., Hasselbalch, J., Holmberg, K., & Stripple, J. (2020). Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 9(1), e360.
- NOAA / National Geographic Society & National Geographic. (2018, 26 mars). *Une nouvelle étude vient de démontrer que cette décharge flottante est 4 à 16 fois plus étendue que ce qui avait été précédemment estimé.* National Geographic. <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/le-vortex-de-dechets-du-pacifique-nord-ferait-trois-fois-la-taille-de-la-france>
- Noblet, G. (2021, novembre 26). *Empreinte environnementale, calcul des émissions de CO2.* NOBLET. <https://groupenoblet.com/empreinte-environnementale-calcul-des-emissions-de-co2/>
- Petersen, F., & Hubbart, J. A. (2021). The occurrence and transport of microplastics: The state of the science. *Science of the Total Environment*, 758, 143936.
- Pironti, C., Ricciardi, M., Motta, O., Miele, Y., Proto, A., & Montano, L. (2021). Microplastics in the environment: intake through the food web, human exposure and toxicological effects. *Toxics*, 9(9), 224.
- Pollutec. (2023, 22 décembre). *Eutrophisation des milieux aquatiques – Causes, conséquences et solutions.* Pollutec Learn & Connect. <https://learnandconnect.pollutec.com/eutrophisation-des-milieux-aquatiques-causes-consequences-et-solutions/>
- Poulain-Zarcos, M. (2020). *Etude de la distribution verticale de particules plastiques dans l'océan: caractérisation, modélisation et comparaison avec des observations* (Doctoral dissertation).
- Preston-Whyte, F., Silburn, B., Meakins, B., Bakir, A., Pillay, K., Worship, M., Paruk, S., Mdazuka, Y., Mooi, G., Harmer, R., Doran, D., Tooley, F., & Maes, T. (2021). Meso- and microplastics monitoring in harbour environments : A case study for the Port of Durban, South Africa. *Marine Pollution Bulletin*, 163, 111948. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111948>
- Reis de Carvalho, A. (2021). *Suivi spatio-temporel de la pollution de MP dans la Garonne et potentiel transfert dans le réseau trophique* (Doctoral dissertation, Toulouse 3).
- Rejets ou émission de CO2 par Litre de carburant (Essence, Diesel, GPL). (2008, mars 7). *économie, écologie, énergies, innovations et société.* <https://www.econologie.com/emissions-co2-litre-carburant-essence-diesel-ou-gpl/>
- Rochman, C.M. 2020. The story of plastic pollution: From the distant ocean gyres to the global policy stage. *Oceanography* 33(3):60–70, <https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.308>.

- Rodrigues, J. P., Duarte, A. C., Santos-Echeandía, J., & Rocha-Santos, T. (2019). Significance of interactions between microplastics and POPs in the marine environment: a critical overview. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 111, 252-260.
- Rodrigues, M. O., Abrantes, N., Gonçalves, F. J. M., Nogueira, H., Marques, J. C., & Gonçalves, A. M. M. (2018). Spatial and temporal distribution of microplastics in water and sediments of a freshwater system (Antuã River, Portugal). *Science of the total environment*, 633, 1549-1559.
- Saalberg, Y., & Wolff, M. (2016). VOC breath biomarkers in lung cancer. *Clinica Chimica Acta*, 459, 5-9.
- Scherer, C., Weber, A., Stock, F., Vurusic, S., Egerci, H., Kochleus, C., ... & Reifferscheid, G. (2020). Comparative assessment of microplastics in water and sediment of a large European river. *Science of the Total Environment*, 738, 139866.
- Sparks, C., Viljoen, N., Hill, D., Lassen, J., & Awe, A. (2023). Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water and Mussels Sampled from Cape Town Harbour and Two Oceans Aquarium, South Africa. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 110(6), 104. <https://doi.org/10.1007/s00128-023-03737-1>
- TEO. Bureau d'études coopératif : une démarche écoresponsable - Bac à marée - Société TEO. (2024, 12 février). Bac À Marée- Société TEO. <https://www.teo-la-rochelle.org/>
- Tirkey, A., & Upadhyay, L. S. B. (2021). Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics. *Marine pollution bulletin*, 170, 112604.
- *Tout savoir sur le statut de Scic.* (s. d.). <https://www.les-scop.coop/les-scic>
- Tramoy, R. (2023, 23 février). *Pollution plastique : des macro- aux microplastiques*. Ingenius. Consulté le 21 mai 2024, à l'adresse <https://ingenius.ecoledesponts.fr/articles/pollution-plastique-des-macro-aux-microplastiques/>
- Tramoy, R., Gasperi, J., Colasse, L., & Tassin, B. (2020). 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, 110894.
- Ullah, S., Ahmad, S., Guo, X., Ullah, S., Ullah, S., Nabi, G., & Wanghe, K. (2023). A review of the endocrine disrupting effects of micro and nano plastic and their associated chemicals in mammals. *Frontiers in Endocrinology*, 13, 1084236.
- *Vers un traité mondial pour mettre fin à la pollution plastique | Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires.* (s. d.). Consulté 11 juillet 2024, à l'adresse <https://www.ecologie.gouv.fr/rendez-vous/traite-mondial-mettre-fin-pollution-plastique>
- Williams, A. T., & Rangel-Buitrago, N. (2022). The past, present, and future of plastic pollution. *Marine Pollution Bulletin*, 176, 113429. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113429>
- Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013). The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review. *Environmental pollution*, 178, 483-492.
- Zambrano, M. C., Pawlak, J. J., Daystar, J., Ankeny, M., Cheng, J. J., & Venditti, R. A. (2019). Microfibers generated from the laundering of cotton, rayon and polyester based fabrics and their aquatic biodegradation. *Marine Pollution Bulletin*, 142, 394–407.
- Zhang, H. (2017). Transport of microplastics in coastal seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 199, 74-86.

Table des figures

<i>Figure 1 : Différents types de polymères utilisés dans la fabrication du plastique et leur pourcentage d'utilisation en Europe (Herzke, 2023).</i>	8
<i>Figure 2 : Production mondiale, utilisation et devenir des résines polymères, des fibres synthétiques et des additifs (1950 à 2015 ; en millions de tonnes métriques) (Geyer, 2017).</i>	9
<i>Figure 3 : Photo de Granulés Plastiques Industriels (GPI) trouvés sur une plage (CEDRE, 2023).</i>	10
<i>Figure 4 : Voies de dégradation des polymères synthétiques dans l'environnement aquatique avec les processus de dégradation impliqués et les étapes intermédiaires jusqu'à la minéralisation complète (Klein et al., 2018).</i>	12
<i>Figure 5 : Les sources des déchets anthropiques qui pénètrent dans les océans (ovales), les réservoirs, ou les compartiments océaniques où les débris s'accumulent (box) et les processus avec lesquels les particules bougent entre les compartiments (Hardesty et al., 2017).</i>	14
<i>Figure 6 : Différentes voies de transfert des microplastiques à travers la chaîne alimentaire dans les régions de l'Arctique (Herzke, 2023).</i>	16
<i>Figure 7 : Répartition des méthodes d'échantillonnage de microplastiques en eaux de surface continentales (d'après la revue de Koelmans et al. (2019)) (Assoumani et al., 2020).</i>	20
<i>Figure 8 : Cartographie du maillage d'indicateur de la présence de plastique sur le territoire de l'estuaire de la Gironde (TEO, 2024).</i>	26
<i>Figure 9 : Schéma résumant le contexte dans lequel s'inscrit ce mémoire et les projets de TEO associés (Durand, 2024).</i>	27
<i>Figure 10 : (a) schéma du fonctionnement du déflecteur à bulles (TEO, 2024), (b) deuxième prototype du déflecteur à bulles en fonctionnement à la darse du vieux port (bassin des Yachts) de La Rochelle (N. Durand).</i>	29
<i>Figure 11 : matériels utilisés pour l'utilisation du déflecteur à bulles. (a) tuyau de 25 mètres de long (second prototype), (b) réceptacle à déchets aquatiques (TEO,2024), (c) le compresseur d'air (Durand, 2024).</i>	30
<i>Figure 12 : (a) Schéma du modèle d'assemblage du support trois filtres (TEO, 2024), (b) le support trois filtres pendant son utilisation sur le Quai Maubec (La Rochelle) (Durand, 2024).</i>	31
<i>Figure 13 : Image satellite de la situation géographique du pont levant du Gabut (Google earth, 2024).</i>	32

<i>Figure 14 : Image satellite de la situation géographique de la Darse du vieux port à l'exutoire des eaux pluviales (Google earth ; Durand, 2024).</i>	33
<i>Figure 15 : Photo de la darse du vieux port et son accumulation de déchets et d'algues au niveau du déversoir d'eaux pluviales (Durand, 2024).</i>	33
<i>Figure 16 : localisation des différents test réalisés du projet BUL'STOP à La Rochelle entre l'année 2023 et 2024 (Durand, 2024).</i>	35
<i>Figure 17 : Photo prise lors du premier test du support trois filtres dans le bassin des chalutiers le 10 mai 2024 (Durand, 2024).</i>	36
<i>Figure 18 : Photo prise lors du prélèvement d'eau à l'aide du support trois filtres dans la Garonne à Saint-Louis-de-Montferrand (Durand, 2024).</i>	37
<i>Figure 19: Localisation des zones de prélèvement du support trois filtres.</i>	37
<i>Figure 20 : photo du premier prototype de déflecteur à bulle réalisé par les étudiants ingénieur d'EIGSI (TEO,2023).</i>	38
<i>Figure 21 : Localisation de la mise en place du déflecteur à bulles lors de la journée test du 5/07/2024 et prise de vue lors des tests (Google earth, Durand,2024).</i>	40
<i>Figure 22 : représentation du matériel utilisé pour l'utilisation du support trois filtres (Durand, 2024).</i>	41
<i>Figure 23 : Filtres dans les boîtes de pétris annotées (Durand, 2024).</i>	42
<i>Figure 24 : logigramme des résultats du test du déflecteur à bulles pendant la matinée du 5/07/2024 (Durand, 2024).</i>	48
<i>Figure 25 : Photo de l'accumulation des algues sur le dispositif pendant l'expérimentation (Durand, 2024).</i>	49

Table des tableaux

<i>Tableau 1 : Tableau des résultats résumés par la pagaie sauvage sur différentes études (La Pagaie Sauvage, s. d.).....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 2 : Tableau des résultats de l'analyse des trois bouteilles triplicats des trois prélèvements d'eau (3x 1L dans le bassin des chalutiers le 10/05/2024)(Durand, 2024).....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 3 : Résultats de l'analyse des trois filtres contenus dans le support lors des trois prélèvements d'eau (3x 10L) dans le bassin des chalutiers le 10/05/2024 (Durand, 2024)......</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 4 : Tableau des résultats de l'analyse de 2 filtres du support trois filtres lors de la sortie sur la Garonne à Saint-Louis-de-Montferrand (Durand, 2024).</i>	<i>44</i>
<i>Tableau 5: Nombre de particules/L pour les eaux de surface rapportées dans la littérature pour plusieurs endroits. (S.D. : écart-type, S.E. : erreur-type) (Preston-Whyte et al., 2021).....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 6 : Tableau des résultats des analyses microplastiques réalisé lors de l'expérimentation de juillet avec le support trois filtres (Durand, 2024).</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 7: Moyennes des résultats de prélèvements des différents sites analysés avec le support trois filtres (Durand, 2024).</i>	<i>46</i>
<i>Tableau 8 : Notation et critères du bilan de pertinence de l'outil et des résultats obtenus (Durand, 2024).....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 9 : Notation et critères de la mise en œuvre des outils (Durand, 2024).....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 10 : Notation et critères de la maintenance des outils (Durand, 2024).</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 11 : Notation et critères du bilan carbone de la mise en fonctionnement des outils (Durand, 2024).....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 12 : Notation et critères de l'aspect financier de la mise en œuvre, le fonctionnement et la maintenance des outils (Durand, 2024).</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 13 : Notation et critères de l'impact écologique possible des outils (Durand, 2024).....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 14: Tableau de scoring final après l'analyse critique et l'étude comparative des deux outils utilisés par TEO (Durand, 2024).....</i>	<i>57</i>

Annexes

Annexe 1 : Exemple des critères pour la fiche de prélèvement du support trois filtres (Durand, 2024).

N° prélèvement	Le projet	Nom de la personne qui a prélevé	Date	Heure	Site	Adresse	CP/commune	Lieu	Point GPS	Vent (force)	Vent (direction)	Soleil (indice UV)	Couverture nuageuse	Températur e de l'air	Température de l'eau	Courant (direction)	Courant (vitesse)	Type de milieu	Observations/ commentaires



Analyse critique des protocoles et des outils associés créent par le bureau d'étude Territoires, Environnement, Océan (TEO) dans le but d'harmoniser les techniques de suivis des flux de microplastiques.

Ninon Durand

2023-2024

Mots Clés : Microplastiques, Protocoles, Déflecteur à bulles, Support trois filtres, Analyse.

Résumé : Les débris plastiques, une fois dans l'environnement, subissent divers processus qui les fragmentent en microplastiques. Ces particules transportent de nombreuses molécules toxiques, impactant ainsi les écosystèmes. Le bureau d'étude TEO organise un réseau d'acteurs au sein d'un "Observatoire régional" pour répondre au défi de l'harmonisation des protocoles de collecte et d'analyse des microplastiques. Deux outils ont été développés à cette fin. Le déflecteur à bulles, qui utilise un rideau de bulles généré par un compresseur, sert à dévier les déchets (macro et micro). Le support trois filtres permet de filtrer 10 litres d'eau directement sur le terrain avec trois filtres de différentes porosités. Ces deux dispositifs peuvent être combinés pour assurer un suivi des microplastiques. Cependant, le déflecteur à bulles présente de nombreux inconvénients, notamment financiers, en termes de mise en œuvre, d'impact écologique et de maintenance. En revanche, le support trois filtres se révèle être un outil performant, viable et pertinent, malgré un coût de traitement élevé mais indispensable.

Abstract: Once in the environment, plastic debris undergoes various processes that fragment them into microplastics. These particles transport numerous toxic molecules, thereby impacting ecosystems. The TEO consulting firm is organizing a network of stakeholders within a "Regional Observatory" to address the challenge of harmonizing protocols for the collection and analysis of microplastics. Two tools have been developed for this purpose. The bubble deflector, which uses a curtain of bubbles generated by a compressor, serves to divert both macro and micro debris. The three-filter support allows for the filtration of 10 liters of water directly in the field using three filters of different porosities. These two devices can be combined to monitor microplastics. However, the bubble deflector presents several drawbacks, including financial costs, implementation challenges, ecological impact, and maintenance needs. In contrast, the three-filter support proves to be an efficient, viable, and relevant tool, despite its high but essential treatment cost.