

# L'Observatoire des Déchets Marins du Parc naturel marin de Mayotte (PNMM) *Mise en place de suivis des microplastiques*



## Rapport de stage

Septembre 2019

Sous la direction de :

Dr Clément LELABOUSSE, Maître de stage, PNMM, [clement.lelabousse@afbiodiversite.fr](mailto:clement.lelabousse@afbiodiversite.fr) Tél : 0639682283  
Dr Delphine BONNET, Directrice du Master BAEMT, Université de Montpellier, [delphine.bonnet@umontpellier.fr](mailto:delphine.bonnet@umontpellier.fr)

**Nikita JOST**



Master 2 BAEMT Université de Montpellier - [nikita.jost@afbiodiversite.fr](mailto:nikita.jost@afbiodiversite.fr) ou [nikitajost@umontpellier.fr](mailto:nikitajost@umontpellier.fr)



## Sommaire

---

<b>Table des illustrations .....</b>	<b>3</b>
<b>Liste des sigles, acronymes et abréviations .....</b>	<b>4</b>
<b>Présentation de la structure d'accueil .....</b>	<b>5</b>
<b>I. Introduction.....</b>	<b>7</b>
<b>II. Matériel et Méthodes .....</b>	<b>13</b>
A. Zone d'étude .....	13
B. Présentation des protocoles de suivi des MD et MP .....	13
1. Recherches bibliographiques.....	13
2. Protocole de suivi des macrodéchets : utilisation de l'existant .....	13
3. Protocoles de suivi des microplastiques et contexte local .....	15
a) Microplastiques des sédiments de plage .....	15
b) Microplastiques présents à la surface de l'eau .....	17
C. Protocole d'analyse des échantillons en laboratoire .....	17
1. Analyse des échantillons .....	17
a) Macrodéchets échoués sur les plages.....	17
b) Microplastiques présents dans les sédiments de plage .....	17
c) Microplastiques présents à la surface de l'eau .....	21
2. Contrôle du risque de contamination des échantillons de microplastiques .....	21
D. Méthodes d'analyses des données .....	23
1. Macrodéchets échoués sur les plages.....	23
2. Microplastiques dans les sédiments des plages.....	25
3. Microplastiques présents à la surface de l'eau .....	25
<b>III. Résultats.....</b>	<b>25</b>
A. Macrodéchets.....	25
B. Microplastiques dans les sédiments de plages .....	27
C. Microplastiques à la surface de l'eau du lagon .....	29
<b>IV. Interprétation/Discussion .....</b>	<b>31</b>
A. Evaluation de l'efficacité des protocoles.....	31
1. Microplastiques .....	35
a) Etude comparative des MP dans les sédiments de plages.....	37
b) Etude comparative des MP à la surface de l'eau .....	37
A. Limites et recommandations des protocoles de suivi.....	39
1. Macrodéchets.....	41
2. Microplastiques .....	41

a) Sur le terrain.....	41
b) En laboratoire.....	43
<b>V. Conclusion et perspectives.....</b>	<b>45</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>48</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>55</b>
<b>Remerciements .....</b>	<b>71</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>72</b>

## Table des illustrations

<b>Figure 1.</b> Liste des 11 descripteurs de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin destiné à permettre de mieux cibler les actions à entreprendre pour atteindre un « bon état écologique » d’ici 2020.....	8
<b>Figure 2.</b> <i>Le PNMM couvre la totalité de la ZEE de l’archipel de Mayotte.....</i>	10
<b>Figure 3.</b> Localisation des 8 sites d’échantillonnage, 5 non anthropisés (vert), 3 nouveaux sites anthropisés expérimentés dans cette étude en 2019 pour les MD (orange).....	12
<b>Figure 4.</b> Schéma d’échantillonnage de macrodéchets de bas en haut de plage suivant le protocole OSPAR (2010).....	16
<b>Figure 5.</b> Schéma du plan d’échantillonnage des sédiments pour l’analyse des microplastiques et de la granulométrie. ....	16
<b>Figure 6.</b> Echantillonnage des MP à la surface de l’eau réalisé à l’aide d’un filet à plancton tiré par un robot ("JellyFishBot").....	16
<b>Figure 7.</b> Colonne de tamis pour séparer les classes de taille des sédiments et des microplastiques.....	18
<b>Figure 8.</b> Ampoule à décanter contenant des sédiments <500µm et 200mL de solution saturée en NaCl.....	18
<b>Figure 9.</b> Colonnes de filtration avec un système de pompage à vide.....	18
<b>Figure 10.</b> Exemple de microplastiques les plus communément retrouvés durant cette étude. Les flèches indiquent où se trouvent les MP. A) Exemple d’un MP de type <i>fibres</i> . B) Exemple d’un MP de type <i>fragment</i> . C) Exemples de deux MP avec en haut une <i>fibres</i> et en bas un <i>fragment</i> . ....	20
<b>Figure 11.</b> Quantité totale de macrodéchets récoltés sur les plages non anthropisées en 2017 et 2018. Les points noirs représentent les moyennes pour chaque site à chaque année et les points de couleurs représentent les données récoltées lors d’une des quatre campagnes d’échantillonnage pendant une année	24
<b>Figure 12.</b> Proportion des différents types de macrodéchets récoltés à chaque site pour tous les suivis confondus. Les sites non anthropisés sont les cinq supérieurs (cadre vert), tandis que les sites anthropisés sont les trois inférieurs (cadre orange). ....	26
<b>Figure 13.</b> Concentration des microplastiques (nombre par kg de sable en poids sec) par rapport à leur classe de taille aux sites non anthropisés.....	26
<b>Figure 14.</b> Proportion des différents types de microplastiques retrouvés dans les échantillons de sédiments de plage des sites non anthropisés.....	28
<b>Figure 15.</b> Concentration des microplastiques dans les sédiments (nombre de MP/kg de sable sec) en fonction de la position de prélèvement sur la plage pour tous les sites confondus .....	28
<b>Figure 16.</b> Moyenne de la concentration de MP (nombre/m <sup>3</sup> d’eau) des sous-échantillons d’eau du lagon filtrée aux abords des cinq sites non anthropisés.....	30
<b>Figure 17.</b> Proportion des différents types de microplastiques retrouvés dans les échantillons d’eau de surface du lagon aux sites non anthropisés.....	30
<b>Figure 18.</b> Différence entre l’entrée d’un filet plancton et l’entrée d’un filet Manta sur la surface échantillonnée.....	44

## Liste des sigles, acronymes et abréviations

---

AAMP : Agence des Aires Marines Protégées

AFB : Agence Française pour la Biodiversité

AMP : Aire marine protégée

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières

CÈDRE : Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux

CGM : Conseil général de Mayotte

CNRS : Centre national de la recherche scientifique

DCE : Directive Cadre sur l'eau

DCSMM : Directive-Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (ou MSFD en anglais)

FREC : Feuille de route économie circulaire

IEDOM : Institut d'Emission des Départements d'Outre-Mer

IFREMER : Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer

ISDND : Installation de stockage de déchets non dangereux

MARPOL : Convention internationale pour la prévention de la pollution par les navires

MEDPOL : Programme d'évaluation et de maîtrise de la pollution marine et côtière dans la région méditerranéenne

MNHN : Muséum national d'histoire naturelle

MTES : Ministère de la transition écologique et solidaire

ODM : Observatoire des Déchets Marins

OSPAR : Convention Oslo-Paris pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du NE

PEDMA : Plan Départemental des Déchets Ménagers et Assimilés

PNMM : Parc Naturel Marin de Mayotte

PREDEC : Plan Régional d'Élimination des Déchets de Chantiers

RNE : Réseau national d'échouage

SAR : Schéma d'Aménagement Régional

SDAARM : Schéma Directeur de l'Aménagement Agricole et Rural de Mayotte

SDAGE : Schéma Directeur de l'Aménagement et de la Gestion des Eaux

SIDEVAM : Syndicat Intercommunal d'Élimination et de Valorisation des déchets de Mayotte

SHOM : Service hydrographique et océanographique de la Marine

SMVM : Schéma de Mise en Valeur de la Mer

ZEE : Zone Economique Exclusive

## Présentation de la structure d'accueil

---

Le Parc naturel marin de Mayotte (PNMM) créé le 18 janvier 2010, est la plus grande Aire marine protégée de France et le deuxième Parc naturel marin après celui de la mer d'Iroise créé en 2007. Il couvre la totalité de la zone économique exclusive (ZEE de 68 381 km<sup>2</sup>) de l'archipel de Mayotte, département français de l'Océan Indien depuis 2011.

Le PNMM vise à la fois le bon état des écosystèmes, des espèces et habitats patrimoniaux ou ordinaires, le bon état des eaux marines, mais aussi l'exploitation durable des activités, les valeurs ajoutées (sociale, économique, scientifique, éducative) ou encore le maintien du patrimoine maritime culturel. C'est un outil de gestion du milieu marin adapté à de grandes étendues marines. Nées de la concertation entre les différents partenaires, sept orientations ont été fixées par le décret de création (PNMM, 2012) : - Faire de Mayotte un pôle d'excellence en matière de connaissance et de suivi des écosystèmes marins tropicaux et de la mangrove - Obtenir une bonne qualité de l'eau dans le lagon, notamment par une gestion appropriée des mangroves et une mobilisation de tous les acteurs - Développer une activité de pêche professionnelle hors du lagon, écologiquement exemplaire et pourvoyeuse d'emplois - Développer les filières aquacoles, en particulier celles qui bénéficient directement aux populations locales - Faire découvrir le milieu marin et sa biodiversité grâce à l'organisation des activités de loisirs et la professionnalisation des acteurs du tourisme - Pérenniser et valoriser les pratiques vivrières et les savoirs traditionnels - Protéger et mettre en valeur le patrimoine naturel, de la mangrove aux espaces océaniques, notamment par la formation et la sensibilisation du plus grand nombre.

Gérés initialement par l'Agence des Aires Marines Protégées (AAMP), les Parcs naturels marins et donc des AMP sont passés depuis sa création en 2015 sous la tutelle de l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB), qui devrait devenir l'Office Français pour la Biodiversité (OFB) à partir de 2020. Actuellement, il existe neuf Parcs naturels marins en France.

Le Conseil de gestion du Parc, composé d'acteurs locaux, assure la gouvernance du Parc. De façon collégiale, il a élaboré le Plan de gestion adopté fin 2012, décide des actions à mener et prend les décisions que met en œuvre l'équipe technique du Parc. Il n'a pas le pouvoir de réglementer, mais peut proposer au Préfet de Mayotte des mesures réglementaires ou techniques ou toute autre mesure adaptée à l'espace du Parc naturel marin de Mayotte.

Les 33 agents du Parc sont salariés de l'AFB (PNMM, 2019). Clément Lelabousse, maître de stage, occupe actuellement le poste de « Chargé de mission qualité de l'eau ». Le budget consommé pour le Parc naturel marin de Mayotte s'est élevé en 2018 à 2 M€ sans les charges salariales (PNMM, 2019). Les moyens nautiques du Parc sont limités à une vedette en aluminium de 9,40 m et un bateau à coque semi-rigide de 6,30 m. Le remplacement de la vedette est prévu courant septembre 2019.

Pour l'axe « qualité de l'eau » et particulièrement pour la problématique « déchets » de son plan de gestion (PNMM, 2012), le parc souhaite à l'avenir (i) disposer d'un modèle de courantologie pour le lagon de Mayotte (ii) pérenniser l'Observatoire des Déchets créé en 2017 (iii) banqueriser les données récoltées sur les déchets (iv) ajouter des suivis sur les microplastiques (v) s'intéresser aux diverses matrices environnementales tels que les fonds marins et la surface de l'eau.

Ce stage s'inscrit donc totalement dans ces derniers objectifs qui illustrent la volonté du PNMM de diminuer l'impact et la récurrence des déchets à Mayotte.

Site du PNMM : <http://www.aires-marines.fr/L-Agence/Organisation/Parcs-naturels-marins/mayotte>



## I. Introduction

---

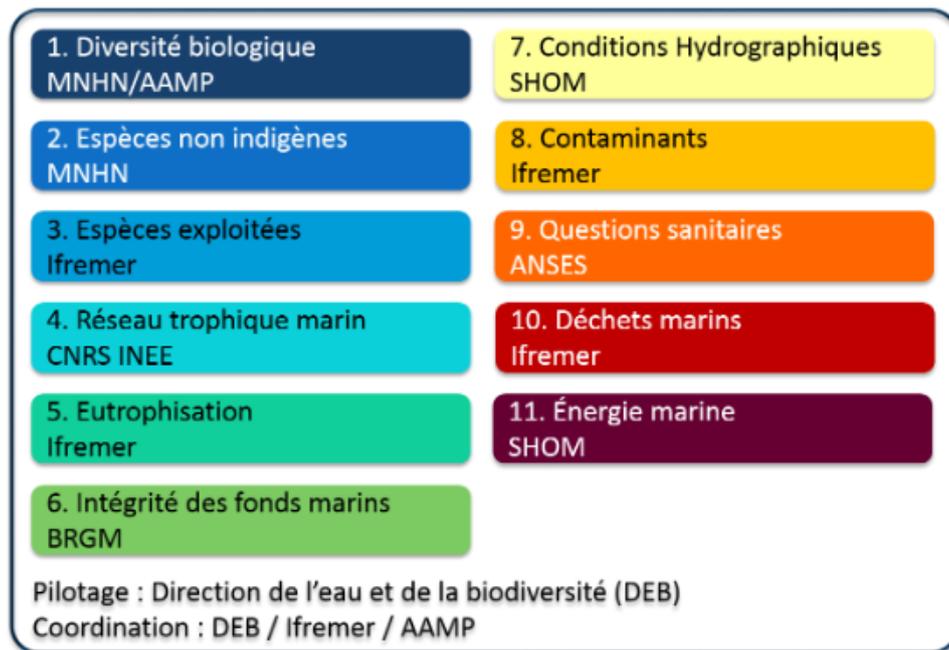
De 2 milliards de tonnes en 2016, la production mondiale de déchets passera à 3,4 milliards par an en 2050, soit une augmentation de 70%, selon le dernier rapport de la Banque mondiale (Kaza *et al.* 2018). Ces déchets peuvent être redistribués mondialement au gré des courants marins et éoliens. On les retrouve des pôles jusqu'à l'équateur (Barnes *et al.* 2009 ; Browne *et al.* 2011 ; Hidalgo-Ruz *et al.* 2012, Andrady, 2011) contaminant les milieux terrestres (Zubris & Richard, 2005), les cours d'eau (Gasperi *et al.*, 2014), les eaux souterraines (Panno *et al.*, 2019), les lacs (Free *et al.*, 2014 ; Eriksen *et al.*, 2013), les estuaires (Sadri & Thompson 2014), les eaux océaniques (Eriksen *et al.*, 2014 ; Law *et al.*, 2010 ), les îles, même isolées (Lavers et Bond, 2017) et leurs écosystèmes marins (Moore *et al.*, 2001) constituant ainsi une menace globale et pérenne (Ryan, 2015 ; Galgani *et al.*, 2015 ; Amélineau *et al.*, 2016).

Selon le Code de l'Environnement (art. L.541-1), un déchet est « *tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien, meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon* ». Le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) met en avant la « *persistance* » des déchets dans le milieu marin en les définissant comme « *tout matériau solide persistant, fabriqué ou transformé, rejeté, éliminé ou abandonné dans l'environnement marin et côtier* ».

La taille et le type de déchets sont importants à définir pour anticiper leurs impacts ainsi que leur traitement. Les distinctions de taille couramment utilisées sont : macrodéchets (MD)  $\geq 2,5\text{cm}$  ;  $5\text{mm} \leq$  mésodéchets  $\geq 2,5\text{cm}$  ; microdéchets  $\leq 5\text{mm}$  (Hidalgo Ruz *et al.*, 2012 ; Arthur *et al.* 2009 et d'autres). Les deux dernières catégories ont la propriété de pouvoir être transportées sur de longues distances par les courants et les vents (Barnes *et al.*, 2009). Le terme de « microdéchets » inclut tous les types de micro- et nano-particules d'origine anthropique de toute nature. Toutefois, depuis 2004 (Thompson, 2004), la majorité des études se focalisent sur les microdéchets de plastiques aussi appelés microplastiques (MP). Ces derniers ont un caractère ubiquitaire dans l'environnement (Barnes *et al.*, 2009 ; Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012 ; Besley *et al.*, 2017). La présente étude porte sur les déchets marins et considère comme macrodéchets ceux supérieurs à 5mm et comme microdéchets ceux inférieurs à 5mm. Parmi les microdéchets, seuls les microplastiques sont considérés.

Dans le milieu marin, les plastiques représentent la majorité des types de déchets (Coe & Rogers 1997 ; Barnes *et al.*, 2009 ; Eriksen *et al.*, 2014), pouvant contribuer jusqu'à 90% du total des débris en mer et sur certaines plages (Laglbauer *et al.*, 2014). Quant aux microplastiques, ces derniers peuvent en représenter plus de la moitié des débris de plastique (Munari *et al.*, 2017 ; Eriksen *et al.*, 2014). Les déchets marins flottants impactent particulièrement la faune marine par ingestion, étranglements, transports de composés toxiques à travers la chaîne alimentaire et d'espèces exogènes (Gregory, 2009 ; Galgani *et al.*, 2014). Outre les différents impacts écosystémiques, les rejets des activités anthropiques ont également des répercussions socio-économiques et sanitaires sur les populations humaines (Thompson *et al.*, 2009 ; Derraik, 2002), particulièrement dans les pays en voie de développement et territoires d'outre-mer français, moins bien équipés en moyens de traitement (Kaza *et al.*, 2018).

Face aux problèmes environnementaux qu'engendrent les déchets et aux pressions écologistes et scientifiques des années 1970, les États ont été progressivement contraints d'agir. À l'échelle communautaire, la commission OSPAR créée en 1998 à la suite de la convention Oslo-Paris (OSPAR) en 1992 est un accord-cadre entre 15 États européens pour protéger l'environnement marin et les ressources de l'Atlantique nord-est. Adoptée en 2008, la Directive-Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM, 2008) établit un cadre d'action communautaire dans le



**Figure 1.** Liste des 11 descripteurs de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin destiné à permettre de mieux cibler les actions à entreprendre pour atteindre un « bon état écologique » d'ici 2020

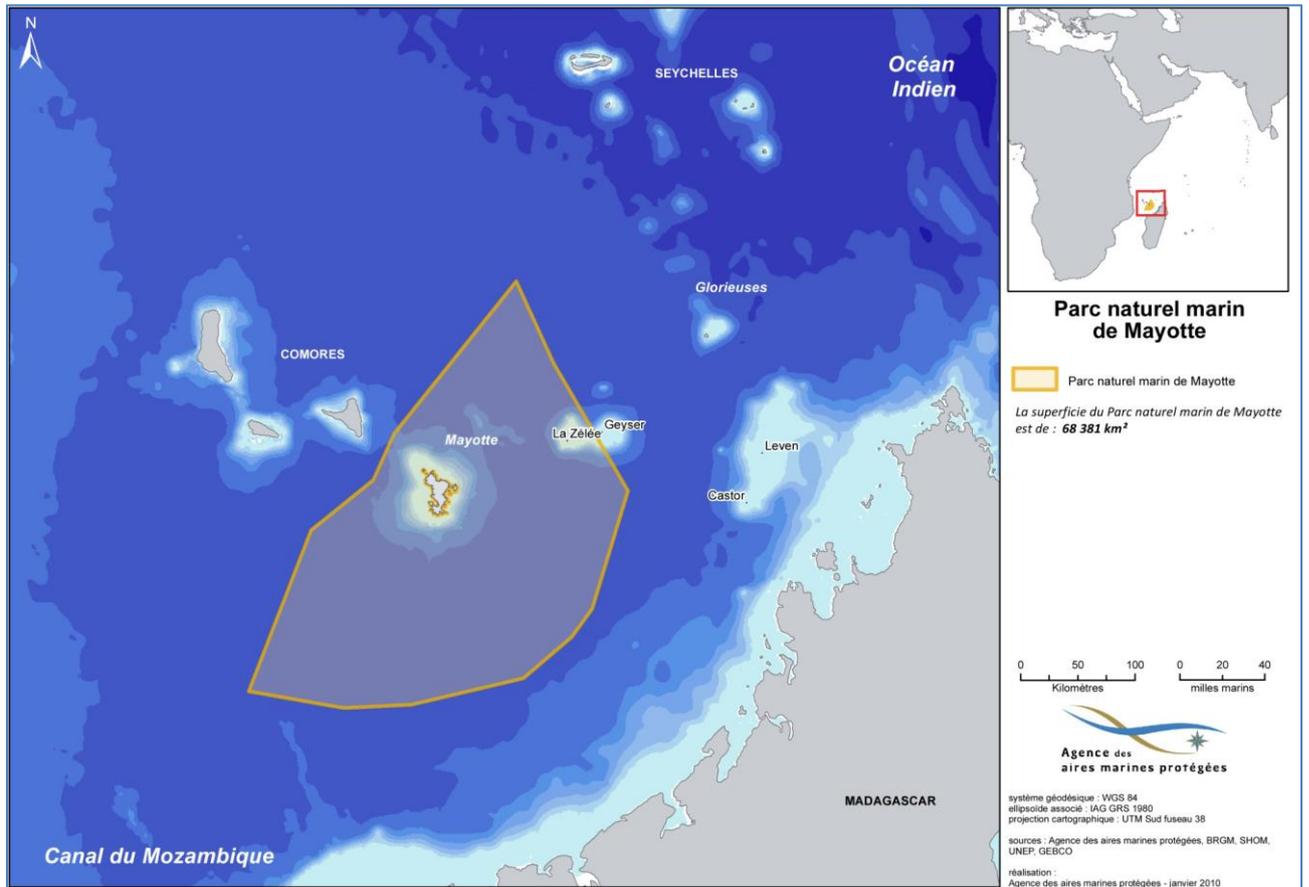
domaine de la politique pour le milieu marin. Celle-ci conduit chaque État membre à élaborer une stratégie en vue de l'atteinte ou du maintien du *Bon État Écologique (BEE)*. La définition du BEE est issue de travaux scientifiques et techniques menés depuis 2010 par un ensemble d'établissements publics (ANSES, BRGM, CNRS, Ifremer, MNHN, SHOM) sous la coordination scientifique et technique de l'Ifremer et de l'Agence des Aires Marines Protégées. Ainsi, 11 descripteurs du bon état écologique ont été établis (Figure 1). Parmi ceux-ci, le 10<sup>e</sup> descripteur décrit les « déchets marins » et préconise la mise en place d'indicateurs de pollution des déchets. Des programmes de surveillance des déchets constituent un moyen efficace de rassembler des informations. Pour les macrodéchets, la mise en œuvre du protocole de surveillance des échouages de déchets sur les plages a débuté en 1998 dans la zone OSPAR, divisé en cinq sous-régions dans l'Atlantique nord-est. Ce protocole qui comprend une méthodologie de ramassage et une nomenclature de tri et de décompte des déchets a intégré les recommandations de la DCSMM (OSPAR, 2010). À l'échelle nationale, le Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (CÈDRE), Association agréée par l'État, s'est donné entre autres pour mission de compiler les résultats de ces programmes de surveillance.

Dans l'Outre-mer français, la résolution du problème des déchets est particulièrement épineuse. Elle est vitale pour la protection des populations contre les épidémies (dengue, chikungunya, zika) favorisées par les gîtes à moustiques que sont les nombreuses décharges « sauvages ». Le contrôle des déchets est aussi extrêmement important pour les économies insulaires qui sont tellement dépendantes du tourisme. Enfin, sa résolution est aussi nécessaire pour la préservation de milieux naturels exceptionnels, souvent hauts lieux de la biodiversité mondiale comme Mayotte ou la Nouvelle-Calédonie. Il faut toutefois attendre le 17 juillet 2019 pour qu'un Appel à projets « Milieu marin » soit lancé par le Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES) « afin que soient proposées des solutions concrètes pour diminuer l'impact des déchets sur le milieu marin » (MTES, 2019). Mayotte y est citée pour son « Observatoire des déchets marins » mis progressivement en place par le Parc naturel marin de Mayotte à partir de 2017 (PNMM, 2019) dans lequel s'inscrit cette étude.

### *Le contexte local*

L'archipel de Mayotte et son système lagonaire, situé au nord du canal du Mozambique dans l'Océan Indien occidental (Figure 2), constitue l'un des trente-quatre points chauds (*hotspots*) de la biodiversité dans le monde (UICN, 2017). Cependant, ce milieu exceptionnel subit une pression anthropique considérable. La densité moyenne de population sur l'archipel est officiellement de 690 habitants par km<sup>2</sup> (INSEE, 2017), contre 112 pour la France métropolitaine. Mais l'INSEE estime la population totale à près du double de ce chiffre (INSEE, 2017). La densité réelle est en fait supérieure à 1300 habitants par km<sup>2</sup> qui plus est, surtout concentrés sur la bande littorale. Ce territoire insulaire est de ce fait extrêmement affecté par les activités humaines et tout particulièrement par leurs rejets.

Une des problématiques majeures socio-environnementales qui se pose à Mayotte réside dans l'urgence de la mise en place d'une gestion efficace des déchets couplée à une sensibilisation et formation des populations locales encore peu conscientes des menaces environnementale et sanitaire des polluants. En 2017, le poids des « Ordures ménagères résiduelles » était de 57 018 tonnes, contre 35 739 en 2006, soit une hausse de 54,9 % en l'espace d'une seule décennie (IEDOM, 2019). La compétence de collecte et de traitement des déchets ménagers a été transférée en 2014 à un syndicat unique, le Syndicat Intercommunal d'Élimination et de Valorisation des déchets de Mayotte (SIDEVAM). L'Installation de stockage de déchets non dangereux (ISDND) de Dzoumogné est le seul Centre de traitement des déchets depuis la fermeture de toutes les décharges de Mayotte le 1er juillet 2014 pour non-conformité aux



**Figure 2.** Le PNMM couvre la totalité de la ZEE de l'archipel de Mayotte

standards. Sur les huit déchetteries prévues pour 2020 par le Plan d'élimination des déchets ménagers et assimilés (PEDMA) adopté en 2010, aucune n'est opérationnelle et seulement deux d'entre elles sont à un stade avancé de réflexion (IEDOM, 2019). Sur l'ensemble du territoire, il n'existe ni système de traitement sélectif des déchets, ni centre de recyclage, ni incinérateur. Les décharges « sauvages » sont ainsi nombreuses et en nombre croissant surtout dans le sud de la Grande terre (CGM, 2015).

#### *Le Parc naturel marin de Mayotte et ses objectifs*

Lors de sa création le 18 janvier 2010, le Parc naturel marin de Mayotte (PNMM) a fixé sept grands objectifs dont l'un est d'« *Obtenir une bonne qualité de l'eau dans le lagon [...]* » en visant, d'une part, à « *atteindre un bon état chimique des masses d'eau* » en « *maîtrisant les rejets* » et en « *limitant les impacts des zones de stockage de déchets* » et donc, d'autre part, à « *limiter l'abandon des déchets solides* » (PNMM, 2012). Pour atteindre ces objectifs, il est donc apparu nécessaire d'avoir un état de situation relative aux déchets. Le PNMM a ainsi lancé à partir de 2017 des campagnes d'inventaire et de suivi des macrodéchets sur des sites définis mettant progressivement en place, tel que recommandé par l'ADEME (2011), un Observatoire des Déchets Marins (ODM) pour Mayotte.

#### *Cadre de cette étude*

La présente étude s'inscrit dans cet objectif du PNMM de développer cet Observatoire. Plus précisément, il s'agit à terme d'évaluer et de suivre la dynamique spatio-temporelle des déchets marins, à savoir les macrodéchets échoués, ceux flottants, et ceux immergés dans les fonds du lagon, ainsi que les microplastiques dans les sédiments de plages, flottants, et du fond du lagon. Dans la première phase, depuis 2017, seuls les macrodéchets échoués ont été suivis trimestriellement par les Agents du Parc sur cinq plages dont le bassin versant amont est non anthropisé, c'est-à-dire sans influence humaine directe. Le but du PNMM est d'étendre ces observations à tous les compartiments marins (côtiers, eaux de surface du lagon, fond du lagon) et à toutes les échelles (macro et micro) pour avoir la meilleure estimation possible de l'importance en quantité et en qualité des déchets marins à Mayotte.

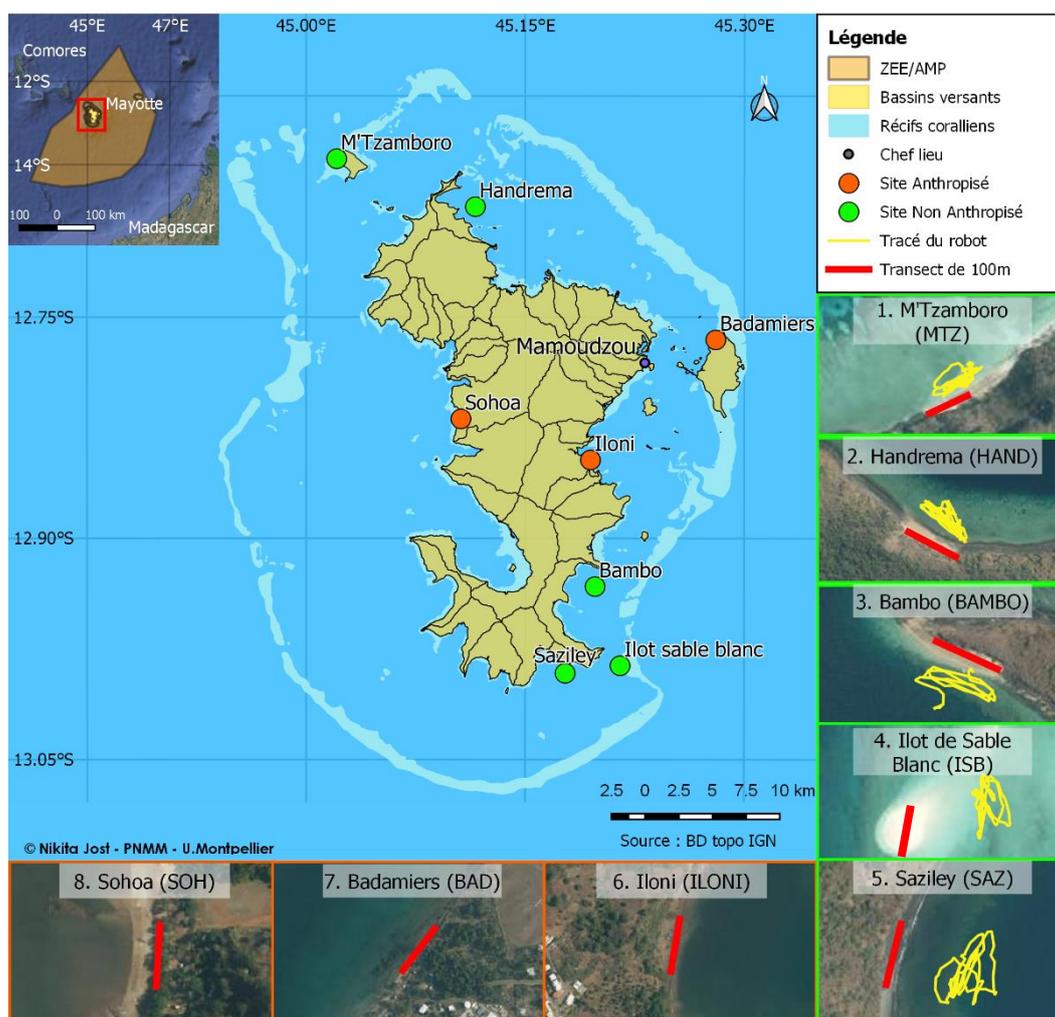
Au premier objectif assigné à cette étude d'assurer le suivi des macrodéchets, se sont rajoutées les propositions (acceptée par le PNMM) de comparer les MD avec ceux de sites anthropisés et de développer et tester des outils et protocoles de suivi des microplastiques. Une fois validés ceux-ci peuvent s'inscrire dans l'ODM. Finalement, cette étude s'attache à :

- (i) réaliser une nouvelle campagne d'échantillonnage des macrodéchets en utilisant le protocole macrodéchets (OSPAR, 2010) retenu par le PNMM et d'évaluer leur évolution depuis 2017 ;
- (ii) réaliser un inventaire des méthodes d'échantillonnage des déchets marins et évaluer leur applicabilité dans le contexte insulaire de Mayotte
- (iii) proposer et valider de nouveaux protocoles reproductibles de suivi des microplastiques présents dans les sédiments de plage et dans les eaux de surface du lagon, tout en tenant compte des recommandations de la DCSMM (MSFD/TSG-ML, 2013).

**Tableau 1.** Types d'échantillonnages réalisés selon les types de sites (en lien avec la Figure 3)

Types de site		Types d'échantillons		
		MD* de plage	MP** de plage	MP d'eau de lagon
Pastille verte	non anthropisé	x	x	x
Pastille orange	anthropisé	x		

\* MD pour macrodéchets  
 \*\* MP pour microplastiques



**Figure 3.** Localisation des 8 sites d'échantillonnage, 5 non anthropisés (vert), 3 nouveaux sites anthropisés expérimentés dans cette étude en 2019 pour les MD (orange).

## II. Matériel et Méthodes

---

### A. Zone d'étude

Petit archipel d'origine volcanique, Mayotte est la partie orientale la plus ancienne de l'archipel des Comores situé au nord du Canal de Mozambique (12°50'35''S, 40°08'18 E). Mayotte est composé de deux îles principales (374 km<sup>2</sup>) et d'une trentaine de petits îlots dispersés dans un des complexes récifo-lagonaires les plus vastes du monde (plus de 1 500 km<sup>2</sup>), délimité par une barrière de corail longue de plus de 160 km coupée d'une dizaine de passes, et abritant un *hotspot* de biodiversité (Figure 3) (Wickel *et al.*, 2014). En termes de courants océaniques, Mayotte est située sur une branche du courant Sud-Equatorial, et à l'extrémité nord de la zone de tourbillons générés par le Canal du Mozambique (Schouten *et al.*, 2003).

Le choix des sites d'échantillonnage pour les MD et les MP (Tableau 1, Figure 3) a été déterminé en accord avec le PNMM en prenant en compte plusieurs paramètres utilisés dans d'autres études (Henry, 2010 ; MSFD/TSG-ML, 2013) tels que :

- une plage largement ouverte sur la mer ;
- un bassin versant anthropisé ou non ;
- une pente de plage faible (15° maximum) ;
- une plage d'au moins 100m de long ;
- une absence d'obstacles en haut de plage, comme des rochers pouvant bloquer et concentrer les déchets ;
- une accessibilité permanente ;
- une plage ne faisant pas l'objet de campagnes de nettoyage.

Les côtes rocheuses et les côtes à mangrove ont dû être écartées dans cette étude expérimentale de nouveaux protocoles, en raison de leurs difficultés d'accès et du temps imparti. Les contraintes logistiques en matériel, en temps et en personnel gérées par le PNMM, ont également été un critère important dans le séquençage des phases de terrain et de laboratoire. Les suivis réalisés à ce jour sont détaillés en Annexe 1. Les cinq sites non anthropisés déjà suivis par le PNMM depuis 2017 ont été retenus pour les MD, et pour l'étude des MP, sites identiques comme recommandé par la DCSMM (MSFD/TSG-ML, 2013). Hormis SAZ qui est une presqu'île (Saziley), tous les sites se situent sur des îlots du lagon. Trois plages avec un bassin versant anthropisé ont été ajoutées pour un premier échantillonnage des macrodéchets à des fins de comparaisons. Autre nouveauté, les MP flottants ont été échantillonnés dans les eaux du lagon près des cinq sites non anthropisés (Annexe 1, Figure 3).

### B. Présentation des protocoles de suivi des MD et MP

#### 1. Recherches bibliographiques

Une recherche et une analyse bibliographique ont été menées au préalable pour identifier les protocoles susceptibles d'être les mieux adaptés aux conditions de terrain et d'étude à Mayotte. Le Tableau 2 résume les différents protocoles de surveillance des déchets dans le monde. Un tableau plus détaillé précise pour chacune des matrices environnementales les protocoles utilisés (Annexe 17, Annexe 18, Annexe 19, Annexe 20, Annexe 21).

#### 2. Protocole de suivi des macrodéchets : utilisation de l'existant

Depuis 2017, le suivi des MD est réalisé par le PNMM dans le cadre de l'ODM. Le Parc a basé son suivi des macrodéchets sur le protocole OSPAR (OSPAR, 2010). Les critères ayant conduit à retenir OSPAR comme protocole adapté aux moyens et aux attentes du PNMM ont été : (i) protocole national et européen (ii) facile à utiliser et à appliquer ;

**Tableau 2.** Sommaire des protocoles de suivis des déchets (MSFD/TSG-ML, 2013). Les lignes en bleu correspondent aux suivis réalisés dans cette étude.

Code de l'indicateur	Matrice Environn.	Méthode/protocole	Niveau de maturité	Technique/Équipement	Expertise nécessaire	Coût	Niveau de détail	Application géographique	Limites	Opportunités pour réduire les coûts
10.1.1	Plage	Visuel/Collecte	<b>HAUT</b> Appliqué de manière extensive dans les pays Nord Atlantique et mer Baltique, mais a besoin davantage de R&D pour analyses et statistiques	<b>FAIBLE</b>	<b>FAIBLE/MOYEN</b>	<b>F/M</b>	<b>HAUT</b> Taille ≥ 2,5cm	<b>HAUT</b> mais dépend de la disponibilité des sites (ex. problèmes avec les plages éloignées ou inaccessibles)	Grande variabilité entre les sites ;  Quantité d'objets déposés sur les plages peuvent être affectés par conditions de climat/mer	Potentielle utilisation de volontaires (formés)
10.1.2	Flottant	Visuel	<b>HAUT</b> Utilisé de manière extensive dans de nombreuses parties du monde	<b>FAIBLE</b>	<b>FAIBLE/MOYEN</b>	<b>F/M</b>	<b>MOYEN</b> Taille ≥ 2,5cm	<b>HAUT</b>	L'observation peut être affectée par les conditions de climat/mer et doit être adaptée pour que les objets de taille minimum puissent être détectés	Peut-être intégré sur des opérations de navires (ex. croisières, autorités maritimes et/ou programmes de surveillances sur la surface de la mer (ex. mammifères marins)
10.1.2	Fonds de mer	Plongée bouteille (vidéo optionnelle)	<b>MOYEN</b> (FAIBLE pour vidéo)	<b>MOYEN</b> (FAIBLE pour vidéo)	<b>MOYEN</b>	<b>M</b>	<b>MOYEN</b> Taille ≥ 2,5cm	<b>HAUT</b>	Dépend de l'accessibilités aux sites pour plonger	Potential de faire usage de plongeurs volontaires et de campagnes de sensibilisation (ex. Projet AWARE)
10.2.1	Biote	Oiseaux marins (ingestion)	<b>HAUT</b> Utilisé de manière extensive dans les pays du nord de l'Atlantique sur les fulmars)	<b>FAIBLE</b>	<b>MOYEN</b>	<b>M</b>	<b>MOYEN</b> Taille ≥ 1mm	<b>MOYEN</b>	Dépend de la couverture géographique de l'espèce et de son comportement d'alimentation ; dépend de la disponibilité en oiseaux morts	L'ingestion chez les Fulmars est déjà un indicateur EcoQO dans les régions nord OSPAR ; La détection et collection des spécimens peut faire partie d'une collaboration avec d'autres autorités (autorités côtières) et programmes de côtes
10.2.1	Biote	Tortues (ingestion)	<b>MOYEN/ FAIBLE</b>	<b>FAIBLE</b>	<b>MOYEN</b>	<b>M</b>	<b>MOYEN</b> Taille ≥ 1mm	<b>MOYEN</b> (ex. Caretta présent en Med et dans le NEA, mais pas à Mayotte)	Dépend de la couverture géographique de l'espèce ; dépend de la disponibilité des animaux	Potentiel collaboration avec des centres de soin pour tortues
10.2.1	Biote	Poisson (ingestion)	<b>FAIBLE</b> En développement	<b>MOYEN/HAUT</b>	<b>MOYEN/HAUT</b>	<b>M/H</b>	<b>MOYEN/FAIBLE</b>	<b>HAUT</b>	Dépend de couverture géographique des espèces ; Coûts et expertise d'analyse dépend de la taille des espèces, taille des particules analysés et de la méthodologie utilisée	Poissons commerciaux ;  Diversité biologique ; IBTS, MEDITIS ou tout autre programme où les poissons ont été collectés pour analyse
10.1.3	Micro	Plages	<b>FAIBLE</b>	<b>HAUT</b>	<b>HAUT</b>	<b>M/H</b>	<b>MOYEN</b> Taille ≤ 5mm	<b>HAUT</b>	Probablement le compartiment le plus échantillonné, mais les approches sont multiples, ce qui limite les comparaisons. Temps d'analyse importants	L'échantillonnage peut être couplé avec celui des macro-déchets sur plages ou en parallèle avec tout autre surveillance de la zone intertidale (contaminants chimiques, biote)
10.1.3	Micro	Fonds subtidale	<b>FAIBLE</b> (très peu utilisé)	<b>HAUT</b>	<b>HAUT</b>	<b>H</b>	<b>MOYEN</b> Taille ≤ 5mm	<b>HAUT</b>	L'équipement est seulement disponible en Europe par une organisation et utilisé à travers des routes standards de navigation ce qui limite la flexibilité en termes d'option de surveillance spatiale	Peut-être couplé avec d'autres programmes de surveillance qui impliquent un échantillonnage des fonds marins
10.1.3	Micro	Surface Filet MANTA	<b>FAIBLE</b> (Nombreuses études dans le NEA et en Med)	<b>MOYEN</b>	<b>MOYEN/HAUT</b>	<b>H</b>	<b>MOYEN</b> Taille ≤ 5mm	<b>HAUT</b>	Peut-être insensible aux fragments <3mm	Peut-être couplé avec d'autres programmes de surveillance qui impliquent un échantillonnage des eaux de surface

(iii) suivi régulier et standardisé avec une mise en commun possible via la base de données DALI (Ifremer, 2018).

Suivant le protocole OSPAR (2010), un transect de 100m de longueur est positionné sur chaque plage, parallèle à la mer. Les déchets sont collectés sur toute la largeur de la plage jusqu'à la zone de végétation entre la laisse de haute mer et la laisse de basse mer (Figure 4). Pour assurer la reproductibilité des transects à chaque suivi, des points GPS sont relevés à chaque extrémité des transects (Annexe 2). Ainsi, sur chacun des sites l'ensemble des déchets macroscopiques supérieurs à 5mm sont collectés et placés dans des sacs étiquetés pour comptage et pesage au laboratoire.

### 3. Protocoles de suivi des microplastiques et contexte local

Jusqu'à cette étude, le PNMM n'avait pas réalisé de suivi des MP. Par ailleurs, aucun protocole standard n'existe actuellement pour évaluer les MP dans l'environnement (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012 ; MSFD/TSG-ML, 2013 ; Lacroix *et al.*, 2018). Cette étude a donc pour vocation la mise en place et le test de protocoles évaluant les MP dans l'environnement marin à Mayotte. Plusieurs critères ont été déterminants dans l'élaboration de ce protocole de suivi des microplastiques : coût, simplicité de reproduction, durée d'échantillonnage et d'analyse en laboratoire et comparabilité avec d'autres études.

D'après les recherches bibliographiques (Tableau 2), le *Bon État Écologique* d'un milieu en matière de microplastiques s'évalue au travers de matrices environnementales, plus ou moins touchées. Les plages et la surface des eaux marines sont les matrices qui concentrent le plus de MP (Galgani *et al.*, 2011). Dans le cadre de ce travail, les critères de création des protocoles pour les MP se sont donc basés sur les matrices suivantes : (i) les sédiments de plages et (ii) la surface de l'eau.

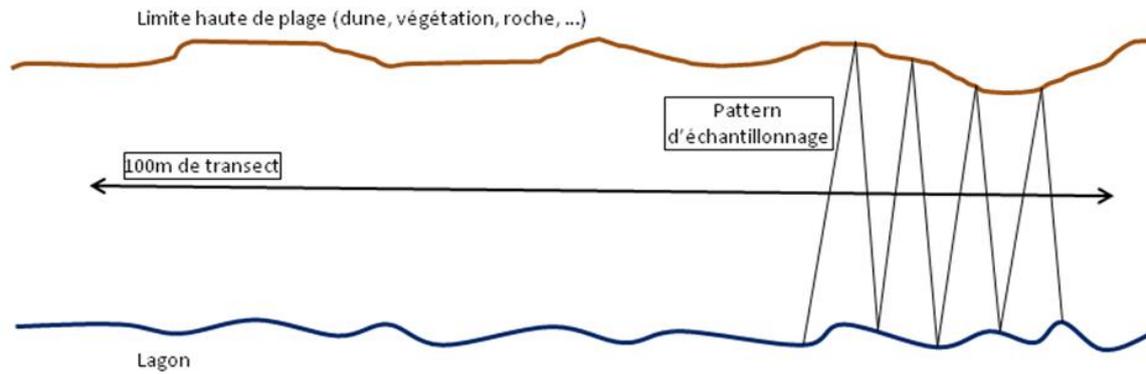
Les études ayant inspiré la création des protocoles de MP pour cette étude sont principalement issues des travaux de la DCSMM (MSFD/TSG-ML, 2013) et de ceux de Lacroix *et al* (2018), Hidalgo-Ruz *et al* (2012), Viršek *et al* (2016). Ces protocoles ont été adaptés pour répondre au mieux aux recommandations de la DCSMM et au cadre du PNMM tel qu'expliqué dans la méthodologie suivante.

#### a) Microplastiques des sédiments de plage

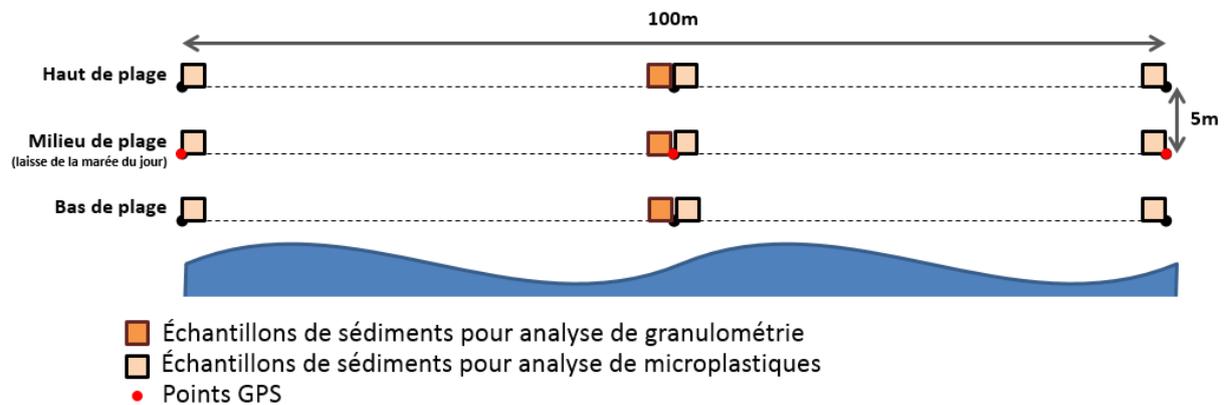
Sur les 5 sites non anthropisés, des sédiments de plage ont été prélevés et analysés afin d'évaluer les quantités et les types de MP présents.

L'échantillonnage des cinq plages non anthropisées (Figure 3) a été réalisé suivant trois transects de 100m de long, espacés de 5m (Figure 5). La position et la longueur de ces transects correspondent à ceux des MD. Trois échantillons par transect ont été prélevés dans des quadrats de 20cm par 20cm sur une profondeur de 5cm comme recommandé par la DCSMM (MSFD/TSG-MD, 2013). Il y a donc 9 échantillons par site, soit 45 au total. Le milieu de plage est considéré comme la laisse de la dernière marée. L'utilisation d'outils métalliques telle une truelle pour le prélèvement a été préconisée, en accord avec les recommandations de Lacroix *et al.* (2018) et de la DCSMM (MSFD/TSG-ML, 2013) afin de limiter la contamination des échantillons. Les sédiments ont été récupérés dans des sacs plastiques et étiquetés avant d'être congelés (Labbé, 2016).

Pour chaque site, la granulométrie des sédiments a également été mesurée. Ceci afin d'étudier une éventuelle relation entre la concentration de MP (nombre/kg de sable) et la taille des grains de sable. Pour cela trois échantillons de sable ont été collectés sur chaque site aux trois hauteurs de plages au milieu des trois transects pour les MP (à 50m) : Bas, Milieu, Haut (Figure 5).



**Figure 4.** Schéma d'échantillonnage de macrodéchets de bas en haut de plage suivant le protocole OSPAR (2010)



**Figure 5.** Schéma du plan d'échantillonnage des sédiments pour l'analyse des microplastiques et de la granulométrie.



**Figure 6.** Echantillonnage des MP à la surface de l'eau réalisé à l'aide d'un filet à plancton tiré par un robot ("JellyFishBot")

## b) Microplastiques présents à la surface de l'eau

Une partie de cette étude s'est également intéressée aux MP à la surface des eaux côtières proches des plages suivies du 27 au 29 mars (Annexe 1; Figure 3). Pour des raisons logistiques, un seul échantillon par site a été prélevé près des cinq sites non anthropisés. L'échantillonnage a été réalisé à l'aide d'un robot catamaran « *Jellyfishbot* » de la société IADYS (Figure 6) et d'un filet à plancton (maille de 220µm) attaché entre les deux flotteurs. Aucun filet à plancton de maille de 330µm n'a été disponible comme recommandé par la DCSMM (MSFD/TSG-ML, 2013). L'utilisation d'un robot tracteur a été privilégiée à celle d'un bateau en l'absence d'un bateau à moteur capable d'avancer à très faible vitesse afin d'éviter les clapots et donc un biais lors de l'échantillonnage (Viršek *et al.*, 2016). Les transects ont été réalisés pendant 30min selon le protocole proposé par Viršek *et al.* (2016) et les recommandations de la DCSMM (MSFD/TSG-ML, 2013) à une vitesse de 2 nœuds suivant un trajet aléatoire. Un tracé GPS a été enregistré pour chaque échantillonnage pour évaluer la distance parcourue par le robot (Annexe 3). Le volume collecté sur chaque site a été calculé en réalisant le produit de l'aire de l'entrée du filet (partie immergée = moitié de l'aire) par la distance parcourue (Eq. 1). Cependant, en raison de variations possibles de vitesse du robot, la partie immergée du filet a pu parfois sortir de l'eau, il est difficile d'estimer avec précision le volume d'eau exact passant à travers le filet. Ainsi, les calculs doivent être considérés comme des estimations.

**Eq. 1.** Vol. traité par le filet (m<sup>3</sup>) =  $\frac{\pi * (\text{Rayon de l'entrée du filet})^2}{2}$  (m<sup>2</sup>) \* Distance parcourue (m)

Plusieurs rinçages du filet dans l'eau ont été effectués avant de le remonter sur le bateau afin de permettre aux particules de se déposer dans le collecteur. Le collecteur a ensuite été vidé dans un sac avant une analyse des échantillons en laboratoire.

## C. Protocole d'analyse des échantillons en laboratoire

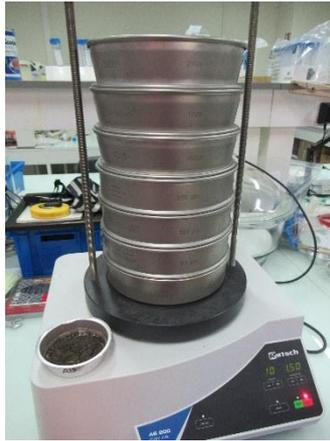
### 1. Analyse des échantillons

#### a) Macrodéchets échoués sur les plages

Avec cinq sites et des campagnes tous les trois mois (dix au total), le PNMM dispose désormais de 50 échantillons comparables à des dates différentes. Ioni, Sohoa et Badamiers, sites définis comme anthropisés, représentent les sites supplémentaires à la campagne du 28 mars et sont non implémentés dans le suivi de l'observatoire. Les MD ont été classés en huit catégories majeures selon le type de matériaux suivant le protocole OSPAR (2010) : *plastiques, caoutchoucs, textiles, papiers, bois, métal, verre, autres*. Chaque débris a également été classé dans l'une des 141 sous catégories telles que : *mégot, ampoule, chaussure, corde...* (**Annexe 16**).

#### b) Microplastiques présents dans les sédiments de plage

En ce qui concerne les échantillons pour analyse granulométrique, ces derniers ont été placés dans une étuve pendant 48h à 60°C afin d'obtenir un poids sec des sédiments. Ceux-ci ont ensuite été tamisés à travers une colonne de tamis (Figure 7) pendant 10min avec les mailles suivantes : 2mm, 1mm, 500µm, 250µm, 125µm, 63µm. Chaque fraction a été pesée individuellement avec une balance de précision (Annexe 13). Cette méthode focalise l'analyse granulométrique uniquement sur la classe des sables selon la classification de Wentworth (1922) (Annexe 12).



**Figure 7.** Colonne de tamis pour séparer les classes de taille des sédiments et des microplastiques



**Figure 8.** Ampoule à décanter contenant des sédiments  $<500\mu\text{m}$  et 200mL de solution saturée en NaCL



**Figure 9.** Colonnes de filtration avec un système de pompage à vide

Les résultats ont été convertis en unités Phi ( $\phi$ ), une transformation logarithmique de la taille des particules en millimètres (d) selon la formule suivante :

$$\text{Eq. 2. } \phi = -\log_2 d$$

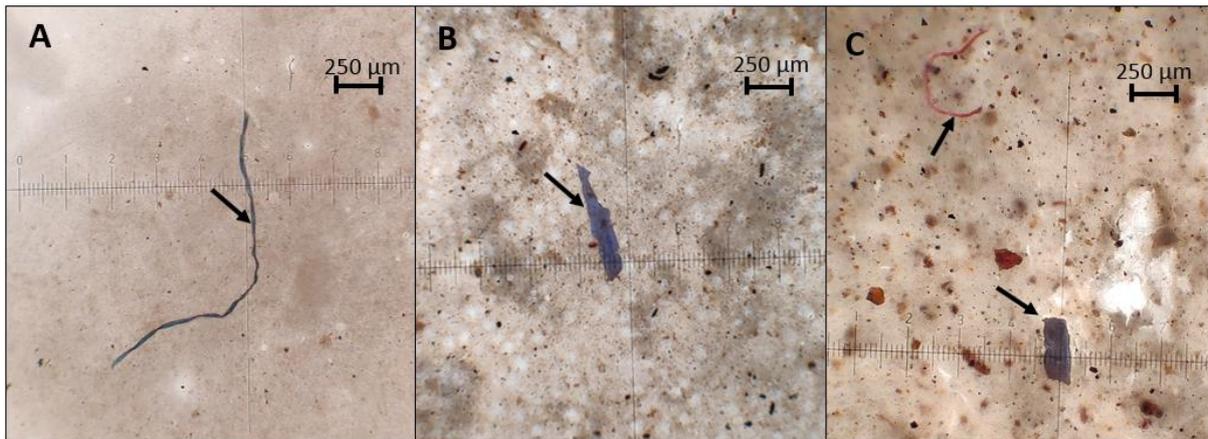
La moyenne de Phi ( $\phi$ ) a été retenue pour chaque échantillon de granulométrie pour étudier son influence sur les quantités de MP.

Concernant les échantillons de sédiments pour analyse des microplastiques, une séparation de ces derniers des particules minérales a été effectuée avec le matériel disponible en s'inspirant des méthodes d'Hidalgo-Ruz *et al* (2012), Fries *et al* (2013), Besley *et al* (2017), et de protocoles conseillés par le CÈDRE (Lacroix *et al.*, 2018). Dans cette étude, la méthode de séparation par densité, utilisée dans de nombreuses études, a été retenue pour séparer les MP des sédiments (Besley *et al.*, 2017 ; Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012 ; Fries *et al.*, 2013 ; MSFD/TSG-ML, 2013).

Avant la séparation par densité, une partie de chaque échantillon de sédiments ou sable a été placé dans une étuve à 60°C pendant 48h afin d'éliminer toute eau et de n'analyser que des sédiments secs (Besley *et al.*, 2017). Les techniques de séparation ci-après sont répétées trois fois par échantillon afin d'obtenir des répliqués d'échantillon. Par la suite, il a été prélevé 50g de sable (poids sec) (Besley *et al.*, 2017), préalablement pesé sur une balance de précision. Ce sable a ensuite été tamisé avec une maille de 500 $\mu$ m (Hidalgo Ruz *et al.*, 2012) afin de séparer les MP en deux classes de tailles ([125 $\mu$ m ;500 $\mu$ m[ et [500 $\mu$ m;5mm]). Il est important de considérer que la diminution de la taille des microparticules analysées complexifie les protocoles d'analyse et s'accompagne d'une augmentation des risques de perte et de contamination ainsi que d'une diminution de la fiabilité des résultats. Selon les travaux scientifiques, la taille minimale des « gros MP » varie de 1mm à 300 $\mu$ m (Hidalgo Ruz *et al.*, 2012). C'est pour ces raisons que nous n'avons pas considéré les MP inférieurs à 250 $\mu$ m lors de l'identification de ces derniers.

En pratique, la séparation par densité consiste à mélanger une solution aqueuse dense avec l'échantillon de sédiment, à agiter et à laisser reposer afin que les MP se retrouvent en surface par flottaison du fait de leur faible densité. Il a été décidé d'utiliser une solution saturée en chlorure de sodium (NaCl) ( $d=1,2$ ) afin de séparer les MP ( $d<1,2$ ) des sédiments ( $d>1,2$ ) selon les recommandations de la DCSMM et du fait que c'est la solution la plus utilisée pour la séparation (MSFD/TSG-ML, 2013, Lacroix *et al.*, 2018 ; Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012). Pour obtenir cette solution, 358,9g de NaCl ont été dissous dans 1L d'eau distillée avant d'être agitée à 600rpm pendant 48h à 60°C puis laissée à refroidir à température ambiante avant d'être filtrée avec un tamis de 63 $\mu$ m pour éliminer toute contamination (Besley *et al.*, 2017).

Concernant la séparation en elle-même, elle s'est effectuée en introduisant dans une ampoule à décanter le sable tamisé inférieur à 500 $\mu$ m avec 200mL de solution NaCl (Figure 8). L'ampoule à décanter étant le seul matériel de laboratoire disponible pour la séparation des sédiments avec la solution saline, il a été décidé d'utiliser cette technique. Les classes de taille étudiées ont été différentes de celles préconisées par la DCSMM (MSFD/TSG-ML, 2013) afin de pouvoir évacuer efficacement les sédiments par le robinet de l'ampoule à décanter. L'agitation a été réalisée mécaniquement pendant 5min en remuant l'ampoule jusqu'à obtenir une solution homogène. Cette dernière a été laissée au repos pendant 5min (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012) avant d'évacuer les sédiments par le robinet de l'ampoule à décanter. Enfin, le surnageant a été filtré à l'aide d'un filtre (pore  $\sim$ 1 $\mu$ m) dans un système de filtration sous vide (Figure 9). Ces filtres ont ensuite été observés au microscope pour identifier les microplastiques.



**Figure 10.** Exemple de microplastiques les plus communément retrouvés durant cette étude. Les flèches indiquent où se trouvent les MP. A) Exemple d'un MP de type *fibres*. B) Exemple d'un MP de type *fragment*. C) Exemples de deux MP avec en haut une *fibres* et en bas un *fragment*.

L'identification visuelle n'étant qu'une analyse primaire, des analyses chimiques auraient dû être réalisées. Elles n'ont pas pu être faites faute de disponibilité suffisante du laboratoire. Cette étape d'identification visuelle, identique aux protocoles de MP dans les sédiments et à la surface de l'eau, consiste à (i) identifier les MP parmi les particules d'origine naturelle afin de les quantifier et (ii) de les caractériser dans le but de déterminer leur nature, leur origine et leur source si cela est possible. Les MP regroupent un assemblage très hétérogène de particules qui varient en taille, forme, couleur, densité, matériau, etc... Seuls des classements par taille (inférieur ou supérieur à 500µm) et par type (*Fragments, Mousse, Film, Microbille, Fibre, Autres*). ont pu être réalisées dans cette première approche (Figure 10, Annexe 15).

L'identification des MP est réalisée i) de manière visuelle à l'aide d'une loupe binoculaire directement dans les sédiments tamisés >500µm ii) à l'aide d'un microscope optique pour observer les MP <500µm à travers des filtres. Hidalgo-Ruz *et al.* (2012) ont proposé les règles suivantes pour aider à l'identification des polymères : les particules ne doivent pas présenter de structures cellulaires ou organiques visibles, les *fibres* doivent être d'épaisseur constante sur toute la longueur, les particules doivent avoir une couleur homogène. Pour la NOAA (2015), les MP sont considérés comme : solide, de taille comprise entre 300µm et 5mm, résistants à un traitement au peroxyde d'hydrogène (non utilisé dans cette étude), flottant dans une solution de chlorure de sodium (densité 1,15) ou de lithium metatungstate (densité 1,62), et positivement identifiables visuellement au microscope avec un grossissement de 40.

### c) Microplastiques présents à la surface de l'eau

Chaque échantillon a été dilué avec de l'eau distillée afin d'obtenir un volume de 1000mL, car ces derniers ont accumulé une grande quantité de matière organique. Il était donc nécessaire de les diluer. Par la suite, 200mL de cette solution mélangée et homogène ont été filtrés à travers un filtre (pore ~1µm) à l'aide d'un système de filtration sous vide. Trois réplicats par échantillon, soit 600mL filtrés, ont été réalisés pour une meilleure représentation de l'échantillon. Seul 600mL ont été filtrés en laboratoire faute de temps. Une extrapolation du nombre de microplastiques par échantillon a été appliquée (Eq. 3.) :

$$\text{Eq. 3. Nombre MP par éch. (nb.m}^{-3}\text{)} =: \frac{\text{Nb total des MP observés sur les trois réplicats}}{\text{Vol.traité par le filet} * \frac{600 \text{ (mL)}}{1000 \text{ (mL)}}}$$

## 2. Contrôle du risque de contamination des échantillons de microplastiques

Afin d'éviter et de limiter le cas échéant le risque de contamination par des microplastiques supplémentaires, il est essentiel de prendre des mesures particulières, et si celle-ci existe il est nécessaire de la quantifier en réalisant des échantillons témoins (MSF/TSG-ML, 2013 ; Dekiff *et al.*, 2014 ; NOAA, 2015 ; Imhof *et al.*, 2012, Fries *et al.*, 2013). L'air du laboratoire a représenté dans notre cas l'une des sources potentielles de contamination. Ainsi, pour limiter au maximum l'exposition des échantillons à l'air libre, pendant les périodes hors manipulation, ceux-ci ont été protégés en fermant correctement les sacs d'échantillon. Dans cette étude, il n'a pas été possible d'utiliser une hotte à flux laminaire, non disponible, afin de limiter cette contamination. Outre cela, il est recommandé d'éviter tout contact entre les échantillons et des matériaux plastiques (Lacroix *et al.*, 2018 ; MSFD/TSG-ML, 2013). Or, nos sacs d'échantillon étaient en plastique et cette éventuelle contamination n'a pu être évaluée. Il est également recommandé de nettoyer le matériel avant tout contact avec les échantillons en passant par exemple la verrerie au four à 450°C tandis que le matériel en *métal* peut être rincé à l'eau distillée.



Dans cette étude, seuls des rinçages à l'eau distillée ont été réalisés. De plus, il est aussi recommandé de porter des blouses en coton et d'éviter le port de vêtements synthétiques, ce qui a pu être respecté.

Afin de quantifier une possible contamination par le sel (NaCl) utilisé et l'air du laboratoire, des témoins ont été effectués. Ainsi, trois réplicats de témoins ont été réalisés. Dans un premier temps, 200mL (3 fois) d'eau distillée ont été filtrés et ces derniers ont été observés au microscope. Dans un deuxième temps, 200mL (3 fois) de solution de NaCl saturée ont été filtrés avec une observation au microscope. Ces réplicats ont permis d'estimer la contamination de nos échantillons de sédiments plage. Malheureusement, la contamination des échantillons d'eau de surface n'a pas pu être estimée car le volume d'eau distillé ajouté aux échantillons afin d'avoir une solution d'un litre n'a pas été mesuré au préalable.

## D. Méthodes d'analyses des données

### 1. Macrodéchets échoués sur les plages

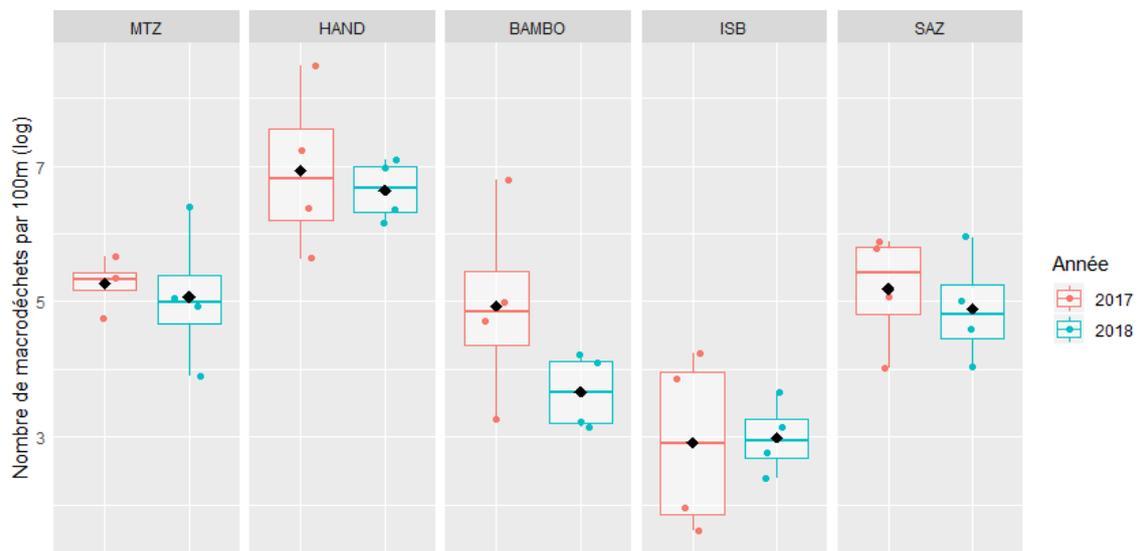
Tous les tests effectués ont été réalisés de manière bilatérale afin de tester uniquement s'il existait une différence significative lorsque la p-valeur était inférieure à 0,05. Le reste de l'interprétation des données a été réalisé graphiquement.

Dans un premier temps, une comparaison entre les quantités totales de macrodéchets retrouvés sur 100m de plage en fonction de l'année a été réalisée. Un *test de Student* pour données appariées a permis de tester cela. Les conditions d'application du test telles que la normalité des données et l'égalité des variances ont été vérifiées par des *tests de Shapiro* (p-value > 0,05) et un *test de Fisher* (p-value > 0,05). Les quantités de macrodéchets sur 100m de plage ont été transformées au logarithme de base 10 afin de respecter ces conditions d'application. Les données de 2019 n'ont pas été comparées avec celles de 2017 et 2018, car tous les suivis n'ont pas été effectués pour l'année 2019.

Dans un second temps, un *test d'Anova à un facteur* a permis de tester s'il existait une différence de quantité de macrodéchets échoués selon le site échantillonné. Les conditions d'application de ce test tel que la normalité des résidus ont été testées par des *tests de Shapiro* (p-value > 0,05), l'homoscédasticité des résidus par des *tests de Breusch-Pagan* (p-value > 0,05) et l'indépendance des résidus par des *tests de Durbin Watson* (p-value > 0,05). Un *test post-hoc de Tukey HSD* a permis de mettre en évidence quels sites étaient significativement différents des autres. Enfin, une comparaison du nombre de MD récolté en fonction des saisons ou mois de suivi a été appliquée. Une *Anova à un facteur* (mois de prélèvement) a été réalisée après vérification des conditions d'application comme énoncées ci-dessus.

Une régression linéaire entre les quantités de macrodéchets retrouvés sur 100m de plages et le poids de ces derniers a été effectuée. Les données de quantités et de masse de macrodéchets représentent les totaux des macrodéchets récoltés à chaque site lors d'une campagne d'échantillonnage. Un *test de Pearson* a permis de tester la corrélation entre la variable quantité et la variable poids des macrodéchets.

Une comparaison a été effectuée entre différents types de macrodéchets retrouvés sur 100m de plage et leur proportion respective pour tous les sites confondus en raison du peu de données disponibles. Seuls les sites non anthropisés ont pu être testés, car un seul échantillon a pu être prélevé pour les sites anthropisés lors de la campagne de mars 2019. Les données des sites non anthropisés ne respectant pas les conditions d'application d'une Anova, un *test de rang de Kruskal Wallis* a été réalisé pour vérifier si la proportion d'au moins un type de macrodéchet était différent significativement d'un autre type. Un *test post-hoc de Dunn* a permis par la suite de mettre en évidence quel type de macrodéchet était significativement différent des autres.



**Figure 11.** Quantité totale de macrodéchets récoltés sur les plages non anthropisées en 2017 et 2018. Les points noirs représentent les moyennes pour chaque site chaque année et les points de couleurs représentent les données récoltées lors d'une des quatre campagnes d'échantillonnage pendant une année

## 2. Microplastiques dans les sédiments des plages

Le nombre de microplastiques présents dans les sédiments des plages en fonction de la classe de taille a été testé pour tous les sites confondus. Pour ce faire, un *test de Student pour données appariées* a été réalisé afin de comparer le nombre de MP de 125 $\mu$ m à 500 $\mu$ m et le nombre de MP de 500 $\mu$ m à 5mm. Les données ont été transformées à la racine carrée pour respecter les conditions d'application du *test de Student*, soit la normalité des données (*test de Shapiro*) et l'égalité des variances (*test de Fisher*). Un *test de rang de Kruskal Wallis* a été réalisé pour tester la différence du nombre de microplastiques en fonction du site, car les conditions d'application pour une *Anova* n'ont pas été respectées. Un *test post-hoc de Dunn* a permis de mettre en évidence quels sites étaient significativement différents des autres.

La proportion de chaque type de microplastiques (*Fibres, Fragments, Films, Microbilles, Mousse, Autres*) présents dans les sédiments aux différents sites a été testé afin d'estimer quel type de microplastiques était prédominant par rapport aux autres. Des tests de rang de *Kruskal Wallis* ont été réalisés pour chaque site à la suite du non-respect de des conditions d'application d'*Anova*. Des *tests post-hoc de Dunn* pour chaque site ont permis de mettre en évidence quels types de microplastiques étaient significativement différents des autres types.

Une comparaison entre la concentration (nb.kg<sup>-1</sup> de sable sec) et la position de prélèvement sur les plages a été réalisée pour tous les sites confondus. Les sites sont confondus, car un seul suivi des microplastiques dans les sédiments a été opéré. Après avoir testé et validé les conditions d'applications soit, une *Anova* à un facteur (position) a été effectuée. Par la suite, un *test post-hoc de Tukey HSD* a permis de mettre en évidence quelles positions étaient significativement différentes l'une de l'autre.

Une régression linéaire entre concentration (nb.kg<sup>-1</sup> de sable sec) et taille moyenne des grains de sable ( $\phi$ ) a été réalisée. Seuls les échantillons de sable prélevés à la même position (à 50m du transect) que ceux prélevés pour test de granulométrie ont été conservés pour cette analyse. Un *test de Spearman* a été réalisé pour tester la corrélation entre ces deux variables.

## 3. Microplastiques présents à la surface de l'eau

Du fait que seul un échantillonnage à la surface de l'eau a pu être réalisé pour chaque site non anthropisé, les commentaires sur les microplastiques récoltés à la surface de l'eau du lagon ne s'appuieront que sur des analyses graphiques. Les trois sous échantillons ont permis de calculer des écarts-types et les moyennes par échantillon.

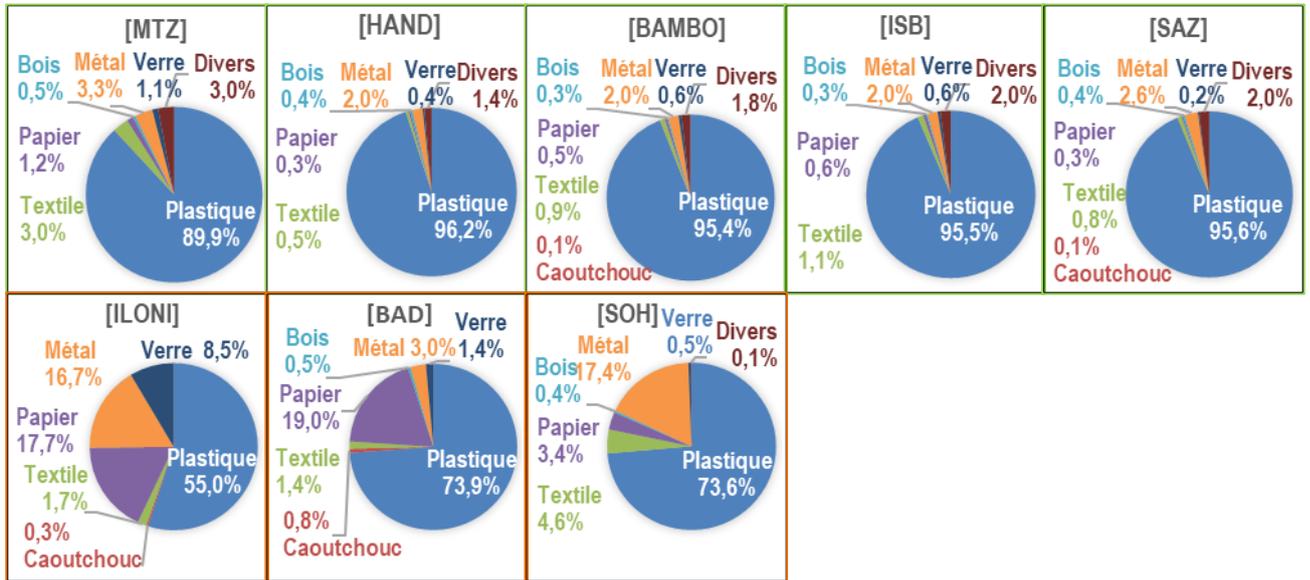
# III. Résultats

---

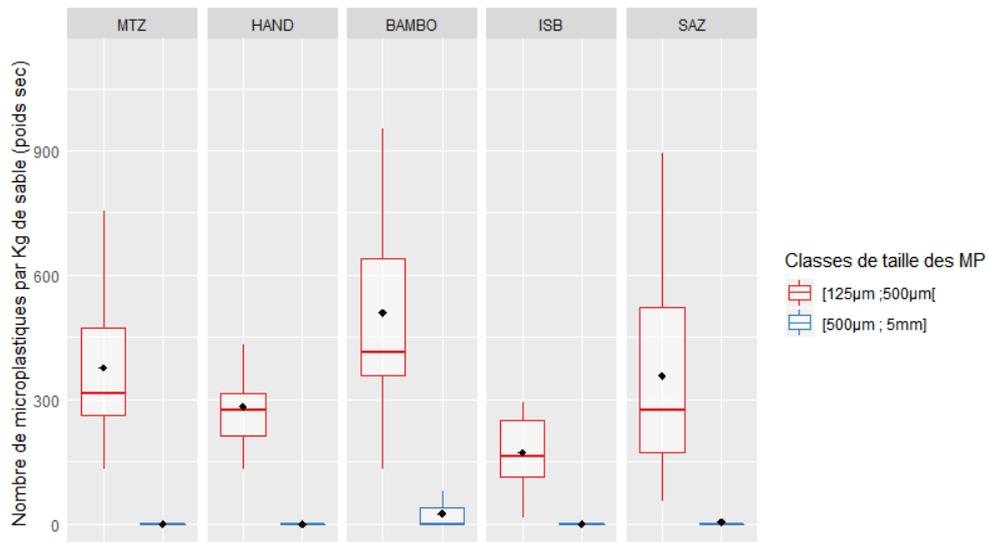
## A. Macrodéchets

La Figure 11 montre les variations du nombre de macrodéchets échoués sur chaque plage entre 2017 et 2018. Cette variation temporelle est non significative pour tous les sites (p value < 0,05).

En revanche, la Figure 11 illustre une différence entre certains sites. HAND semble avoir le plus de macrodéchets tandis qu'ISB apparaît avoir le moins de macrodéchets. L'*Anova* à un facteur testant le site de prélèvement vient confirmer cette observation (p\_value<0,05). Le *test de Tukey HSD* (Annexe 4) a exposé les différences entre chaque site. En effet, HAND est significativement différent (p\_value<0,05) de tous les autres sites et montre donc clairement une accumulation de macrodéchets échoués. ISB est également significativement différent



**Figure 12.** Proportion des différents types de macrodéchets récoltés à chaque site pour tous les suivis confondus. Les sites non anthropisés sont les cinq supérieurs (cadre vert), tandis que les sites anthropisés sont les trois inférieurs (cadre orange).



**Figure 13.** Concentration des microplastiques (nombre par kg de sable en poids sec) par rapport à leur classe de taille aux sites non anthropisés

( $p\_value < 0,05$ ) de tous les autres sites et montre un plus faible nombre d'échouages de macrodéchets. Outre cela, MTZ, BAMBO et SAZ ne sont pas significativement différents ( $p\_values > 0,05$ ) entre eux et s'exposent donc comme étant des sites intermédiaires par rapport au nombre d'échouages de macrodéchets. L'Anova à un facteur testant l'effet de la saison n'a pas montré de différence significative ( $p\_value > 0,05$ ) en termes de quantité de macrodéchets retrouvés sur 100m pour tous les sites confondus (Annexe 10).

**En résumé :** Il n'y a pas de différence du nombre de macrodéchets échoués entre 2017 et 2018 à chacun des sites. HAND est le site avec le plus de macrodéchets échoués. ISB représente le site avec le moins de macrodéchets échoués. MTZ, BAMBO et SAZ constituent des sites intermédiaires. La saison n'a pas d'effet sur les quantités de macrodéchets échoués.

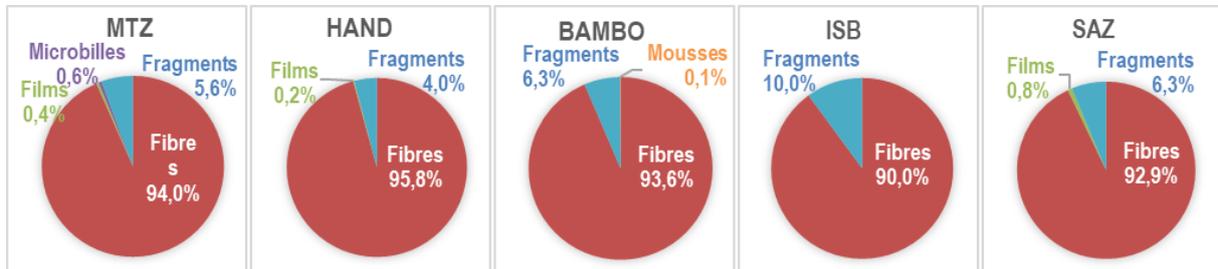
On observe sur la Figure 12 une plus grande hétérogénéité des types de macrodéchets sur les sites anthropisés que sur les sites non anthropisés. De plus, les macrodéchets de type *plastique* sont largement prédominants par rapport aux autres types de macrodéchets. La proportion de plastiques varie de 89,9% à 96,2% pour les sites non anthropisés (moyenne de 95,3% tous sites confondus) et de 55% à 73,9% pour les sites anthropisés (moyenne de 68,4% tous sites confondus). On observe une plus grande diversité de type de macrodéchets sur les plages anthropisées que sur les plages non anthropisées. Le deuxième élément en importance est le *métal* qui représente 2,2% des macrodéchets récoltés sur les plages non anthropisées alors qu'il constitue 12,7% du total des macrodéchets récoltés sur les trois plages anthropisées. Pour les sites non anthropisés, le *test de Kruskal Wallis* a montré une différence significative de la quantité de macrodéchets selon le type et vient confirmer nos observations graphiques. Le *test post-hoc de Dunn* (Annexe 5) a permis de mettre en évidence le fait que la catégorie *plastique* est significativement différente des autres types de macrodéchets pour tous les sites non anthropisés et vient confirmer nos observations graphiques. De plus, la catégorie *métal* est également significativement différente des autres types de macrodéchets pour les sites non anthropisés. Les autres catégories *verre*, *bois*, *papier*, *caoutchouc*, *textile*, *divers*, n'ont pas montré de différences significatives entre eux pour tous les sites confondus.

**En résumé :** Le plastique est le type de macrodéchets le plus retrouvé sur tous les sites, anthropisés ou non. Le *métal* représente le deuxième type de macrodéchets échoué le plus fréquent. Le plastique est présent en plus grande proportion sur les sites non anthropisés que sur les sites anthropisés. Les plages anthropisées montrent une plus grande hétérogénéité des types de macrodéchets échoués que les plages non anthropisées.

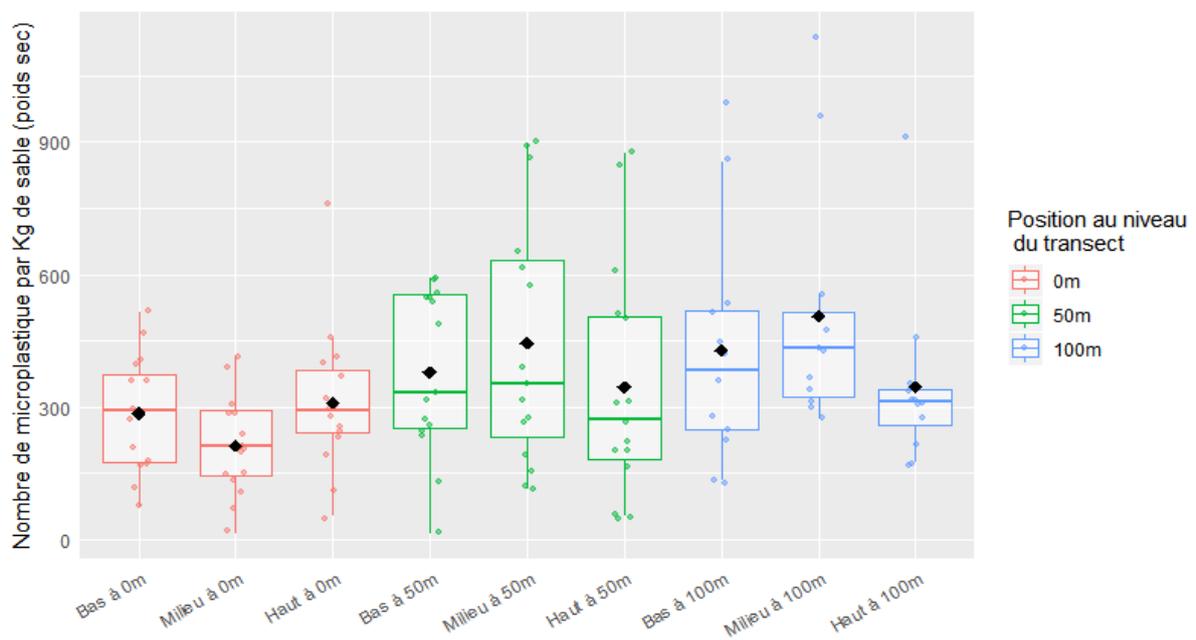
## B. Microplastiques dans les sédiments de plages

D'après la Figure 13, on note une grande différence de nombre de MP par kg de sable en fonction de la taille de ces derniers. Les MP inférieurs à 500 $\mu$ m sont nettement plus observés que les MP supérieurs à 500 $\mu$ m. Le *test de Student* confirme statistiquement cette disparité ( $p\_value < 0,05$ ).

Concernant les variabilités spatiales, les différences de concentration des MP entre sites sont significativement différentes (*test Kruskal Wallis*,  $p$  value  $< 0,05$ ). ISB présente en moyenne moins de microplastiques (172,3 MP.kg<sup>-1</sup>) par rapport à d'autres sites tels que BAMBO (523,8 MP.kg<sup>-1</sup>) et SAZ (377,1 MP.kg<sup>-1</sup>). On observe également qu'il y a une plus grande variance du nombre de MP.kg<sup>-1</sup> pour les sites ayant eu un plus grand nombre d'observations. Le *test post-hoc de Dunn* (Annexe 6) confirme nos observations graphiques et montre que ISB est significativement différent ( $p\_value < 0,05$ ) des autres sites, sauf par rapport à HAND ( $p\_value > 0,05$ ). De même, BAMBO est significativement différent des autres sites ( $p\_value < 0,05$ ), sauf par rapport à MTZ ( $p\_value > 0,05$ ). Ces résultats viennent donc confirmer



**Figure 14.** Proportion des différents types de microplastiques retrouvés dans les échantillons de sédiments de plage des sites non anthropisés



**Figure 15.** Concentration des microplastiques dans les sédiments (nombre de MP/kg de sable sec) en fonction de la position de prélèvement sur la plage pour tous les sites confondus

la lecture graphique qui montre BAMBO avec le plus de microplastiques et ISB avec le moins de microplastiques.

**En résumé :** Les « petits » MP (<500µm) sont surreprésentés par rapport aux « grands » MP (>500µm). BAMBO est le site présentant le plus de concentration de MP dans les sédiments. ISB est le site présentant le moins de MP dans les sédiments.

Les résultats de la Figure 14 montrent une large prédominance des *fibres* dans les sédiments : plus de 90% des *fibres* MP sont trouvés dans les cinq sites non anthropisés. Les sites sont très similaires sur les proportions des types de microplastiques avec les *fibres* très représentées suivies par les *fragments* de plastique. Les autres types de MP se retrouvent en très faibles quantités (<1%) et constituent donc une proportion négligeable de microplastiques pouvant se retrouver dans les sédiments. Les *tests de Kruskal Wallis* et de *Dunn* (Annexe 7) pour chaque site confirment ces proportions. En effet les *fibres* sont toujours significativement différentes des autres types de MP ( $p\_value < 0,05$ ). De même pour le nombre de *fragments* de MP qui sont également significativement différents ( $p\_value < 0,05$ ) des autres types de MP sauf pour le site d'HAND.

**En résumé :** Les *fibres* et *fragments* de MP constituent les types de MP les plus fréquemment retrouvés dans les sédiments de plage (>90%)

La Figure 15 montre le nombre de MP/kg de sable analysé en fonction des neuf positions d'échantillonnage qui ont pu être effectués sur les cinq sites suivis. Par une lecture graphique, on observe qu'il n'existe pas une grande différence de variance entre les différentes positions ni du nombre de MP que l'on peut retrouver par kg de sable en fonction du positionnement sur la plage. Cependant, l'*Anova* à un facteur (position) a montré qu'il existait au moins une position différente d'une autre. Le test post-hoc de Tukey HSD (Annexe 8) a permis de mettre en évidence que seul la position « milieu à 0m » et la position « milieu à 100m » sont significativement différents.

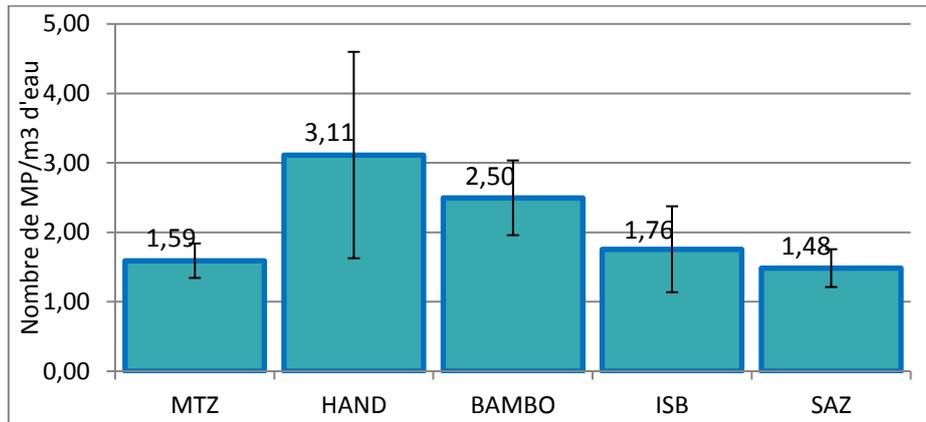
**En résumé :** Seule la position du milieu à 0m du transect est différente de la position du milieu à 100m en termes d'accumulation de MP dans les sédiments.

### C. Microplastiques à la surface de l'eau du lagon

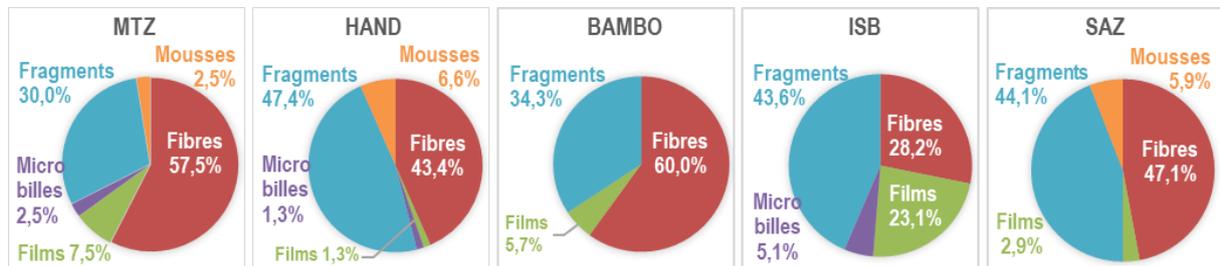
La Figure 16 nous renseigne sur les échantillons d'eau du lagon réalisés sur les cinq sites non anthropisés. En moyenne sur les cinq sites échantillonnés, la concentration en microplastiques est de  $2,09 \pm 0,63 \text{ MP.m}^{-3}$ . On remarque qu'HAND est le site comprenant la plus grande concentration de MP avec  $3,11 \pm 1,49 \text{ m}^{-3}$ . SAZ représente le site avec la plus faible abondance de MP avec  $1,48 \pm 0,27 \text{ m}^{-3}$ . Les sites MTZ ( $1,59 \pm 0,25 \text{ MP.m}^{-3}$ ), ISB ( $1,76 \pm 0,62 \text{ MP.m}^{-3}$ ) et SAZ ( $1,48 \pm 0,27 \text{ MP.m}^{-3}$ ) semblent avoir des concentrations en microplastiques similaires et relativement faibles par rapport à HAND ( $3,11 \pm 1,49 \text{ MP.m}^{-3}$ ) et BAMBO ( $2,50 \pm 0,54 \text{ MP.m}^{-3}$ ).

**En résumé :** HAND a présenté le plus de MP par m<sup>3</sup> d'eau. SAZ a montré le moins de MP par m<sup>3</sup> d'eau.

La Figure 17 montre que les *fibres* représentent 47,2% du total des MP récoltés aux cinq sites. Elles constituent la plus grande part de MP pour tous les sites sauf à l'ISB et HAND. Ces derniers ont accumulé plus de morceaux (43,6% et 47,4%) par rapport aux autres MP. Les *fragments* représentent le deuxième type de microplastiques le plus abondant tous sites confondus avec 39,9% du nombre total des MP récoltés aux cinq sites. Le troisième type de microplastiques les plus abondants pour tous les sites confondus sont les films avec une proportion de 8,1%. Les *mousses* et les *microbilles* ne représentent quant à eux que 3,0% et 1,8% du total de MP à la surface de l'eau pour tous les sites confondus. Outre cela, les MP de



**Figure 16.** Moyenne de la concentration de MP (nombre/m<sup>3</sup> d'eau) des sous-échantillons d'eau du lagon filtrée aux abords des cinq sites non anthropisés.



**Figure 17.** Proportion des différents types de microplastiques retrouvés dans les échantillons d'eau de surface du lagon aux sites non anthropisés

type *microbilles* n'ont été retrouvés que sur les sites de MTZ (2,5%), d'HAND (1,3%) et d'ISB (5,1%). De même, les *mousses* n'ont été observés que dans les échantillons de MTZ (2,5%), HAND (6,6%) et SAZ (5,9%). Cependant, les résultats sont à nuancer, car seul un échantillon par site a pu être prélevé à la surface de l'eau.

**En résumé :** Les *fibres* constituent le type de microplastiques prédominant sur quasiment tous les sites (sauf ISB et HAND). Les *fragments* de plastiques constituent le deuxième type de MP prédominant. Les eaux de surface présentent une plus grande hétérogénéité de proportions des types de MP (figure 9) par rapport aux sédiments de plage (figure 5).

## IV. Interprétation/Discussion

---

Les recherches bibliographiques ont servi à compléter et proposer de nouveaux suivis pour l'Observatoire des déchets marins du PNMM. Les données collectées dans le cadre de cette étude ont renforcé la base de données de cet Observatoire. Celles-ci ont permis d'établir un état de référence à partir duquel une évaluation des tendances des macrodéchets et microplastiques sera possible avec davantage de suivis. Les travaux présentés dans cette étude s'intègrent dans le contexte de recherche de l'obtention du *Bon État Écologique* de la DCSMM (MTES, 2017) déterminée ici sur la base du descripteur 10 « *Propriétés et quantités de déchets marins ne provoquant pas de dommages au milieu côtier et marin* » qui concerne notamment les MD et les MP.

Dans un premier temps, une évaluation de l'efficacité des protocoles a été estimée en comparant les résultats de cette étude avec d'autres suivis similaires dans le monde. Dans un second temps, des recommandations d'amélioration des protocoles sont proposées.

### A. Évaluation de l'efficacité des protocoles

Afin d'évaluer l'efficacité des protocoles suivis, on se propose ici de mettre en parallèle les résultats obtenus ainsi que ceux issus d'autres études à la fois dans leur dimension temporelle dans le cas des macrodéchets et spatiale pour les macrodéchets et microplastiques. Macro-déchets

Le comptage du nombre de MD est une méthode simple de collecte de données (en logistique, temps, coût) facilement analysables comme l'a indiqué un groupe d'experts de la DCSMM (Galgani et al., 2011). C'est également la méthode la plus pratique, bien que d'autres méthodes supplémentaires telles que l'évaluation du poids (Figure 12) et du volume (Galgani et al., 2011) des éléments trouvés puissent être utiles.

D'un point de vue temporel, suivant la DCSMM (MSFD/TSG-ML, 2013), la surveillance des MD sur des plages devrait être réalisée chaque saison et sur l'ensemble de l'île afin de pouvoir observer de potentielles variations intersaisonniers, interannuelles, et inter-sites. L'étude temporelle sur la quantité de MD déposés sur 100m de plage (Figure 11) n'a pas montré de différences significatives entre 2017 et 2018 sur les cinq sites suivis. De même, aucune variation de dépôts de MD selon la saison n'a pu être démontrée (Annexe 10). Ces résultats montrent donc que l'apport de MD sur l'ensemble des plages reste constant et ce, indépendamment de la saison ou de l'année de prélèvement. Ainsi, si l'on considère les recommandations de la DCSMM qui estiment qu'un bon état écologique équivaut à une baisse significative du nombre de macrodéchets entre les années, il n'est donc pas été démontré ni d'amélioration ni de détérioration de l'état écologique des littoraux de Mayotte en 2018. Les quantités de MD échoués ont cependant révélé des différences significatives entre les sites (Figure 11).



D'un point de vue spatial, l'étude de la distribution des MD à Mayotte a montré le caractère ubiquitaire et prépondérant du plastique. Ce résultat appuie les diverses études mondiales (Coe & Rogers 1997 ; Barnes *et al.*, 2009 ; Eriksen *et al.*, 2014). À Mayotte, les quantités de MD échoués ont cependant révélé des différences significatives entre les sites non anthropisés (Figure 11). Sur l'ensemble des sites non anthropisés, une moyenne de  $387,16 \pm 749,86$  MD/100m a pu être calculée. Ces données ont pu être comparées à celles récoltées sur des plages de régions européennes, également suivies selon le protocole OSPAR. Elles ont montré des valeurs entre 389,4 et 873,3 MD/100m pour la mer du Nord et la mer Celtique (OSPAR, 2017). D'autres études ont montré des valeurs moyennes de  $1016 \pm 633$ ,  $88 \pm 31$  et  $332 \pm 183$  MD/100m sur la côte Galicienne (Gago *et al.*, 2014), 3600 MD/100m en Méditerranée (Martinez-Ribes *et al.* 2007), 2400 MD/100m en mer Noire (Topçu *et al.* 2013), 500 à 10 000 MD/100m au Brésil (Tourinho et Fililman 2011).

À l'échelle de la zone maritime OSPAR, soit dans l'Atlantique nord-est, cette quantité de déchets marins trouvés sur les plages varie considérablement entre les sites (OSPAR, 2017). Les raisons de cette variation sont nombreuses. Elles tiennent à la source (près de l'embouchure d'une rivière ou de grands ports, du tourisme, ...), aux processus océanographiques ou encore à la fréquence de nettoyage des plages. Du fait de ces variables, les comparaisons de quantité entre sites s'avèrent difficiles. Afin d'étudier l'effet du vent, de la marée et du ramassage par exemple, il serait pertinent d'effectuer une étude temporelle de ces variables (Schöneich-Argent *et al.*, 2019) avec des suivis rapprochés. D'autre part, sélectionner des sites isolés rarement soumis au ramassage de déchets peut aussi limiter le biais induit par les variations des quantités de déchets trouvés.

À Mayotte, à titre d'exemple, HAND semble être le site accumulant le plus de MD. Ce dernier se situe près du chef-lieu de Mamoudzou, du principal port de Longoni et du Centre d'enfouissement des déchets (Dzoumogné) vers lequel sont acheminées par camion à bennes ouvertes les ordures des îles, autant de source d'échappées de déchets par ruissellement ou par le vent. Cependant, il est difficile d'affirmer que les déchets retrouvés à HAND proviennent de ces bassins versants anthropisés. Quant au site ISB qui présente la plus faible concentration de MD, celui-ci se caractérise par une géomorphologie particulière. Étant un banc de sable d'origine corallienne, ISB peut se retrouver immergé lors de grandes marées, entraînant un lessivage des déchets qui pourraient s'y accumuler. Cependant il semble difficile d'isoler la possibilité que les MD collectés sur ISB ne proviennent pas de bassins versants anthropisés.

Les différents apports des macrodéchets peuvent difficilement être expliqués par la seule étude de courantologie de Mayotte (De La Torre *et al.*, 2008). Cette dernière indique cependant une grande variabilité des marées dépendante dans le temps et l'espace. Or les marées pourraient grandement influencer le dépôt ou le lessivage des MD (Schöneich-Argent *et al.*, 2019). Outre cela, Gourbesville et Thomassin (2000) estiment que l'hydrodynamique du lagon ne serait pas influencée par les circulations générales de l'Océan Indien. Toutefois, il serait intéressant de quantifier les déchets d'origine non mahorais. En raison de ces différents facteurs locaux (géomorphologie d'une plage, proximité aux zones urbaines et rejets associés) et régionaux (météorologiques), la comparaison des quantités de MD entre sites demeure délicate.

Sur la base de ces variations de quantité, l'intérêt s'est porté sur les variations de proportions de types de MD entre sites. Les variations entre les proportions sont importantes entre sites non anthropisés (entre 89,9% et 96,2%) et anthropisés (entre 55% à 73,9%) (Figure 12). Cela pourrait s'expliquer par un apport supplémentaire de déchets (autre que le plastique) issus des bassins versants des sites anthropisés, mais aussi par une plus forte fréquentation de ces plages. Ainsi, les déchets denses (*métaux, caoutchoucs, ...*) ou les déchets se dégradant rapidement



dans l'environnement (*textiles, papiers, ...*) pourraient avoir des difficultés à être transportés par la mer pour se retrouver sur des sites isolés sans influence directe de l'Homme.

Les sites anthropisés auraient donc des apports supplémentaires de déchets qui ne proviendraient pas uniquement de la mer, mais aussi du bassin versant par écoulement et des usagers de ces plages. En ce sens, ces variations de proportions viennent confirmer le choix de sélection des sites dans la représentativité d'un territoire comme Mayotte. En comparaison avec les plages de la région OSPAR, le plastique est également le déchet le plus retrouvé avec : 68% en mer du Nord, 58% en mer Celtique, et 98% dans le golfe de Gascogne (rapport OSPAR 2016). De même, pour d'autres études dans le monde (32% à 88% ; Derraik, 2002), en Italie (81,1% ; Munari *et al.*, 2016), à la Réunion (81,6% ; Cartraud, 2016), aux Seychelles (96% ; Duhec *et al.*, 2015), à la côte Galicienne (38% à 63% Gago *et al.*, 2014).

De manière générale, l'affirmation d'une tendance temporelle et/ou spatiale sur le suivi des macrodéchets apparaît complexe à ce jour. En effet une étude statistique visant à évaluer les tendances spatio-temporelles de 129 plages d'Europe suivies selon le protocole OSPAR a révélé une grande variation dans l'abondance des déchets entre les plages (Schulz *et al.*, 2017). Ce même constat a pu être observé dans cette étude. Les auteurs estiment que pour réduire les effets de la variation spatiale, l'analyse des tendances des données relatives aux déchets peut être réalisée à l'échelle d'une plage et non d'un groupe de plages. Au-delà de cette recommandation, il a été calculé un minimum de six années de suivi pour étudier la dynamique temporelle des apports (Schulz *et al.*, 2017). Sur la base du protocole OSPAR, c'est après seulement 10 années de suivis des macrodéchets que Gago *et al* (2014) ont permis de mettre en évidence des tendances d'évolution. Ainsi, ils ont observé que certaines plages tendaient à accumuler les déchets au cours des années tandis que d'autres ne montraient pas de différences significatives au cours du temps. Ainsi, avec davantage de suivis, l'étude actuelle pourrait montrer des tendances intrinsèques à chaque site telles qu'illustrées par Gago *et al* (2014) et Schulz *et al* (2017).

Pour conclure sur l'efficacité et la validation de ce protocole, l'application de cette méthode standardisée permet la comparaison des résultats avec d'autres études de manière satisfaisante : OSPAR est un protocole fiable d'évaluation des quantités de macrodéchets échoués sur les plages à Mayotte. Toutefois, il apparaît intéressant d'étendre l'utilisation de ce protocole dans le monde pour permettre la comparaison de sites de mêmes caractéristiques (situation géographique, hydrodynamique, contexte local de développement etc.). De même, il serait également pertinent de comparer nos données de Mayotte avec les pays voisins du nord du canal du Mozambique (Comores, Madagascar, Mozambique). La poursuite de ce suivi semble essentielle dans la mesure où elle permettra de mettre en lumière les sources et les tendances des macrodéchets échoués sur les plages à Mayotte.

## 1. Microplastiques

L'intérêt récent de la communauté scientifique pour l'évaluation de la contamination de l'hydrosphère par les microplastiques a généré la production d'une multitude de travaux et autant de méthodes analytiques. Les techniques d'échantillonnage développées ont permis d'extraire puis de quantifier les microplastiques au sein des matrices environnementales comme le sédiment, l'eau ainsi que le biote. Cette quantification est réalisée par reconnaissance visuelle suite aux étapes de filtration/tamissage/dissection. De même que pour les MD, le comptage des MP dans les sédiments de plages et à la surface de l'eau fournit les informations les plus faciles à obtenir et les moins coûteuses (liens entre MP, sources), comme a pu l'exposer Hidalgo-Ruz *et al* (2012). C'est également la méthode la plus pratiquée, bien que d'autres méthodes supplémentaires telles que l'évaluation du poids, la couleur ou la composition chimique des MP (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012 ; Lacroix *et al.*, 2018) puissent être utiles.



Dans l’Océan Indien, il existe peu d’études faisant état de la distribution des microplastiques (Lusher, 2015 ; Browne *et al.*, 2011). Malgré le fait qu’aucun consensus scientifique sur l’évolution temporelle des MP ne soit établi (Thompson *et al.*, 2004 ; Law *et al.*, 2010), le suivi de ces derniers dans les sédiments et à la surface de l’eau mené dans le cadre de cette étude fait office d’un état actuel de référence à Mayotte et du nord du canal du Mozambique. Sur l’ensemble de échantillons, des MP ont été détectés. Cette distribution généralisée vient appuyer les rapports faisant état de l’omniprésence de ce contaminant émergeant dans tout l’environnement marin (Browne *et al.*, 2011 ; Eriksen *et al.*, 2014). Les résultats sur les concentrations de MP trouvés dans les sédiments et dans les eaux de surfaces montrent, comme pour les quantités de MD, une grande variabilité entre les sites échantillonnés (Figure 13, Figure 16). Mais les sites ayant les plus grandes ou les plus faibles quantités de MD ne sont pas forcément les mêmes pour les MP dans les sédiments et à la surface de l’eau. De même que pour les MD, l’origine des MP dans cette étude reste incertaine. Les particules observées dans cette étude peuvent provenir directement des courants issus du canal du Mozambique, mais aussi de la gyre du nord de l’Océan Indien. Concernant la prédominance des *fibres* sur les autres types de débris marins (*fragments, film, mousse, microbilles*), il pourrait être suggéré que la source des MP à Mayotte serait davantage liée à des intrants primaires. Parmi eux on peut citer ceux issus des stations de traitements des eaux usées où les fibres textiles sont dominantes (Browne *et al.*, 2011 ; Murphy *et al.*, 2016 ; Sutton *et al.*, 2016). Plus localement, des études sur les apports issus des cours d’eau à Mayotte pourraient permettre de mettre en lumière l’importance que représenteraient ces rejets par rapport à des sources exogènes.

a) Etude comparative des MP dans les sédiments de plages

Il a été observé entre  $172,3 \pm 119,7$  MP/kg (ISB) et  $533,4 \pm 261,32$  MP/kg (BAMBO) de sable sec dont plus de 90% de *fibres* sur l’ensemble des sites lors de la campagne d’échantillonnage réalisée en mars 2019 (Figure 13, Figure 14). Concernant les classes de taille de microplastique, il est intéressant de noter que celle de  $[125\mu\text{m} ; 500\mu\text{m}[$  est largement plus représentée par rapport à celle de  $[500\mu\text{m} ; 5\text{mm}]$ . On a donc une très nette prédominance des « petits » microplastiques sur les plages échantillonnées à Mayotte. Etant donné qu’aucun protocole standard sur l’étude des microplastiques dans les sédiments de plages n’existe encore actuellement (Hidalgo-Ruz *et al.*, 2012, Lacroix *et al.*, 2018), il est difficile de comparer les données issues de cette étude avec d’autres régions du monde. Toutefois, différents articles rapportent les concentrations suivantes :  $92,8 (\pm 37,2)$  MP/kg de sable sec sur les plages belges dont 54% de *fibres* (Claessens *et al.*, 2011) ;  $45 \pm 12$  MP/kg à  $220 \pm 50$  MP/kg de sable sec sur trois plages en Inde (Tiwari *et al.*, 2019) ; 72 à 1512 MP/kg de sédiment sec dont 98,7% de *fibres* sur 23 plages dans 13 pays différents en Europe (Lots *et al.*, 2017) ; 38 à 225 MP/kg de sable sec dont 97% de *fibres* sur 35 plages au Etats-Unis selon la NOAA (Whitmire *et al.* 2017) ; 0 à 8 MP/kg de sable sec sur des plages de Singapour (Ng et Obbard, 2004). On constate que la majorité des études présentent des concentrations inférieures à ce qui a pu être observé à Mayotte. Cependant, les comparaisons restent limitées en raison des méthodologies différentes appliquées. A titre d’exemple, Claessens *et al* (2011) se focalisent sur des particules dont la taille varie de 0.038 mm à 1 mm alors que nos résultats concernent des particules de  $[0,125 ; 5]\text{mm}$ . De même, Lots *et al* (2017) indiquent que 54,8 % des MP sont inférieures à 1 mm (sans plus de précision).

b) Etude comparative des MP à la surface de l’eau

Du fait que les microplastiques ont une faible densité et une faible vitesse de dégradation, leur potentiel de dispersion à la surface du compartiment marin est considérable (Barnes *et al.*, 2009). Parmi les échantillons d’eau de surface collectés durant cette étude en mars 2019, il a pu être observé une concentration moyenne de  $2,09 \pm 0,63$  MP/m<sup>3</sup> aux abords des cinq sites non anthropisés, dont 47% étaient des *fibres* et 39,9% des *fragments* de MP (Figure 16, Figure 17).



Tous les MP récoltés avaient une taille inférieure à 500 $\mu$ m. Bien que les *fibres* soient prédominantes, on observe une plus grande hétérogénéité des types de MP flottants dans le lagon (Figure 17) que de ceux présents dans les sédiments (Figure 14). Cela suggère que la source de MP dans les eaux de surface est liée d'une part à des intrants primaires comme les stations d'épurations (Browne *et al.*, 2011 ; Murphy *et al.*, 2016; Sutton et coll., 2016) et d'autre part à une décomposition rapide de débris plastiques plus gros (Cole *et al.*, 2011; Vianello *et al.*, 2013). Il n'est actuellement pas possible d'en tirer des conclusions quant à cette différence de composition entre les échantillons de sédiments et ceux des eaux de surface. On notera tout de même que les *fibres* et les *fragments* constituent les deux types de MP prédominants sur les plages et à la surface de l'eau. Les études ayant réalisé le même type de prélèvements obtiennent les concentrations suivantes :  $2,38 \pm 1,11$  MP/m<sup>3</sup> dans la mer du Groenland dont 97,2% de *fibres* (Amélineau *et al.*, 2016) ; 0,03 MP/m<sup>3</sup> au Brésil (Ivar do Sul *et al.*, 2014) ;  $2,68 \pm 2,95$  MP/m<sup>3</sup> dans la mer Barent (Lusher *et al.*, 2015) ; 0,004 à 0,19 MP/m<sup>3</sup> dans la mer de Bering (Doyle *et al.*, 2011) ; 3,92 MP/m<sup>3</sup> dans la baie de Santa Monica, Etats-Unis (Lattin *et al.*, 2004). Ainsi, Mayotte et son lagon présentent des concentrations de MP similaires à d'autres lieux très urbanisés dans le monde. Encore une fois, il est important de nuancer ces résultats du fait d'une méthodologie appliquée quelque peu variable selon les études. Par exemple, l'étude de Amélineau *et al* (2016) a porté sur les MP de taille supérieure à 500 $\mu$ m tandis que cette étude s'est limitée à la taille de la maille du filet (220 $\mu$ m).

Pour conclure sur l'efficacité et la validation de ces protocoles, l'étude actuelle présente un état de référence des MP dans les sédiments de plage et les eaux de surface de Mayotte au temps  $t_0$  de réalisation des échantillonnages, soit en mars 2019. Au regard des résultats similaires à ceux d'autres études appliquant le même type de méthode et du fait que les protocoles suivent au plus près possible les recommandations de la DCSMM, ces derniers constituent des suivis fiables pour évaluer les quantités de microplastiques présents dans les matrices étudiées à Mayotte. La pérennité de ces suivis, en parallèle avec celui déjà mis en place pour les macrodéchets, permettra de dresser des tendances sur l'accumulation, les volumes et les types de déchets. Ainsi des actions locales concrètes pourront être plus facilement menées pour limiter les apports en plastiques de tous genres et donc en microplastiques. Parmi elles, à titre d'exemple ici, cette étude recommande une meilleure filtration des eaux usées au sein des unités de traitement et, bien évidemment, des actions pour réduisant l'importation et l'usage de plastiques, d'autres les recyclant.

### A. Limites et recommandations des protocoles de suivi

Les protocoles utilisés dans cette étude ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants au regard d'autres travaux présentés ci-dessus en termes de quantité et de proportions. Quelques recommandations ont été faites pour améliorer ces protocoles d'évaluation de la pollution des littoraux par les déchets à Mayotte. Les modifications apportées permettront de (i) diminuer le temps de traitement des échantillons (ii) limiter une contamination de ces derniers (iii) permettre des comparaisons avec d'autres études (iv) limiter l'empreinte environnementale (prélèvement de sédiments).

Certaines limites sont communes aux trois protocoles de l'Observatoire des déchets marins. Il faut en effet se garder d'extrapoler sans réserves à l'ensemble du territoire de Mayotte les résultats sur seulement cinq ou huit sites d'étude aussi pertinents puissent-ils être. En effet, les protocoles considèrent l'ensemble des cinq sites pour une analyse globale du territoire. Cependant, cette étude montre bien qu'il existe une grande variance entre les plages suivies, et ce quel que soit le protocole (MD, MP...). Pour une meilleure représentativité du territoire, il serait pertinent d'échantillonner les macrodéchets et les microplastiques sur un plus grand nombre de sites, et tant en des lieux anthropisés que non anthropisés. Cela permettrait de mieux cibler et préparer les décisions et les actions publiques à mettre en œuvre pour gérer les déchets.



## 1. Macrodéchets

D'après les études citées, il serait nécessaire de disposer de davantage de données (Schulz *et al.*, 2017 ; Gago *et al.*, 2014). En effet, avec quatre suivis par an, l'intervalle de temps entre ces derniers est relativement long ce qui implique d'avoir des suivis sur une période beaucoup plus longue avant de pouvoir dégager des tendances claires et fiables.

Un paramètre qu'il apparaît intéressant d'inclure dans le protocole OSPAR est celui du volume des MD récoltés. En effet, un fragment de tong ou un pneu sont enregistrés comme un seul déchet de caoutchouc, de même qu'une canette métallique et une carcasse de voiture. La mesure des volumes permettrait entre autres de mieux estimer la dangerosité des déchets polluants et serait sans conteste indispensable à l'appréciation des moyens à prévoir pour leur ramassage.

Concernant les catégories de macrodéchets utilisées et définies dans le protocole OSPAR, plusieurs points majeurs sont relevés ici : tout d'abord, la liste de déchets du protocole OSPAR ne catégorise pas les macrodéchets selon la capacité à recycler ces derniers en amont. Ainsi, il serait pertinent de classer les déchets de la liste OSPAR selon leur potentialité de recyclage. Par ailleurs, il serait utile de compléter les catégories de déchets marins de la DCSMM (Annexe 14; Galgani *et al.*, 2011) en y ajoutant les déchets provenant : des activités de pêche (filet, hameçons, DCP...), des ordures ménagères (cartons, boîtes de conserves, ...), de produits sanitaires (préservatifs, serviettes hygiéniques, ...), des transports (paquets industriels, bandes d'attaches, ...) du tourisme (emballages de canettes, sacs de courses, ...). Les actions de gestion pourront mieux cibler les sources de déchets et sensibiliser le public concerné.

Enfin le protocole OSPAR ne discrimine pas les méso- [5mm ; 2,5cm[ des macrodéchets [2,5cm ; +∞[. En effet, certaines catégories de la liste OSPAR (2010) considèrent des déchets <2,5cm tels que : *polystyrène < 2,5cm* », *plastique < 2,5cm* », *mousse < 2,5cm* ». Ces trois catégories sont pourtant en quantités non négligeables dans la plupart des suivis. Or, des petits déchets <2,5cm peuvent ne pas être ramassés aussi efficacement selon les opérateurs réalisant les suivis. Ainsi, en considérant les macrodéchets comme étant seulement ceux >5mm, il est possible de sous-estimer la quantité réelle de macrodéchets. Une évaluation séparée des MD >2,5cm serait pertinente pour tester si cette catégorie de taille influe sur la variabilité des suivis.

## 2. Microplastiques

### a) Sur le terrain

Pour le protocole des MP dans les sédiments, l'échantillonnage réalisé à différentes positions sur les plages avait pour objectif de donner les premières pistes sur des zones d'accumulation de microplastiques. Avec un seul échantillon par position à chaque site, une comparaison intrinsèque à chaque site n'était pas recommandée statistiquement. C'est pourquoi il a été nécessaire de comparer ces positions pour tous les sites confondus. Les observations montrent que les microplastiques n'ont pas de zone préférentielle d'accumulation. Seule une différence entre le début (0m) et la fin (100m) du transect du milieu a été démontrée (figure 15). De même, aucune tendance claire entre la taille de grains des sédiments et le dépôt de MP sur les sédiments n'a pu être relevée (Annexe 11). Ces résultats, en accord avec certaines études (Alomar *et al.*, 2016 ; Dekiff *et al.*, 2014 ; Hengstmann *et al.*, 2018) montrent que les plages accumulent de façon relativement homogène les microplastiques, et ce, indépendamment de la granulométrie ou de la position de prélèvement. Ainsi, afin de rendre l'analyse des MP moins longue, il serait possible de limiter le nombre d'échantillonnages et de le réduire de neuf à trois, soit uniquement trois échantillons sur le transect au niveau de la laisse de la marée du jour.

Sur le terrain, deux limites majeures au protocole des MP dans les sédiments sont : la taille des échantillons (~4L par quadrat) et l'impossibilité de tamiser du sable humide sur place avec un



tamis d'une maille de 0,5mm. C'est pourquoi il est recommandé de diminuer la taille des échantillons au moment du prélèvement de façon à avoir moins de 1,5L de sédiments par échantillon. De cette manière, la quantité de sable prélevée en sera réduite et limitera l'empreinte environnementale.

Pour le suivi de MP des sédiments de plages, il est recommandé de tenir compte des coefficients de marée qui modifient la laisse de mer du jour et introduisent ainsi un biais dans la mesure où les prélèvements s'effectueront à des points variables le long du profil de plage. Or, selon les caractéristiques morphosédimentaires, la densité de microplastiques peut grandement varier. Ainsi, même si la DCSMM recommande un suivi sur la laisse du jour, il serait plus pertinent d'appliquer les recommandations de Lacroix *et al* (2018) qui ont jugé « *préférable de privilégier un suivi toujours à la même hauteur, et relativement similaire, en choisissant la laisse de mer de marée de coefficient de 80 environ* ».

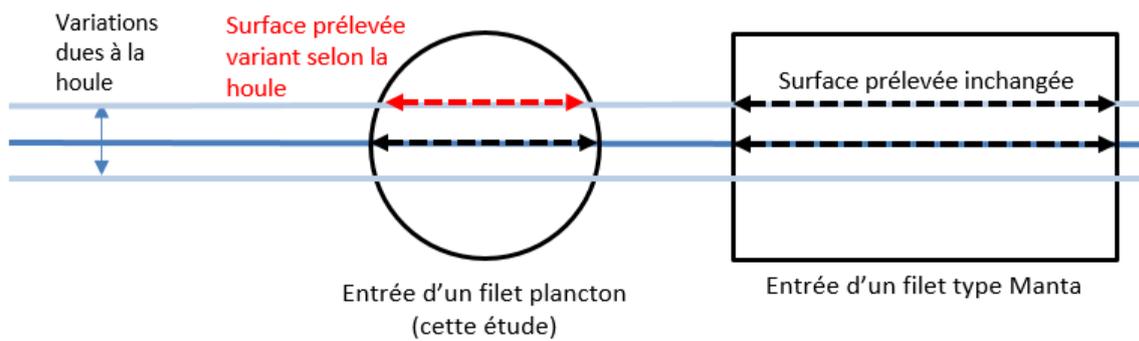
Pour le suivi des MP des eaux de surface, certains paramètres peuvent également entraîner des biais. Une durée d'échantillonnage de 30 minutes avec un filet à plancton apparaît trop longue, car une grande quantité de matière organique s'accumule dans les échantillons, rendant la filtration et l'identification compliquée. Par conséquent, les échantillons ont dû être dilués avec de l'eau distillée, augmentant ainsi les risques de contamination aérienne par des MP. Il est donc recommandé de réduire le temps d'échantillonnage à 10 minutes et de réaliser trois réplicats par site, afin d'avoir une meilleure estimation de la concentration de MP de la couche supérieure de l'eau. D'autre part, le volume traité par le filet à plancton à ouverture circulaire reste une estimation en raison de l'impossibilité de garantir un passage constant de la surface de l'eau exactement à la moitié du cercle du filet du fait de la houle. Il serait préférable d'utiliser un filet type Manta à entrée rectangulaire qui assure une collecte régulière en dépit des variations de niveau de l'eau. Ceci permettrait d'éliminer ou au moins d'atténuer les biais d'estimation du volume traité par le filet (Figure 18).

#### b) En laboratoire

Une limite à l'identification visuelle des MP par microscope est qu'elle est chronophage. Mino Vercellio Verollet (2016) a évalué à 5 semaines l'étude de 500 filtres à la loupe binoculaire (8 semaines dans cette étude pour 165 filtres au microscope optique). Le temps d'étude varie en fonction de l'échantillon, allant de 2h à 3h30 par échantillon selon la quantité de débris biologiques extraits (Mino Vercellio Verollet, 2016). Une autre limite est le risque de mauvaise identification pouvant entraîner une sous ou surestimation de la contamination. Un risque qui augmente quand la taille des particules diminue et lorsque la quantité de matière organique biogénique sur les filtres est importante (Dekiff *et al.*, 2014, Käßler *et al.*, 2016). Pour réduire cette matière organique biogénique, un traitement d'une semaine avec une solution de peroxyde d'hydrogène (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) à 30% peut être effectué (Nuelle *et al.*, 2014). Ce traitement peut permettre de réduire les temps de filtration et d'observation au microscope.

Par ailleurs, faute d'équipements, il n'a pas pu être fait d'identification chimique des microplastiques par *spectroscopie vibrationnelle de type infrarouge à transformée de Fourier* (Käßler *et al.*, 2016) ou encore par *méthode séquentielle pyrolyse-chromatographie gazeuse* couplée à de la *spectrométrie de masse* (Pyr-GC/MS) (Fries *et al.*, 2013). Or, ces méthodes sont plus fiables pour identifier les microplastiques, car elles permettent de déterminer précisément la nature du polymère (MSFD/TSG-ML, 2013). Mais ces technologies plus complexes nécessitent généralement des opérateurs formés. De plus, un tel matériel n'est pour le moment pas disponible au PNMM.

Pour les échantillons d'eau de surface, la contamination n'a pas pu être évaluée. En effet, les volumes d'eau distillée introduit dans les échantillons afin de les diluer avant filtration n'a pas été mesuré. Or, il est primordial d'évaluer cette contamination dans les prochains suivis.



**Figure 18.** Différence entre l'entrée d'un filet plancton et l'entrée d'un filet Manta sur la surface échantillonnée

## V. Conclusion et perspectives

---

Dans le cadre de l'Observatoire des Déchets Marins du Parc naturel marin de Mayotte mis en place depuis 2017, cette étude aura permis de compléter et d'enrichir le suivi des macrodéchets (MD) de nouvelles données et de nouveaux sites étudiés, et d'initier et proposer un suivi des microplastiques (MP).

L'évaluation des macrodéchets de sédiments de plage a été réalisé en suivant le protocole européen OSPAR et les recommandations de la DCSMM sur les cinq sites non anthropisés étudiés depuis 2017, ainsi que sur trois nouveaux sites anthropisés. A ce stade proposer un indicateur basé sur les quantités, les volumes ou la nature des macrodéchets serait prématuré au regard de la durée d'étude trop courte. Les changements analysés n'apparaissent d'ailleurs pas significatifs sur deux ans et demi.

La mise en place d'un suivi des microplastiques aura permis d'obtenir un premier état de référence de la pollution des sédiments de plages, ainsi que des eaux de surface marines voisines de ces plages, celles déjà étudiées pour les MD. Un état de l'art assez complet, mais non exhaustif, des protocoles existants dans le monde, complète les apports de cette étude et aura permis de retenir et d'adapter deux nouveaux protocoles pour l'étude des MP à Mayotte. Au-delà des références collectées et de la validation des protocoles utilisés pour les MP, l'étude fournit des résultats et quelques tendances sur la pollution par les déchets marins. Un point remarquable est l'omniprésence des plastiques de toutes formes et de tous types, l'ampleur de leur distribution et leur large prédominance par rapport aux autres déchets sur les sites éloignés des secteurs peuplés.

Il convient de poursuivre ce suivi à moyen et long terme pour pouvoir dégager des tendances claires et proposer des indicateurs fiables, par exemple sur la quantité, la distribution, le type de MD et de MP échoués sur les plages. Mais des études complémentaires doivent également venir renforcer la connaissance notamment sur (i) les quantités de MD et MP dans les autres matrices environnementales (ii) l'importance des différences de quantité et nature de MD et MP entre sites anthropisés et non anthropisés (iii) les quantités de MD et MP libérés par les exutoires et les stations d'épurations (iv) la courantologie et l'hydrodynamique lagonaire (v) l'effet de la marée et du vent sur les volumes de déchets retrouvés (vi) les comportements socioculturels.

Dans un objectif de gestion efficace, des indicateurs sur la pollution des littoraux pourront être élaborés à partir de l'analyse de ces suivis qui doivent encore s'étoffer de données, recommandation partagée par la DCSMM dans son étude du descripteur 10 (déchets marins). A l'échelle nationale le CÈDRE se propose de coordonner les suivis déjà existants tant pour les MD que pour les MP. La base de données DALI fournie par l'Ifremer permettrait une mise en commun des données collectées selon le protocole OSPAR. Le PNMM sera bientôt habilité à alimenter cette base en données issues de son Observatoire des déchets marins. Même si les objectifs de la DCSMM prévus à l'horizon 2020 ne seront sûrement pas atteints, les efforts et les résultats des travaux que multiplie le PNMM depuis sa création, contribuent concrètement à la protection et à un début de gestion raisonnée de cet exceptionnel environnement marin de l'archipel de Mayotte. Ils doivent être renforcés et soutenus.

Un développement méthodologique des protocoles pour les MD et les MP reste à concrétiser afin que des comparaisons soient possibles entre études. Dans ces conditions, la mise en œuvre d'indicateurs de pollution, ne pourra être faite qu'à partir de suivis et d'état de références solides et devra être liée aux programmes de recherche développés en Europe en support de la DCSMM. Le CÈDRE, ainsi que des experts de la DCSMM, tentent d'établir des



seuils de pollutions des macrodéchets échoués sur les plages, tandis qu'un suivi national des microplastiques présents dans les sédiments de plage est en train d'être mis en place également par le CÈDRE (Lacroix et al., 2018). Il sera proposé à l'automne 2019 aux différents acteurs de la mer tels que les Parcs naturels marins.

Le problème de la pollution par les plastiques, enjeu majeur de ce siècle, se pose de façon inquiétante à Mayotte. Même si les travaux scientifiques apportent un support à la décision, celle-ci revient aux décideurs politiques qui doivent allouer sans tarder les moyens pour contenir cette crise mondiale des déchets. Mais celle-ci débute aussi dans les choix de consommation des ménages.

## Références bibliographiques

---

- ADÈME Direction Régionale Réunion – Mayotte, Mission d'Assistance à la caractérisation et la définition de l'impact des macrodéchets sur le milieu aquatique (eaux douces et marines) : état des lieux et recommandations, *ASCONIT / PARETO / Mer Terre / SOGREA*, p 1-227, **2011**
- Alomar, C., Estarellas, F. et Deudero, S., Microplastics in the Mediterranean Sea: deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size. *Marine environmental research*, 115, p 1-10, **2016**
- Amélineau, F., Bonnet, D., Heitz, O., Mortreux, V., Harding, A. M., Karnovsky, N., Walkusz W., Fort, J., et Gremillet, D., Microplastic pollution in the Greenland Sea: Background levels and selective contamination of planktivorous diving seabirds, *Environmental pollution*, 219, p 1131-1139, **2016** <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27616650#>
- Andrady, A.L., Microplastics in the marine environment, *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), p.1596-1605, **2011**  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Arthur, C., Baker, J. et Bamford, H., Proceedings of the International Research Workshop on the Occurrence, Effects, and Fate of Microplastic Marine Debris, *NOAA Technical Memorandum NOS-OR&R-30, University of Washington*, **2009**
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., et Barlaz, M., Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), p 1985-1998, **2009**  
<https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Besley, A., Vijver, M. G., Behrens, P., et Bosker, T., A standardized method for sampling and extraction methods for quantifying microplastics in beach sand, *Marine Pollution Bulletin*, 114 (1), p 77-83, **2017**  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.055>
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., et Thompson, R., Accumulation of Microplastics on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks, *Environmental Science & Technology*, 45 (21), p 9175-9179, **2011**  
<https://doi.org/10.1021/es201811s>
- Cartraud, A., La pollution par les déchets marins à la Réunion : Etude préliminaire – Identification, sources et impacts. *Rapport de stage de M2*, p 1-60, **2016**
- CGM - Conseil Général de Mayotte, Elaboration du Plan d'élimination des déchets ménagers et assimilés (PEDMA) de Mayotte et de son système de gestion associé. *Trivalor, Département "Déchets et Ecologie Industrielle"*, 7, p 1-274, **2010**  
[http://www.deal976.fr/pacsar/pdf/Plans\\_et\\_programmes/Eau\\_assainissement/PEDMA.pdf](http://www.deal976.fr/pacsar/pdf/Plans_et_programmes/Eau_assainissement/PEDMA.pdf)
- Claessens, M., De Meester, S., Van Landuyt, L., De Clerck, K., et Janssen, C. R., Occurrence and distribution of microplastics in marine sediments along the Belgian coast, *Marine pollution bulletin*, 62(10), p 2199-2204., **2011**
- Coe, J. M., et Rogers, D. B., Marine Debris: Sources. Impacts and Solutions, *Springer, Etats-Unis*, p 1-415, **1997**

- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., et Galloway, T. S., Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine pollution bulletin*, 62(12), p 2588-2597, **2011**
- Dekiff, J. H., Remy, D., Klasmeier, J., et Fries, E., Occurrence and spatial distribution of microplastics in sediments from Norderney, *Environmental Pollution*, 186, p 248-256, **2014**
- De La Torre, Y., Delattre, M., Idier, D., Romieu, E., Delvallee, E. et Le Cozannet, G., Modélisation courantologique du lagon de Mayotte. *Rapport BRGM/RP 56334-FR*, p 1-133, **2008**
- Derraik, J. G. B., The pollution of the marine environment by plastic debris: a review, *Marine Pollution Bulletin*, 44, p 842-852, **2002**  
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(02\)00220-5](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(02)00220-5)
- DCSMM, Directive 2008/56/CE du Parlement Européen et du Conseil du 17 juin 2008 établissant un cadre d'action communautaire dans le domaine de la politique pour le milieu marin (directive-cadre stratégique pour le milieu marin), **2008**  
<http://data.europa.eu/eli/dir/2008/56/2017-06-07>
- Doyle, M.J., Watson, W., Bowlin, N.M. et Sheavly, S.B., Plastic particles in coastal pelagic ecosystems of the Northeast Pacific Ocean, *Marine Environmental Research*, 71, p 41-52, **2011**
- Duhec, A. V., Jeanne, R. F., Maximenko, N. et Hafner, J., Composition and potential origin of marine debris stranded in the Western Indian Ocean on remote Alphonse Island, Seychelles, *Marine Pollution Bulletin*, 96, p 76-86, **2015**  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.042>
- Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., ... et Reisser, J., Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea, *PLOS ONE*, 9 (12), p 1-15, **2014**  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>
- Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., ... et Amato, S., Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes, *Marine pollution bulletin*, 77 (1-2), p 177-182, **2013**  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>
- Free, C. M., Jensen, O. P., Mason, S. A., Eriksen, M., Williamson, N. J. et Boldgiv, B., High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake, *Marine Pollution Bulletin*, 85 (1), p 156-163, **2014**  
<https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2014.06.001>
- Fries, E., Dekiff, J.H., Willmeyer, J., Nuelle, M.-T., Ebert, M. et Remy, D., Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy, *Environ. Sci. Process. Impacts*, 15, p 1-1949, **2013**
- Gago, J., Lahuerta, F., et Antelo, P., Characteristics (abundance, type and origin) of beach litter on the Galician coast (NW Spain) from 2001 to 2010, *Scientia Marina*, 78(1), p 125-134, **2014**
- Galgani, F., et 25 co-auteurs, Marine litter: Technical recommendations for the implementation of MSFD requirements, *European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability*, Luxembourg, 1, p 1-91, **2011**
- Galgani, F., Claro, F., Depledge, M., et Fossi, C., Monitoring the impact of litter in large vertebrates in the Mediterranean Sea within the European Marine Strategy Framework

- Directive (MSFD): Constraints, specificities and recommendations, *Marine Environmental Research*, 100, p 3-9, **2014**  
<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.02.003>
- Galgani, F., Hanke, G., et Maes, T., Global distribution, composition and abundance of marine litter, *Marine anthropogenic litter*, Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M., Springer Open, Bremerhaven, p 29-56, **2015**  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3>
- Gasperi, J., Dris, R., Bonin, T., Rocher, V., et Tassin, B., Assessment of floating plastic debris in surface water along the Seine River, *Environmental pollution*, 195, p 163-166, **2014**  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.09.001>
- Gourbesville Ph. et Thomassin B.A., Coastal environment assessment procedure for sustainable wastewater management in tropical islands: the Mayotte example, *Ocean and Coastal Management*, 43, p 997-1014, **2000**
- Gregory, M. R., Environmental implications of plastic debris in marine settings-entanglement, ingestion, smothering, hangers-on, hitch-hiking and alien invasions, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364 (1526), p 2013-2025, **2009**  
<https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0265>
- Hengstmann, E., Tamminga, M., vom Bruch, C. et Fischer, E. K., Microplastic in beach sediments of the Isle of Rügen (Baltic Sea)-Implementing a novel glass elutriation column, *Marine pollution bulletin*, 126, p 263-274, **2018**
- Henry M., Pollution du milieu marin par les déchets solides : État des connaissances. Perspectives d'implication de l'Ifremer en réponse au défi de la Directive Cadre Stratégie Marine et du Grenelle de la Mer, *IFREMER*, Brest, p 1-69, **2010**
- Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson R. C., et Thiel, M., Microplastics in the Marine Environment: A Review of the Methods Used for Identification and Quantification. *Environmental Science and Technology*, 46 (6), p 3060-3075, **2012**  
<https://doi.org/10.1021/es2031505>
- IEDOM – Institut d'Emission des Départements d'Outre-Mer, Rapport annuel Mayotte 2018, *IEDOM Edition 2019*, Paris, p 1-198, **2019**
- Ifremer, DALI – Quadrige<sup>2</sup>- Cellule d'administration  
[https://www.ifremer.fr/quadrige2\\_support/DALI](https://www.ifremer.fr/quadrige2_support/DALI), décembre **2018**
- Imhof, H. K., Schmid, J., Niessner, R., Ivleva, N. P., et Laforsch, C., A novel, highly efficient method for the separation and quantification of plastic particles in sediments of aquatic environments, *Limnology and Oceanography: Methods*, 10, p 524-537, **2012**  
<https://doi.org/10.4319/lom.2012.10.524>
- INSEE, Statistiques Mayotte, INSEE FOCUS N°105  
<https://www.insee.fr/fr/statistiques/3286558>, décembre **2017**
- Ivar do Sul, J. A., Costa, M. F. et Fillmann, G., Microplastics in the pelagic environment around oceanic islands of the Western Tropical Atlantic Ocean, *Water, Air & Soil Pollution*, 225 (7), p 1–13, **2014**
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., ... et Law, K. L., Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, p 1655-1734, **2015**  
<https://doi.org/10.1126/science.1260352>

- Käppler, A., Fischer, D., Oberbeckmann, S., Schernewski, G., Labrenz, M., Eichhorn, K.-J., et Voit, B., Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both? *Anal. Bioanal. Chem.*, 408, p 8377–8391, **2016**
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P. et Van Woerden, F., What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050, *Urban Development; Washington, DC: World Bank*, p 1-295, **2018**  
<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>
- Labbé, C., Etude de faisabilité : Protocole de suivi des microplastiques au sein du Parc Naturel Marin d'Iroise dans le cadre de la Directive Cadre Stratégie pour le milieu marin, **2016**
- Lacroix, C., Kerambrun, L., Le Floch, S. et Guéna, A., Développement d'un protocole de suivi des microparticules sur le littoral de France métropolitaine dans le cadre du programme de surveillance DCSMM, *AFB*, 115 (10), p 1-130, **2018**
- Laglbauer, B. J., Franco-Santos, R. M., Andreu-Cazenave, M., Brunelli, L., Papadatou, M., Palatinus, A., Grego, M., et Deprez, T., Macrodebris and microplastics from beaches in Slovenia, *Marine pollution bulletin*, 89 (1-2), p 356-366, **2014**  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25440193>
- Lattin, G.L., Moore, C.J., Zellers, A.F., Moore, S.L. et Weisberg, S.B., A comparison of neustonic plastic and zooplankton at different depths near the southern California shore, *Marine Pollution Bulletin*, 49(4), p 291-294, **2004**  
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15341821>
- Lavers, J. L., et Bond, A. L., Exceptional and rapid accumulation of anthropogenic debris on one of the world's most remote and pristine islands, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114 (23), p 6052-6055, **2017**  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1619818114>
- Law, K. L., Morét-Ferguson, S., Maximenko, N. A., Proskurowski, G., Peacock, E. E., Hafner, J., et Reddy, C. M., Plastic accumulation in the North Atlantic subtropical gyre, *Science*, 329(5996), p 1185-1188, **2010**  
<https://doi.org/10.1126/science.1192321>
- Lots, F. A., Behrens, P., Vijver, M. G., Horton, A. A., et Bosker, T., A large-scale investigation of microplastic contamination: Abundance and characteristics of microplastics in European beach sediment, *Marine pollution bulletin*, 123 (1-2), p 219-226, **2017**
- Lusher, A., Microplastics in the Marine Environment: Distribution, Interactions and Effects, *Marine Anthropogenic Litter*, Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M., Springer Open, Bremerhaven, p 245-307, **2015**  
[https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_10)
- Martinez-Ribes, L., Basterretxea, G., Palmer, M., et Tintoré, J., Origin and abundance of beach debris in the Balearic Islands, *Scientia Marina*, 71 (2), p 305-314, **2007**
- Mino Vercellio Verollet, M., Etude préliminaire de la distribution des microplastiques sur les plages du Parc naturel marin du golfe du Lion, **2016**
- Moore, C., Moore, S., Leecaster, M., et Weisberg, S., A Comparison of Plastic and Plankton in the North Pacific Central Gyre, *Marine Pollution Bulletin*, 42 (12), p 1297-1300, **2001**  
[https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00114-X](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00114-X)
- MSFD/TSG-ML – Marine Strategy Framework Directive/Technical Subgroup on Marine Litter, Guidance on monitoring of marine litter in European Seas, A guidance document within the Common Implementation Strategy for the Marine Strategy Framework

- Directive, *Joint Research Center Institute for Environment and Sustainability*, Luxembourg, p 1-128, **2013**
- MSFD GES Technical Subgroup on Marine Litter, Marine Litter - Technical Recommendations for the Implementation of MSFD Requirements, EUR 25009 EN– *Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability*, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 91 pp, 2011  
[http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC67300/msfd\\_ges\\_tsg\\_marine\\_litter\\_report\\_eur\\_25009\\_en\\_online\\_version.pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC67300/msfd_ges_tsg_marine_litter_report_eur_25009_en_online_version.pdf)
- MTES - Ministère de la transition écologique et solidaire, Un programme de surveillance pérenne pour évaluer l'état écologique du milieu marin, *Rapport de synthèse, MTES/DGALN/AFB*, p 1-38, **2019**  
[https://www.afbiodiversite.fr/sites/default/files/actualites/ami\\_surveillance/Document01\\_PDS\\_DCSMM\\_FichesPedagogiques2018\\_4.pdf](https://www.afbiodiversite.fr/sites/default/files/actualites/ami_surveillance/Document01_PDS_DCSMM_FichesPedagogiques2018_4.pdf)
- MTES, Ministère de la transition écologique et solidaire, Pour un bon état écologique du milieu marin en 2020. La mise en œuvre de la directive-cadre stratégie pour le milieu marin. DICOM-DGALN/BRO/16258-1 Brochure, 12p, septembre **2017**
- Munari, C., Corbau, C., Simeoni, U., et Mistri, M., Marine litter on Mediterranean shores: analysis of composition, spatial distribution and sources in north-western Adriatic beaches, *Waste management*, 49, p 483-490, **2016**
- Munari, C., Infantini, V., Scoponi, M., Rastelli, E., Corinaldesi, C., et Mistri, M. Microplastics in the sediments of Terra Nova Bay (Ross Sea, Antarctica), *Marine pollution bulletin*, 122 (1-2), p 161-165, **2017**
- Murphy, F., Ewins, C., Carbonnier, F., et Quinn, B, Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment, *Environmental science & technology*, 50(11), p 5800-5808, **2016**
- Ng, K. L., et Obbard, J. P., Prevalence of microplastics in Singapore's coastal marine environment, *Marine Pollution Bulletin*, 52 (7), p 761-767, **2006**
- NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration, Laboratory Methods for the analysis of microplastics in the marine environment: recommendations for quantifying synthetic particles in waters and sediments, *U.S. Department of Commerce Technical Memorandum*, p 1-39, **2015**
- Nuelle, M.-T., Dekiff, J.H., Remy, D., et Fries, E., A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments, *Environment Pollution*, 184, p 161–169, **2014**
- OSPAR, Guideline for monitoring marine litter on the beaches in the OSPAR maritime Area, *OSPAR Commission*, Londres, 84, 1, p 1-84, **2010**
- OSPAR, Déchets sur les plages - Abondance, composition et tendances, **2017**  
<https://oap.ospar.org/fr/evaluations-ospar/evaluation-intermediare-2017/pressions-de-lactivite-humaine/dechets-marins/dechets-sur-les-plages-abondance-composition-et-tendances/>
- Panno, S. V., Kelly, W. R., Scott, J., Zheng, W., McNeish, R. E., Holm, N., ... et Baranski, E. L., Microplastic Contamination in Karst Groundwater Systems, *Groundwater*, 57 (2), p 189-196, **2019**  
<https://doi.org/10.1111/gwat.12862>
- PNMM – Parc Naturel Marin de Mayotte, Rapport d'activités 2018 du Parc naturel marin de Mayotte (PNMM), *Agence française pour la biodiversité (AFB)*, p 1-46, **2019**

<https://fr.calameo.com/read/003502948ef7d728f50a1>

PNMM – Parc Naturel Marin de Mayotte, Plan de gestion du Parc naturel marin de Mayotte. *Agence des Aires marines protégées (AAMP)*, p 1-420, **2012**

<http://www.aires-marines.fr/L-Agence/Organisation/Parcs-naturels-marins/mayotte/Documents/Plan-de-gestion-du-Parc-naturel-marin-de-Mayotte>

Ryan, P. G., A Brief History of Marine Litter Research, *Marine Anthropogenic Litter*: p 1-25, **2015**

[https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_1)

Sadri, S. S., & Thompson, R. C., On the quantity and composition of floating plastic debris entering and leaving the Tamar Estuary, Southwest England. *Marine Pollution Bulletin*, 81(1), p 55-60, **2014**

<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.02.020>

Schöneich-Argent, R. I., Hillmann, F., Cordes, D., Wansing, R. A. D., Merder, J., Freund, J. A., et Freund, H., Wind, waves, tides, and human error? - Influences on litter abundance and composition on German North Sea coastlines: An exploratory analysis, *Marine Pollution Bulletin*, 146, p 155-172, **2019**

Schouten M., De Ruijter W., Jan Van Leeuwen P. et Ridderinkhof H., Eddies and variability in the Mozambique Channel, *Deep-Sea Research II*, 50, p 1987–2003, **2003**

Schulz, M., van Loon, W., Fleet, D. M., Baggelaar, P., et van der Meulen, E., OSPAR standard method and software for statistical analysis of beach litter data, *Marine pollution bulletin*, 122 (1-2), p 166-175, **2017**

Sluka, R., Calcutt, J. et Nussbaumer, A., Guidelines for sampling microplastics on sandy beaches. *A Rocha International's and Coastal Conservation*, p 1-41, **2018**

<http://www.arocha.org/wp-content/uploads/2018/01/Microplastic-sampling-protocol.pdf>

Sutton, R., Mason, S. A., Stanek, S. K., Willis-Norton, E., Wren, I. F., et Box, C., Microplastic contamination in the San Francisco Bay, California, USA, *Marine pollution bulletin*, 109(1), p 230-235, **2016**

Thompson, R. C., Olson, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., ... et Russell, A. E., Lost at Sea: Where Is All the Plastic?, *Science*, 304 (5672), p 1-838, **2004**

<https://doi.org/10.1126/science.1094559>

Thompson, R. C., Moore, C. J., Saal, F. S. V., & Swan, S. H., Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), p 2153-2166, **2009**

<https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>

Tiwari, M., Rathod, T. D., Ajmal, P. Y., Bhangare, R. C., et Sahu, S. K., Distribution and characterization of microplastics in beach sand from three different Indian coastal environments, *Marine Pollution Bulletin*, 140, p 262-273, **2019**

<https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2019.01.055>

Topçu, E. N., Tonay, A. M., Dede, A., Öztürk, A. A. et Öztürk, B., Origin and abundance of marine litter along sandy beaches of the Turkish Western Black Sea Coast, *Marine environmental research*, 85, p 21-28, **2013**

Tourinho P.S. et Fillmann G., Temporal trend of litter contamination at Cassino beach, Southern Brazil, *J. Integ. Coast. Zone Manage*, 11(1), p 97-102, **2011**

- UICN France, Mayotte (France), <https://www.iucn.org/regions/europe/resources/country-focus/mayotte-france>, **juin 2019**
- Veiga, J.M., Fleet, D., Kinsey, S., Nilsson, P., Vlachogianni, T., Werner, S., Galgani, F., Thompson, R.C., Dagevos, J., Gago, J., Sobral, P. and Cronin, R., Identifying Sources of Marine Litter. *MSFD GES TG Marine Litter Thematic Report; JRC Technical Report; EUR 28309*; doi:10.2788/018068, **2016**  
[https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/pdf/MSFD\\_identifying\\_sources\\_of\\_marine\\_litter.pdf](https://ec.europa.eu/environment/marine/good-environmental-status/descriptor-10/pdf/MSFD_identifying_sources_of_marine_litter.pdf)
- Vianello, A., Boldrin, A., Guerriero, P., Moschino, V., Rella, R., Sturaro, A., et Da Ros, L., Microplastic particles in sediments of Lagoon of Venice, Italy: First observations on occurrence, spatial patterns and identification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 130, p 54-61, **2013**<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.03.022>
- Viršek, K. M., Palatinus, A., Koren, Š., Peterlin, M., Horvat, P., et Kržan, A., Protocol for Microplastics Sampling on the Sea Surface and Sample Analysis, *Journal of Visualized Experiments*, (118), p 1-9, **2016**  
<https://doi.org/10.3791/55161>
- Wentworth, C. K., A scale of grade and class terms for clastics sediments, *Journal of Geology*, 30, p 377-392, **1922**
- Wickel, J., Jamon, A., Pinault, M., Durville, P., et Chabanet, P., Composition et structure des peuplements ichtyologiques marins de l'île de Mayotte (sud-ouest de l'océan Indien), *Cybium: Revue Internationale d'Ichtyologie*, 38(3), p 179-203, **2014**
- Whitmire, S. L., Van Bloem, S. J., et Toline, C. A., Quantification of Microplastics on National Park Beaches, *Rapport de la NOAA*, 1, p 1-28, **2017**
- Zubris, K. A. V., et Richards, B. K., Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environmental Pollution*, 138(2), p 201-211, **2005**  
<https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2005.04.013>

# ANNEXES

---

**Annexe 1 :** Récapitulatif des suivis déjà réalisés. Les cases vertes illustrent les suivis réalisés sur les sites non anthropisés. La case orange illustre la campagne réalisée sur les sites anthropisés et les sites non anthropisés. Les cases vides équivalent à une absence de suivi. NB : on entend par « suivi » : échantillonnage

Année	2017				2018				2019			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Campagne trimestrielle												
Macrodéchets												
Microplastiques dans les sédiments												
Microplastiques flottants												

**Annexe 2 :** Coordonnées des sites d'échantillonnage. NA : Non Anthropisés. À : Anthropisé  
« Début » et « Fin » correspondent au transect

Code du site	Site	Position	Lat	Long	Type
1	MTZ	M'Tzamboro début	S 12°38,552'	E 45°01,260'	NA
		M'Tzamboro fin	S 12°38,528'	E 45°01,312'	NA
2	HAND	Handrema début	S 12°40,502'	E 45° 06,955'	NA
		Handrema fin	S 12°40,477'	E 45°06,907'	NA
3	BAMBO	Bambo début	S 12°55,956'	E 45°11,881'	NA
		Bambo fin	S 12°55,979'	E 45°11,932'	NA
4	ISB	Ilot sable blanc	S 12°59,176'	E 45°12,912'	NA
5	SAZ	Saziley début	S 12°59,482'	E 45°10,654'	NA
		Saziley fin	S 12°59,429'	E 45°10,667'	NA
6	ILONI	Iloni début	S 12°50.805'	E 45°11.689'	A
		Iloni fin	S 12°50.859'	E 45°11.680'	A
7	BAD	Badamier début	S 12°45.914'	E 45°16.836'	A
		Badamier fin	S 12°45.869'	E 45°16.871'	A
8	SOH	Sohoa début	S 12°49.134'	E 45°06.366'	A
		Sohoa fin	S 12°49.079'	E 45°06.369'	A

**Annexe 3:** Caractéristiques des échantillonnages réalisés avec le robot « JellyFishBot » aux différents sites non anthropisés.

Largeur d'entrée du filet (m)	Aire d'entrée du filet (m <sup>2</sup> )	Aire de la moitié de l'entrée du filet (m <sup>2</sup> )	Site	Distance parcourue par le robot (m)	Volume traité par le filet (m <sup>3</sup> )
0,288	0,062	0,031	MTZ	1360,90	41,899
			HAND	1322,00	40,701
			BAMBO	758,99	23,367
			ISB	1202,57	37,024
			SAZ	1240,58	38,194

**Annexe 4 :** Effet des sites sur la quantité de MD retrouvés sur les plages non anthropisées. Tableau résumant la significativité des résultats du *test de Tukey HSD* faisant suite à une *Anova* ( $p\_value= 8.28e-10$ ). Les groupes partageant la même lettre ne montrent pas de différence significative d'après le *test post hoc de Tukey HSD* lorsque la  $p\_value > 0,05$ .

Site	MTZ	HAND	BAMBO	ISB	SAZ
Significativité	b	c	b	a	b

**Annexe 5 :** Différence des quantités des types de macrodéchets sur toutes les plages non anthropisées confondues. Tableau résumant la significativité des résultats *test de Dunn* faisant suite au *test de Kruskal Wallis* ( $p\_value < 2.2e-16$ ). Les groupes partageant la même lettre ne montrent pas de différence significative d'après le *test post hoc de Dunn* lorsque la  $p\_value > 0,05$

Type	Plastique	Caoutchouc	Textile	Papier	Bois	Métal	Divers
Significativité	d	a	bc	b	ab	c	a

**Annexe 6 :** Effet des sites sur la quantité de microplastiques retrouvés sur les plages non anthropisées. Tableau résumant la significativité des résultats du *test de Dunn* faisant suite au *test de Kruskal Wallis* ( $p\_value= 2,036e-07$ ). Les groupes partageant la même lettre ne montre pas de différence significative d'après le *test post hoc de Dunn* lorsque la  $p\_value > 0,05$

Site	MTZ	HAND	BAMBO	ISB	SAZ
Significativité	ac	bc	a	b	c

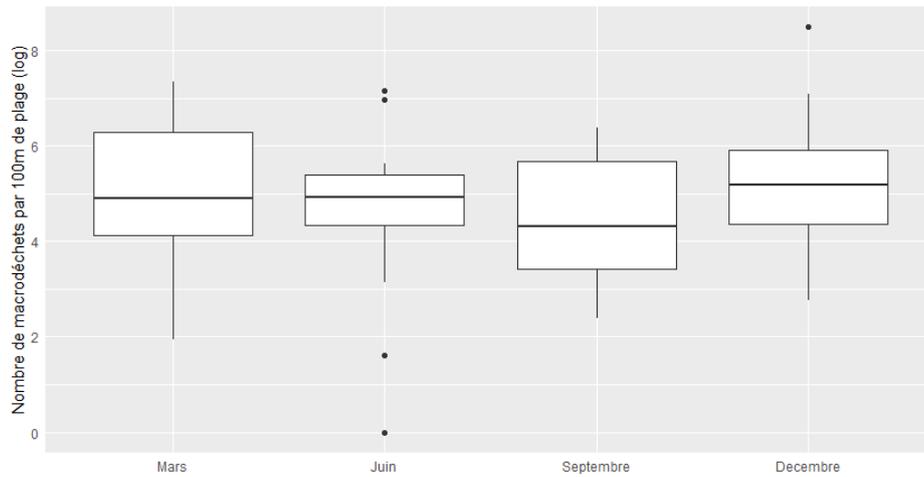
**Annexe 7 :** Différence de quantité de microplastiques selon le type de MP à chacun des sites non anthropisées. Tableau résumant la significativité des résultats *test de Dunn* faisant suite aux *tests de Kruskal Wallis* à chacun des sites ( $p\_value < 0,05$ ). Les groupes partageant la même lettre ne montre pas de différence significative d'après le *test post hoc de Dunn* lorsque la  $p\_value > 0,05$

	Fibres	Fragments	Films	Microbilles	Mousses	Autres
MTZ	b	c	ac	a	a	a
HAND	b	a	a	a	a	a
BAMBO	b	c	a	a	a	a
ISB	b	c	a	a	a	a
SAZ	b	c	a	a	a	a

**Annexe 8 :** Différence de quantité de microplastiques selon la position de prélèvement pour tous les sites non anthropisés confondues. Tableau résumant la significativité des résultats *test de Tukey HSD* faisant suite à l'*Anova* ( $p\_value= 0,026$ ). Les groupes partageant la même lettre ne montre pas de différence significative d'après le *test post hoc de Tukey HSD* lorsque la  $p\_value > 0,05$

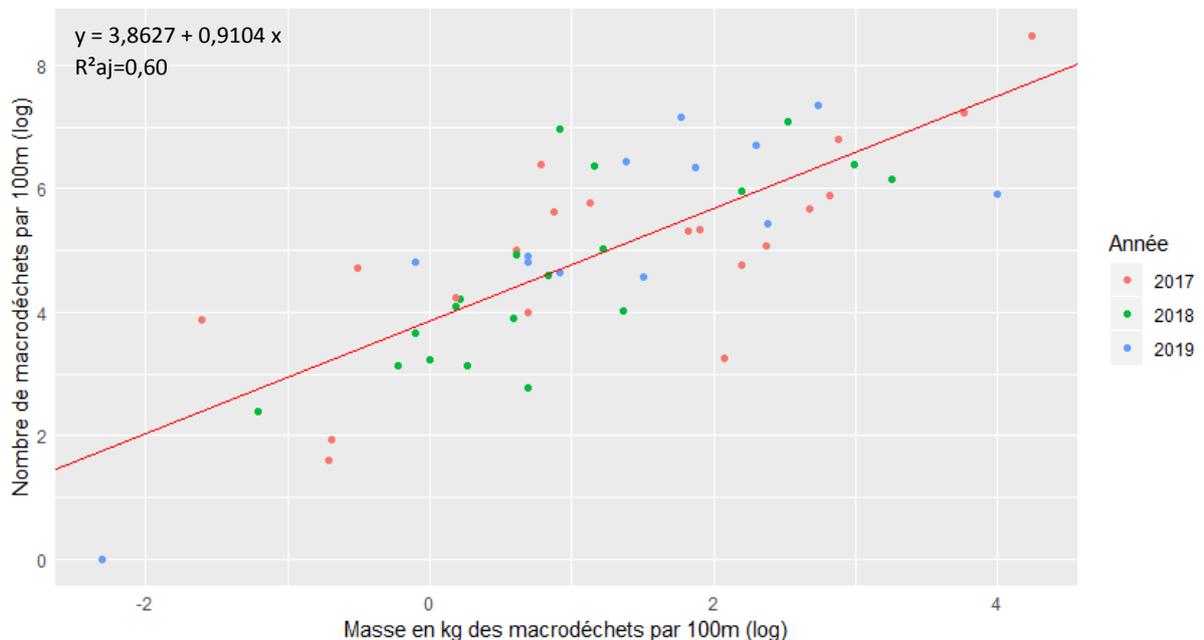
Position longueur plage	0m			50m			100m		
Position largeur plage	Bas	Milieu	Haut	Bas	Milieu	Haut	Bas	Milieu	Haut
Significativité	ab	a	ab	ab	ab	ab	ab	b	ab

**Annexe 9 :** Quantité totale de macrodéchets récoltés sur les plages non anthropisées confondus et pour tous les suivis réalisés à ce jour. L'Anova à un facteur a montré une  $p\_value=0,548$



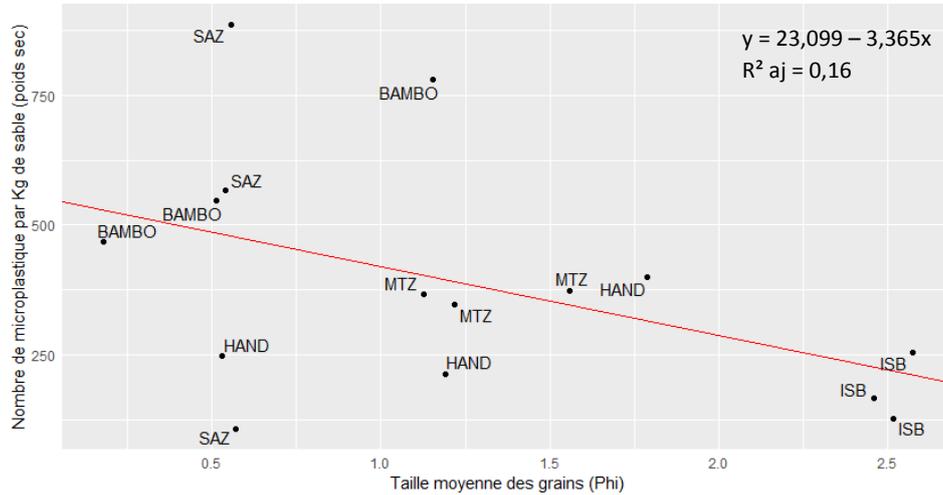
**Annexe 10 :** Quantité totale selon la masse totale des macrodéchets échoués sur les plages non anthropisées. La ligne rouge représente la courbe de régression linéaire entre le nombre (log) et le poids (log) des macrodéchets récoltés.

Le test de corrélation de Pearson ( $p\_value < 0,05$ ) montre que le nombre de déchets augmente proportionnellement avec le poids de déchets récoltés.



**Annexe 11.** Régression linéaire (en rouge) entre la concentration (nombre/kg de sable sec) et la taille moyenne des grains de sables des sédiments de plage aux différents sites échantillonnés.

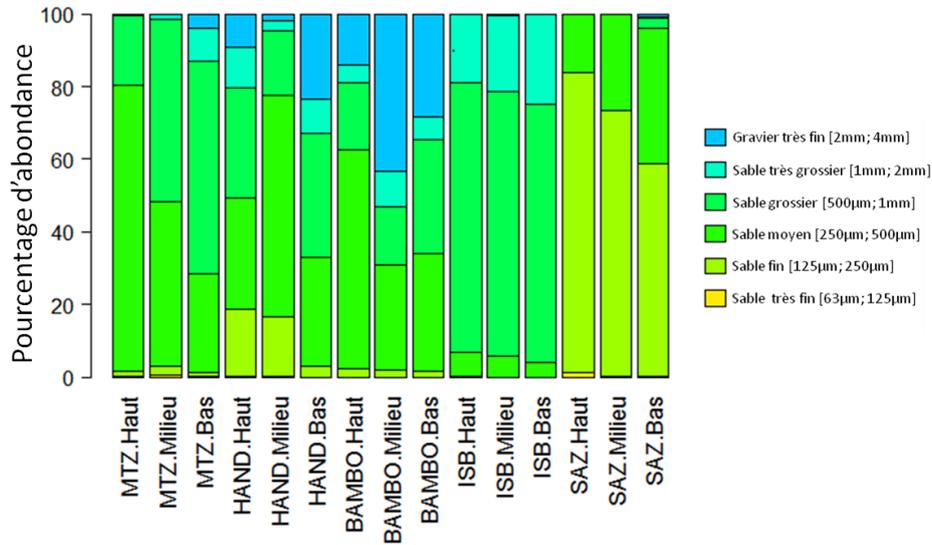
Le test de corrélation de Spearman ( $p\_value > 0,05$ ) entre le nombre de MP.kg-1 et la taille des grains n'a pas montré de relation significative entre la concentration en MP et la granulométrie des sables de plage.



**Annexe 12 :** Classification de Wentworth (1922). La classe des sables est indiquée en grisé.

Millimeters (mm)	Micrometers ( $\mu\text{m}$ )	Phi ( $\phi$ )	Wentworth size class
4096		-12.0	Boulder
256		-8.0	Cobble
64		-6.0	Pebble
4		-2.0	Granule
Gravel			
2.00		-1.0	Very coarse sand
1.00		0.0	Coarse sand
1/2	0.50	1.0	Medium sand
1/4	0.25	2.0	Fine sand
1/8	0.125	3.0	Very fine sand
1/16	0.0625	4.0	
Sand			
1/32	0.031	5.0	Coarse silt
1/64	0.0156	6.0	Medium silt
1/128	0.0078	7.0	Fine silt
1/256	0.0039	8.0	Very fine silt
Silt			
0.00006	0.06	14.0	Clay
Mud			

**Annexe 13 :** Proportion des différentes classes de taille des grains de sable des sites non anthropisés aux différentes positions (Bas, Milieu, Haut) selon la classification de Wentworth (1922)



**Annexe 14 :** Origine et éléments indicateurs potentiels de macrodéchets utilisés par le programme OSPAR de suivi des déchets de plage (Veiga *et al.*, 2016)

Source	Indicators
Fisheries, including aquaculture	Jerry cans. Fish boxes. Fishing line. Fishing weights. Rubber gloves. Floats/buoys. Ropes/cords/nets <50 cm, and >50 cm, respectively. Tangled nets/cords. Crab/lobster pots. Octopus pots. Oyster nets and mussel bags. Oyster trays. Plastic sheeting from mussel culture ("Tahitians").
Galley waste from shipping, fisheries and offshore activities ( <i>non-operational waste</i> )	Cartons/tetrapaks. Cleaner bottles. Spray cans. Metal food cans. Plastic gloves. Plastic crates.
Sanitary and sewage-related waste	Condoms. Cotton bud sticks. Sanitary towels/panty liners/backing strips. Tampons/Tampon applicators.
Shipping, including offshore activities ( <i>operational waste</i> )	Strapping bands. Industrial packaging. Hard hats. Wooden pallets. Oil drums (new and old). Light bulbs/tubes. Injection gun containers.
Tourism and Recreational activities	4-6-pack yokes. Plastic shopping bags. Plastic bottles/containers for drinks. Metal bottles/containers for drinks. Plastic food containers. Glass bottles. Crisp/sweets packets and lolly sticks.

**Annexe 15 :** Guide photo d'identification des types de microplastiques selon Sluka *et al.*, (2018)

<b>Films</b>		Fin, flexible, souvent transparents et légèrement colorés.
<b>Mousses</b>		Généralement blanc et spongieux, issus de polystyrène ou d'autres matériaux utilisés pour le transport
<b>Fragments:</b>		Durs et avec des bords nets. Ils sont issus de la dégradation de plastiques de plus grande taille.
<b>Microbilles (pastille)</b>		Issu directement de l'industrie et sont le matériel de base pour la création d'autres plastiques. Cylindriques, discaux, ou en forme de lentille. Ils sont principalement blancs ou transparents.
<b>Fibres</b>		Fin, filandreux et de la taille d'un cheveu. Les <i>fibres</i> sont issues pour la plupart de vêtements synthétiques.
<b>Autres</b>		

**Annexe 16 :** Catégories de macrodéchets utilisé par le PNMM selon le protocole OSPAR (2010)

MACRO DECHETS ECHOUES			
SITE			
Date / Heure			
Météo (vent, pluie, marée...)			
Remarques			
code	classe	type	Quantité
1	PLASTIQUES	sac de course	
2		reste de sac plastique	
3		petit sac plastique	
4		bouteille alimentaire < 0,5 L	
5		bouteille alimentaire > 0,5 L	
6		produit nettoyage (pot récipient bouteilles)	
7		pot / Tupperware	
8		bidon huile moteur < 0,5 L	
9		bidon huile moteur > 0,5 L	
10		jerrican	
11		autre bouteille / pot / bidon	
12		bageot	
13		pièce voiture	
14		couvercle / bouchons boisson	
15		couvercle / bouchons produit chimique	
16		autre couvercle / bouchons	
17		anneau de bouchon de bouteille	
18		briquet	
19		stylo / capuchon stylo	
20		peigne / brosse / lunettes soleil	
21		paquet bonbons / chips	
22		bâton sucette	
23		jouet / accessoire de fête	
24		gobelet / couvert	
25		paille / mélangeur	
26		sac phytosanitaires / sac alimentation animale	
27		sac légumes	
28		gants labo	
29		gants travail	

30	cordage Ø > 1 cm	
31	cordage Ø < 1 cm	
32	filets et cordages emmêlés	
33	filets < 50 cm	
34	filets > 50 cm	
35	ligne de pêche	
36	bâton lumineux	
37	flotteur de pêche	
38	bouée	
39	sceau	
40	élastique	
41	emballage	
42	fibre de verre	
43	casque	
44	chaussure / sandale / tong	
45	éponge	
46	polystyrène < 2,5 cm	
47	polystyrène 2,5 > < 5 cm	
48	polystyrène 5 > < 50 cm	
49	polystyrène > 50 cm	
50	plastique < 2,5 cm	
51	plastique 2,5 > < 5 cm	
52	plastique 5 > < 50 cm	
53	plastique > 50 cm	
54	mousse < 2,5 cm	
55	mousse 2,5 > < 5 cm	
56	mousse 5 > < 50 cm	
57	mousse > 50 cm	
58	filtre / mégot cigarette	
59	paquet tabac	
60	coton tige	
61	serviette féminine	
62	serviette rafraichissante	
63	tube / pot de pharmacie / médicaments	
64	autre accessoire médical (tampon / bandage)	
65	crème solaire	
66	pot / bouteille cosmétique	
67	garde-boue	
68	cône signalisation	
69	CD / boîte de CD	
70	palme / masque / tuba plongée	
71	ruban adhésif	
72	morceau téléphone	
73	pot de fleur	
74	couche	

75	<b>CAOUTCHOUC</b>	ballon	
76		botte	
77		pneu / courroie	
78		autre caoutchouc	
79		préservatif et emballage	
80		boule	
81		tube et bâche	
82		roue	
83		élastique	
84		bobino	
85	<b>TEXTILES</b>	vêtement / chapeau / serviette	
86		tapis et accessoire	
87		sac en toile de jute	
88		chaussure / sandale	
89		autre et chiffon	
90		sac à dos	
91		lanière / corde / sangle	
92		canevas	
93	<b>PAPERS</b>	sac	
94		boite et fragment	
95		brique de lait	
96		brique (autre)	
97		paquet cigarettes	
98		gobelet / emballages / plateau	
99		magazine	
100		divers papier carton	
101		tube artifice	
102	<b>BOIS</b>	bouchon liège	
103		palette ou morceau	
104		bois traité / travaillé < 50 cm	
105		bois traité / travaillé > 50 cm	
106		cakeot	
107		bâton glace / couverts / baguette / cure dent	
108		pinceau	
109		allumette	
110		tableau	
111		charbon	
112		poutre / calle	
113	<b>METAL</b>	aérosol spray	
114		bouchon / languette	
115		canette	
116		électroménager	
117		matériel pêche	
118		papier aluminium	
119		boite conserve	

120		boite conserve gros volume	
121		bidon	
122		pot peinture	
123		câble / barbelés / fil de fer / grillage	
124		gros câble	
125		bout de métal < 50 cm	
126		bout de métal > 50 cm	
127		BBQ jetable	
128		vaisselle / couvert	
129		récipient	
130		bouteille gaz	
131		batterie / pièce voiture	
132	<b>VERRE</b>	bouteille et morceaux	
133		ampoule	
134		autre verre	
135		autre céramique	
136		vaisselle (assiettes et verres)	
137	<b>DIVERS</b>	aiguille / seringue	
138		cire / paraffine	
139		huile / goudron	
140		restes de nourriture	
141		autre : ...	

**Annexe 17 : Liste non exhaustive de protocole d'échantillonnage des macrodéchets dans la matrice « plage » proposée dans divers guides et articles**

Code	Matrice	Protocole / Guide	Méthode principale	Technique / Equipement	Expertise nécessaire	Coût	Unités	Transect	Distance éch.	Niveau de détail	Fréquence	Application géographique	Limites	Avantages	Discussion	Matériel	Source
10.1.1	Plage	OSPAR (Protecting and Conserving the North-East Atlantic and its resources) + MSFD	Visuel/ collecte déchets	FAIBLE	FAIBLE	F/M	items/km <sup>2</sup> (kg/km <sup>2</sup> ) (m3/Km <sup>3</sup> )	1 à 3	100m 1000m De la limite basse de la plage à la limite haute.	>5mm >50cm	4 fois/ an	REGIONAL mais applicable globalement Créé pour plages du Nord-Est Atlantique mais applicable partout dans le monde à condition d'avoir du sable et une distance de plage suffisante	On ne peut pas réaliser de réplicats à Mayotte car plages trop courtes, manque de temps (5 plages * 3 = 15 échantillonnages sur 100m). Les calculs de Volumes ne sont pas forcément représentatifs car les déchets peuvent être dégradés pour la plupart. La comparaison par masse n'est pas un bon outil car le poids peut être influencé par la dégradation, le poids humide, le sable et les particules accrochés aux déchets. De plus tous les déchets ne peuvent être pesés car parfois trop gros.	Rapide, peu coûteux,	Des transects de 50m peuvent être envisagés afin d'avoir des réplicats. Problème : Le protocole n'est plus standard par rapport aux autres études qui utilisent des transects de 100m.	Gants; Sacs poubelles; GPS; décamètre	OSPAR (2010); Directive, S. F. (2013). Guidance on Monitoring of Marine Litter in European Seas. <a href="http://mcc.jrc.ec.europa.eu/documents/201702074014.pdf">http://mcc.jrc.ec.europa.eu/documents/201702074014.pdf</a>
		UNEP-IOC/ NOWPAP beach (Northwest Pacific Action Plan beach litter survey)	Visuel/ collecte déchets	FAIBLE	FAIBLE	F/M	items/km <sup>2</sup> (kg/km <sup>2</sup> ) (m3/Km <sup>3</sup> )	1	100m minimum mais peut aller jusqu'à 1km si peu de déchets. De la limite basse de la plage à la limite haute (végétation)	>2.5cm	mini 1 fois/an sinon 4 fois/an	GLOBAL Il faut avoir des plages urbaines (Apports principalement terrestres) et des plages rurales (apports principalement marin). De préférence à proximité des principaux apports fluviaux.					<a href="https://www.nrc.govt.nz/media/10448/uneplolitemonitoringguidelines.pdf">https://www.nrc.govt.nz/media/10448/uneplolitemonitoringguidelines.pdf</a>
		NMDMP (National Marine Debris Monitoring Program)	Visuel/ collecte déchets	FAIBLE	FAIBLE	F/M	items/km <sup>2</sup> (kg/km <sup>2</sup> ) (m3/Km <sup>3</sup> )	1 transect. Peut soit être fait parallèlement à la mer soit avec plusieurs aller-retour en largeur de la plage	500m (angle de 15 à 45°)	>2.5cm	1 fois/ mois	GLOBAL Il faut avoir des plages urbaines (Apports principalement terrestres) et des plages rurales (apports principalement marin). De préférence à proximité des principaux apports fluviaux.	500m risque d'être trop long pour certaines plages de Mayotte. Le taux d'erreur accepté est de 20%.	Rapide, peu coûteux,	Protocole utilisé à l'échelle globale (Canada, Afrique du Sud, ...)	Gants; Sacs poubelles; GPS; décamètre	US Environment Protection Agency 2002, Sheavly 2007
		WIOMSA (Western Indian Ocean Marine Science Association)	Visuel/ collecte déchets	FAIBLE	FAIBLE	F/M	kg/km <sup>2</sup> mps items/km/ temps	1	100m ou plus	>2.5cm	Etude journalière pour étudier les flux de déchets	Applicable partout. Il faut avoir des plages urbaines (Apports principalement terrestres) et des plages rurales (apports principalement marin). De préférence à proximité des principaux apports fluviaux.	Ne peut pas constituer un suivi annuel	Utile pour un suivi de flux journalier des déchets.	Avant d'évaluer les flux de déchets, il est important d'enlever tous les déchets avant une étude journalière.	Gants; Sacs poubelles; GPS; décamètre	<a href="https://www.wiomsa.org/wp-content/uploads/2018/09/IGuide-on-Marine-Litter-FINAL.pdf">https://www.wiomsa.org/wp-content/uploads/2018/09/IGuide-on-Marine-Litter-FINAL.pdf</a>
		NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)	Visuel/ collecte déchets	FAIBLE	FAIBLE	F/M	items/km <sup>2</sup>	4 transects par site. Les transects se font en largeur de la plage sur 100m de long. 1. 0-5m; 2. 45-50m; 3. 50-55m; 4. 95-100m avec une largeur de 5m	100m	>2.5cm	Non spécifié	GLOBAL Le choix de la plage est important.	Rare sont les protocoles qui réalisent des transects en largeur. Il est donc difficile d'évaluer avec d'autres études les données.	Rapide, peu coûteux,	Protocole internationale.	Gants; Sacs poubelles; GPS; décamètre	Opfer, S., Arthur, C., & Lippiatt, S. (2012). NOAA marine debris shoreline survey field guide. <a href="https://marine.debris.noaa.gov/research/marine-debris-monitoring-and-assessment-project">https://marine.debris.noaa.gov/research/marine-debris-monitoring-and-assessment-project</a>

**Annexe 18 :** Liste non exhaustive de protocoles d'échantillonnage des macrodéchets dans la matrice « fond marin » proposée par divers guides et articles

Code	Matrice	Protocole/ Guide	Méthode principale	Technique/ Equipement	Expertise nécessaire	Coût	Unités	Transect	Distance éch.	Niveau de détail	Fréquen ce	Application géographique	Limites	Avantages	Discussion	Matériel	Source
10.1.2	Fonds marins	UNEP-IOC/ NOWPAP – beach (Northwest Pacific Action Plan – beach litter survey)	Chalut	MOYEN- HAUT	MOYEN	MIH	Items/ km²	3 zones d'1km² sélectionné s aléatoireme nt dans une zone de 25km².	Des transects parallèles face au courant de 800m x 5 dans une aire à 3-4 nœuds. Les transects doivent être éloignés de 200m	>2.5cm	1 fois/ an	GLOBAL à condition que la navigation soit possible et qu'il n'y ait pas trop de débris flottants	Prendre garde des obstacles benthiques (ex. coraux, roches, bancs de sable). Ces zones doivent être délimités dans celle de 25km² et choisir des aires d'1km² non obstrués. De plus, le chalut a de grands risques de détruire les fonds marins du lagon. Coûteux en équipement et difficile à mettre en place au parc et dans le lagon de Mayotte.	Permet d'avoir une estimation fiable du nombre de déchet par km ou km² parcourus.	Un nouveau suivi doit être conduit pour réaliser ce type d'échantillonn age.	Filet de chalut (2 cm maille/ 2-4m large/ 20m long), bateau, rouleaux latéraux pour tirer le filet	<a href="https://www.nrc.govt.nz/media/10448/unepoclitlittermonitoringguidelines.pdf">https://www.nrc.govt.nz/media/10448/unepoclitlittermonitoringguidelines.pdf</a>
			Plongée (visuelle ou collecte)	MOYEN- HAUT	HAUT	F/M	Items/ km	1 à 2 transects 20 sites par région	50 (si plus d'un transect) à 100m avec 2m de chaque côté.	> 1mm (ex. Fil de pêche)	1 fois/ an sinon 4 fois/an	GLOBAL à condition de choisir les mêmes types de tombants (prof.) et de milieu	Si mauvaise visibilité ou courantométrie trop important, l'échantillonnage peut être compromis. Risque de ne pas voir certains objets.	Ne détruit pas l'environnement benthique comme un chalut. Permet un tri visuel direct et ramasse les petits objets. La délimitation des transects est plus précise et ces derniers peuvent être réalisés sur de plus petites distances.	Semble être le type de suivi le plus adapté aux conditions environnement ales de Mayotte.	Bateau; Matériel de plongée; gants; sacs filets	
		MDNHI (Marine debris in the Northwest Hawaiian Islands)	Visuel avec traîné Manta	MOYEN- HAUT	HAUT	MIH	Items/ km	Des transects en bateau sont réalisés avec plongeurs traînés derrière.	Temps et distance non spécifiée. Echantillonnag e sur tout le platier de l'atoll.	> 1mm (ex. Fil de pêche)	Non spécifié	REGIONAL (uniquement zones peu profondes) particulière ment utile dans les récifs coralliens à moyenne profondeur.	Suivi rapide qui peut rendre l'observation compliquée. Peu appliqué dans le monde. Suivi réalisé uniquement sur les filets de pêche.	Peu coûteux, rapide.	Utilisation d'un remorquage manta (manta tow)	Bateau; corde d'accroch e; PMT	Donohue, M. J., Boland, R. C., Sramek, C. M., & Antonellis, G. A. (2001). Derelict fishing gear in the Northwestern Hawaiian Islands: diving surveys and debris removal in 1999 confirm threat to coral reef ecosystems. Marine pollution bulletin, 42(12), 1301-1312.  Timmers, M. A., Kistner, C. A., & Donohue, M. J. (2005). Marine debris of the Northwestern Hawaiian Islands: ghost net identification. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Sea Grant College Program.

## Annexe 19 : Liste non exhaustive de protocoles d'échantillonnage des macrodéchets dans la matrice « surface de l'eau » proposée par divers guides et articles

Ind.	Matrice	Protocole/ Guide	Méthode principale	Technique / Équipement	Expertise nécessaire	Coût	Unités	Transect	Distance éch.	Niveau de détail	Fréquence	Application géographique	Limites	Avantages	Discussion	Matériel	Source
10.1.2	Eau de surface	UNEP-IOC/ NOWPAP – beach (Northwest Pacific Action Plan – beach litter survey)	chalut/ collecte	MOYEN- HAUT	MOYEN	M/H	Items/ km <sup>2</sup>	3 zones d'1km <sup>2</sup> sélectionnés aléatoirement dans une zone de 25km <sup>2</sup> .	Des transects parallèles face au courant de 800m <sup>2</sup> dans une aire à 3-4 nœuds. Les transects doivent être éloignés de 200m	>2.5cm	Au moins 1 fois/ an sinon 4 fois/ an	GLOBAL à condition que la navigation soit possible et qu'il n'y ait pas trop de débris flottants	La répartition des déchets est non homogène dans le temps et l'espace. Prendre garde aux obstacles (ex. coraux, roches, bancs de sable). Ces zones doivent être déliimitées dans celle de 25km <sup>2</sup> et choisir des aires d'1km <sup>2</sup> non obstrués. Le chalut doit rester en surface afin de ne pas s'accrocher dans des fonds peu profonds. Coûteux en équipement et difficile à mettre en place au parc et dans le lagon de Mayotte.	Permet d'avoir une estimation fiable du nombre de déchet par km ou km <sup>2</sup> parcourus.	Un nouveau suivi doit être conduit pour réaliser ce type d'échantillonnage.	Chalut flottant de 2-4cm de maille/ 6m de large Rouleaux latéraux pour tirer le filet	Shimoto and Kameda (2005)  <a href="https://www.nrc.gov/tncz/media/10448/unepiocollittermonitoringguidelines.pdf">https://www.nrc.gov/tncz/media/10448/unepiocollittermonitoringguidelines.pdf</a>
		UNEP-IOC/ NOWPAP – beach (Northwest Pacific Action Plan – beach litter survey)	Observation par bateau/ Pas de collecte	FAIBLE	FAIBLE	F	Items/ km <sup>2</sup>	Le transect n'a pas besoin d'être droit. Localisation début et fin doivent être donnés. 20 échantillon nage	Important de donner un temps d'observation (*2h) et une vitesse (mieux qu'une distance). Distance d'1km minimum et 50 à 100m de largeur	> 10cm à >50cm	Au moins 4 fois/ an sinon à chaque mission en bateau	GLOBAL Se concentrer sur les zones connues pour accumuler des déchets. Choisir des côtes urbaines, rurales, proches d'apports de rivières.	Les distances d'observations sont relativement subjectives et peuvent varier selon l'observateur. La classification des objets observés est très compliquée.	Peut être appliqué à tous types de mission en bateau. Il suffit d'un observateur et d'un pilote afin d'évaluer le nombre de déchet. Peu coûteux et ne nécessite pas de matériel en particulier.	Semble être le type de suivi le plus adapté aux conditions environnementales de Mayotte. Le temps d'observation peut être largement diminué dans le cas de Mayotte car les principales missions sont réalisées au sein du lagon.	Bateau	Ribic et al. (1992)  <a href="https://www.nrc.gov/tncz/media/10448/unepiocollittermonitoringguidelines.pdf">https://www.nrc.gov/tncz/media/10448/unepiocollittermonitoringguidelines.pdf</a>
		Ifremer (programmes SAMM, ACCOBAMS, SCANS)	Observation aérienne/ Pas de collecte	HAUT	HAUT	H	Items/ transect	Transects en lignes ou réalisés en zig- zag.	>10km 90 nœuds en avion (167km/h) à 600 pieds (183m de hauteur)	>50cm	Non précisé	GLOBAL Grandes surfaces couvertes	Gros déchets et amas, exclusivement. Coûts importants.	Appliqué à l'Ifremer pour indicateur. Bancarisation possible. Méthode utilisée en parallèle de la surveillance de la méga-faune marine (mammifères, oiseaux, tortues, poissons, raies et requins)	Nécessaire d'avoir une personne formée au pilotage de drone car les suivis aériens par avions ne peuvent pas être envisagés à Mayotte. Les surfaces couvertes seraient donc très largement inférieures à ce que ce type de méthode préconise.	Bateau; Drone; Caméra; Logiciel de traitement d'image	Rapport SAMM 2012 : <a href="http://ftp.aamp.aire-marines.fr/IFACOM/MPVolet1_SAMM/Rapport4_Campagne_SAMM_ete13_CRRMM.pdf">http://ftp.aamp.aire-marines.fr/IFACOM/MPVolet1_SAMM/Rapport4_Campagne_SAMM_ete13_CRRMM.pdf</a>

**Annexe 20 :** Liste non exhaustive d'échantillonnage des microplastiques dans la matrice « plage » proposée par divers guides et articles. Cette liste ne présente pas les différents types de séparation des microplastiques ni les techniques d'identification chimiques

Code	Matrice	Protocole/ Guide	Méthode principale	Technique / Equipement	Expertise nécessaire	Coût	Unités	Transect	Distance éch.	Niveau de détail	Fréquence	Application géographique	Limites	Avantages	Discussion	Matériel	Source
10.1.3	Plage	WIOMSA (Western Indian Ocean Marine Science Association)	Collecte/ Séparation	FAIBLE	FAIBLE	F/M	items/m <sup>2</sup>	Quadrats : 3 répliqués à chaque site séparés de 5m mini chacun. Quadrat de 50cm*50cm + 5cm(prof.)	Non précisé	<5mm et taille minimum peut varier selon largeur des mailles du tamis	Non précisé		La taille des échantillon est importante. Une réduction par tamisage est recommandé pour le transport.	Facile à mettre en œuvre et des comparaisons sont possibles avec d'autres études utilisant ce protocole.	Séparation par densité avec eau saturée en NaCl (Hanke et al. 2013). 2min de mélange + 2min d'attente. Filtration 5 fois.	NaCl; Tamis; boîtes de pétri; cuillère en métal; filtre papier	Hanke et al. (2013)/ Coppock et al. (2017) <a href="https://www.wiomsa.org/wp-content/uploads/2018/09/Guide-on-Marine-Litter-FINAL.pdf">https://www.wiomsa.org/wp-content/uploads/2018/09/Guide-on-Marine-Litter-FINAL.pdf</a>
		Echantillon/ Séparation densité/ Filtre/ Observation	Collecte/ Séparation	FAIBLE	FAIBLE	F/M	items/m <sup>2</sup> Items/m <sup>3</sup> items/m items/kg de sédiment g/m <sup>2</sup> g/m <sup>3</sup> g/g de sédiment	Quadrats : 10cm <sup>2</sup> à 5m <sup>2</sup> avec une profondeur de 5cm généralement.  Si carottage en profondeurs : 0-20cm; 20-40cm; 40;60cm	Non précisé	1-500µm (filtration)  500µm-5mm (tamisage)	Non précisé	GLOBAL à condition d'avoir des plages de sable	Selon la taille de l'échantillon, une réduction avant transport par tamisage peut être recommandé.	Facile à mettre en œuvre et peu coûteux.	Il est important de standardiser les protocoles afin de pouvoir réaliser des comparaisons entre études.  Une étape supplémentaire peut être ajoutée: La réduction de la matière organique par le peroxyde d'hydrogène (H2O2).	NaCl; H2O2 (si réduction matière organique); boîtes de pétri; tamis; filtres; cloche de filtration; loupe binoculaire (avec règle oculaire); balance de précision; Etuve; cullère en métal; bocaux en verre (transport); Spéctrophotomètre (si analyse chimique)	Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. Environmental science & technology, 46(6), 3060-3075.
		Echantillon/ Séparation densité/ Observation															
		Echantillon/ Séparation densité/ Tamis/ Observation															
		Echantillon/ Tamis/ Observation															
		Echantillon/ Tamis/ Séparation Densité/ Observation															
Tamis/ Echantillon/ Observation																	

**Annexe 21 :** Liste non exhaustive d'échantillonnage des microplastiques dans la matrice « surface de l'eau » proposée par divers guides et articles. Cette liste ne présente pas les différents types de séparation des microplastiques ni les techniques d'identification chimiques.

Code	Matrice	Protocole/ Guide	Méthode principale	Technique / Equipement	Expertise nécessaire	Coût	Unités	Transect	Distance éch.	Niveau de détail	Fréquence	Application géographique	Limites	Avantages	Discussion	Matériel	Source
10.1.3	Eau de surface / plage	WIOMSA (Western Indian Ocean Marine Science Association)	Collecte/ Séparation	FAIBLE	FAIBLE	F/M	items/m <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup>	Des seaux de 10L doivent prendre des échantillons d'eau à l'endroit où les vagues sont cassées afin de récupérer un	Non précisé	<5mm et taille minimum peut varier selon largeur des mailles du tamis	tous les jours pendant 7 jours	Partout. Cependant, les conditions environnementales et de houles ne sont pas les mêmes partout. La comparaison avec des études utilisant le même protocole	L'échantillonnage est très stochastique si l'on souhaite évaluer le nombre d'items par L.	Facile à mettre en œuvre	Non recommandé pour un suivi à Mayotte.	Seaux de 10L; Tamis de maille variable; Loupe binoculaire; Ethanol 70%	<a href="https://www.wiomsa.org/wp-content/uploads/2018/09/Guide-on-Marine-Litter-FINAL.pdf">https://www.wiomsa.org/wp-content/uploads/2018/09/Guide-on-Marine-Litter-FINAL.pdf</a>
	Eau de surface	Filet Manta + Tamis + Loupe bino	Collecte/ Séparation	MOYEN	MOYEN	M/H	Items/km <sup>2</sup> Items/m <sup>3</sup> g/km <sup>2</sup>	1 transect	30min d'échantillonnage à une vitesse de 2 nœuds (~2km)	330µm<taille<5mm	4 fois/an	Partout mais il faut prendre garde aux conditions environnementales.	Particules lourdes (PVC) non pris en compte. Répartition non homogène. Dépend de la houle. Les objets trop gros peuvent endommager le filet.	On peut utiliser un filet plancton que l'on équipe de bouées. On peut échantillonner ou réaliser un suivi visuel des macrodéchets flottants en même temps.	Recommandé pour Mayotte. Cependant, la technique de séparation et de tri des microplastiques doivent être adaptés. Une analyse FT-IR spectroscopie est réalisée dans plusieurs études pour analyse chimique des plastiques. Dans le cas du PNMM, l'intérêt est davantage de créer un indicateur de quantité.	Tamis (330µm et 1mm de maille); Ethanol 70%; Loupe binoculaire; Filet manta (ou plancton) de 330µm de maille; Eau distillée; Appareil de spectrophotomètre	Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. <i>Environmental science &amp; technology</i> , 46(6), 3060-3075. Viršek, M. K., Palatinus, A., Koren, Š., Peterlin, M., Horvat, P., & Klan, A. (2016). Protocol for microplastics sampling on the sea surface and sample analysis. <i>Journal of Visualized Experiments: JoVE</i> , (118). <a href="https://www.jove.com/video/55161/protocole-pour-microplastiques-echantillonnage-sur-la-surface-de-">https://www.jove.com/video/55161/protocole-pour-microplastiques-echantillonnage-sur-la-surface-de-</a>
		Filet Manta + Filtration + Loupe bino	Collecte/ Séparation	MOYEN	MOYEN	M/H	Items/km <sup>2</sup> Items/m <sup>3</sup>	1 transect	Non précisé	>2µm	Non précisé	Si trop de houle, le filet manta risque de ne pas être adapté.	Si échantillonnage face à une plage, prendre garde à avoir une distance suffisante.	Une analyse FT-IR spectroscopie est réalisée dans plusieurs études pour analyse chimique des plastiques. Dans le cas du PNMM, l'intérêt est davantage de créer un indicateur de quantité.	Tamis (330µm et 1mm de maille); Ethanol 70%; Loupe binoculaire; Filet manta (ou plancton) de 330µm de maille; Eau distillée; Appareil de spectrophotomètre	Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. <i>Environmental science &amp; technology</i> , 46(6), 3060-3075. Viršek, M. K., Palatinus, A., Koren, Š., Peterlin, M., Horvat, P., & Klan, A. (2016). Protocol for microplastics sampling on the sea surface and sample analysis. <i>Journal of Visualized Experiments: JoVE</i> , (118).	
		Filet Manta + Loupe Bino	Collecte	MOYEN	MOYEN	M/H	Items/km <sup>2</sup>	1 transect	Non précisé	>0 µm Taille varie selon observateur	Non précisé	Non précisé	Le temps d'échantillonnage est relativement long.				

## Remerciements

---

La réalisation de ce mémoire a été rendue possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner ici toute ma reconnaissance.

En premier lieu je tiens à remercier chaleureusement tout particulièrement Clément Lelabousse, mon maître de stage, et Naomi Scholten pour m’ avoir suivi et soutenu tout au long de ce stage. Je leur témoigne ici toute ma gratitude pour leur encadrement, leurs conseils et recommandations, mais aussi pour leur patience.

Mais ce travail n’ aurait pu être aussi abouti et structuré sans les recommandations et les exigences attentionnées de ma directrice de mémoire, Madame Delphine Bonnet, qui a pris de son précieux temps pour analyser et corriger dans le détail mon rapport d’ étape, puis toujours répondre longuement et patiemment à mes questionnements, me permettant ainsi de lever mes doutes et de mieux orienter mes analyses. Qu’ elle en soit ici chaleureusement remerciée.

L’ enseignement de qualité dispensé par le Master BAEMT a également su nourrir mes réflexions et a représenté une profonde satisfaction intellectuelle, merci à tous les enseignants-chercheurs.

De même, je tenais à remercier Paul qui m’ a permis d’ élargir mes horizons de pensées durant ce stage. Merci de m’ avoir fourni des commentaires et réflexions toujours pertinentes, et ce, avec une bonne humeur constante.

À l’ origine de cette expérience formidable passée au Parc naturel marin de Mayotte, il y a eu Laure, qui par le biais d’ une rencontre fortuite m’ a donné les contacts au sein du Parc, me permettant ainsi de réaliser ce projet. Je n’ oublierai pas ce que je lui dois. Merci !

Grand merci à Marc-Henri pour son accueil amical et l’ hébergement offert à mon arrivée à Mayotte, me permettant de réaliser mes premiers pas sur ce territoire inconnu dans une sympathique ambiance.

Également merci à Danièle, sans qui, ce stage aurait été bien plus compliqué que prévu. Merci d’ avoir toujours répondu à mes questions et à mes doutes avec une efficacité toujours au rendez-vous.

Merci à Yann pour son aide très appréciée. Merci à l’ équipe du Pôle Opération du Parc sans qui les phases de terrain auraient été impossibles.

Merci à Lola, qui m’ a soutenu avec ses plats délicieux et une bonne humeur toujours au rendez-vous. Merci à Audrey, Nicolas, Naomi, Lola, Quentin et Julien avec qui la colocation a pu se dérouler dans la meilleure ambiance.

Enfin merci aussi aux stagiaires en Master du Centre universitaire de Mayotte pour les échanges, les anecdotes diverses et la bonne humeur qui a régné durant les phases de travail.

Merci également à toute l’ équipe du Parc marin qui m’ a permis de découvrir un nouveau monde passionnant tant sur le plan professionnel que sur le plan relationnel.

À tous et à ceux que je n’ ai pu citer, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

## RÉSUMÉ

---

Cette étude présente les résultats de trois types d'opérations qui doivent renforcer le développement de l'Observatoire des déchets marins mis en place depuis 2017 par le Parc naturel marin de Mayotte (PNMM) sous l'égide de l'Agence française pour la biodiversité. Il s'est agi de : (i) réaliser une nouvelle campagne d'échantillonnage des macrodéchets (MD) en utilisant le protocole macrodéchets (OSPAR, 2010) retenu par le PNMM et d'évaluer leur évolution (ii) réaliser un inventaire des méthodes d'échantillonnage des déchets marins et de tester leur applicabilité dans le contexte insulaire tropical et surpeuplé de Mayotte (iii) proposer et valider de nouveaux protocoles reproductibles de suivi des microplastiques (MP) présents dans les sédiments de plage et dans les eaux de surface du lagon.

L'analyse des MD >5mm sur cinq plages non anthropisées et trois plages anthropisées, confirme la tendance mondiale de la large prédominance des plastiques parmi les MD (de 55% sur un site anthropisé où coexistent d'autres déchets, à 96,2% sur un site non anthropisé où ils sont principalement apportés par flottaison). Sur site non anthropisé les valeurs moyennes sont de  $387,16 \pm 749,86$  MD/100m. Aucune variation significative interannuelle ou intersaisonnière des volumes de macrodéchets n'est toutefois observable. L'étude des microplastiques montre qu'ils sont présents partout sur terre et en mer avec des valeurs comprises entre  $172,3 \pm 119,7$ MP/kg et  $533,4 \pm 261,32$  MP/kg. Les types fibreux prédominent dans les sédiments de plage (90 à 95,8%) et à la surface de l'eau (28,2 à 60%) par rapport aux fragments, puis aux autres types.

La faisabilité, la reproductibilité et la pertinence des protocoles MP ont été validées et confrontées à d'autres études dans le monde et des recommandations d'amélioration et de développement des protocoles sont proposées pour de futurs suivis.

*Mots clés : Macrodéchets – Microplastiques – Protocoles – Observatoire des déchets marins – Parc naturel marin de Mayotte*

## ABSTRACT

---

This study presents the results of three types of operations that should reinforce the development of the Marine Litter Observatory set up since 2017 by the Mayotte Marine Nature Park (MMFN) under the aegis of the French Agency for Biodiversity. These were: (i) to carry out a new macro-litter (MD) sampling campaign using the macro-litter protocol (OSPAR, 2010) selected by the MMFN and to evaluate their evolution (ii) to carry out an inventory of methods marine litter sampling and testing their applicability in the tropical and overpopulated island context of Mayotte (iii) propose and validate new reproducible monitoring protocols for microplastics (PM) present in beach sediments and in surface water lagoon.

The analysis of MD > 5mm on five non-anthropized beaches and three anthropized beaches confirms the global trend of the large predominance of plastics among MDs (from 55% on an anthropised site where other waste coexists, to 96.2% on a non-anthropised site where they are mainly brought by the sea). On non-anthropized site the average values are  $387.16 \pm 749.86$  MD / 100m. No significant interannual or interseasonal variation in macro-litter volumes is noticeable. The study of microplastics reveals that they are everywhere on land and in the sea with values between  $172.3 \pm 119.7$ MP / kg and  $533.4 \pm 261.32$  MP / kg. Fibrous types predominate in beach sediments (90 to 95.8%) and water surface (28.2 to 60%) compared to fragments and then to other types.

The feasibility, reproducibility and relevance of MP protocols have been validated and compared to other studies worldwide and recommendations for improvement and protocol development are proposed for the future follow-up.

*Key words: Macrolitter - Microplastics - Protocols - Marine Litter Observatory - Mayotte Marine Nature Park*