

Mémoire

Auteur : Garcia Garcia, Romain

Promoteur(s) : Gobert, Sylvie

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en océanographie, à finalité approfondie

Année académique : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16055>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Évaluation de la possibilité d'utilisation des holothuries de la baie de Calvi comme bio-indicateur de la pollution plastique et vérification de la suffisance de la taille de la station d'épuration de la ville de Calvi



Mémoire de fin d'étude présenté en vue de l'obtention du grade de master en océanographie, à finalité approfondie

Promoteur et lecteurs :

Dr. GOBERT Sylvie (promotrice)

Dr. ALVERA AZCARATE Aida
(lectrice)

Dr. DAS Krishna (lectrice)

Dr. ROBERTY Stéphane (lecteur)

Année Académique

2021 - 2022

Écrit par :

GARCIA GARCIA Romain

Table des matières

Introduction	1
1. La pollution plastique en Méditerranée	1
1.1. Les plastiques : définition et généralités	1
1.2. Ingestion de plastiques et risques pour les organismes	5
2. Les Holothuries	7
2.1. Classification et description générale	7
2.2. Écologie	11
2.3. <i>Holothuria tubulosa</i> et <i>Holothuria poli</i>	11
3. Objectif du mémoire	12
Matériel et méthode	14
1. Zone et stratégie d'échantillonnage	14
2. Dissection des holothuries	15
3. Extraction des plastiques	16
4. Statistiques	18
Résultats	20
1. Période touristique	20
1.1. Influence du site de récolte sur le nombre de particules plastiques	20
1.2. Influence du site de récolte sur la longueur des filaments et des fragments plastiques	21
1.3. Influence du site de récolte sur les populations de plastiques en fonction de leur nature	22
1. Comparaison entre la période touristique et la période creuse	24
2.1. Influence de la période sur le nombre d'items plastiques	24
2.2. Influence de la période sur la longueur des éléments plastiques	25
2.3. Influence de la période sur la composition des populations de plastiques	26
Discussion	27
1. Utilisation des holothuries comme bio-indicateurs de la pollution plastique	27
2. Comparaison des trois sites entre eux	29
2.1. Quantités de plastiques entre les sites et entre les deux périodes	29
2.2. Composition en plastiques en fonction de leurs natures	32
3. Améliorations possibles et ouverture pour de futures recherches	35
Conclusion	37
Remerciements	vi
Table des abréviations	vii

Annexes	viii
Bibliographie	xi
Table des figures	xix

Résumé

En mer Méditerranée, la pollution plastique est un véritable fléau. Des plastiques de toutes les tailles peuvent être retrouvés dans tous les compartiments du bassin méditerranéen et plus particulièrement au fond de la mer, dans les sédiments où se concentre la grande majorité des particules plastiques. Un moyen utilisable pour étudier cette pollution serait les holothuries.

L'objectif de cette étude consiste à vérifier si les holothuries de la baie de Calvi sont utilisables comme espèces bio-indicatrices de la pollution plastique dans la baie de Calvi en Corse en étudiant le contenu en plastiques du tube digestif de ces holothuries. Pour ce faire des individus appartenant aux espèces *Holothuria tubulosa* et *Holothuria poli* ont été récoltés au niveau de trois sites de la baie : le port de la station STARESO, l'émissaire en mer des eaux usées de la commune de Calvi et en dessous d'une ferme aquacole. Le tube digestif est extrait de l'individu via une dissection, puis digéré par une méthode alcaline-oxydante pour en extraire le sédiment. Ce sédiment est ensuite observé à la loupe binoculaire pour recenser les plastiques présents selon quatre catégories : les fibres et filaments, les gommages, les films et les fragments de plastiques. Pour tester les rejets plastiques au niveau de l'émissaire durant la période touristique, les résultats sur ce site sont comparés à ceux d'holothuries provenant du même site, mais prélevées hors de la période touristique.

Suite aux manipulations, il a été possible de mettre en évidence des différences significatives entre les trois sites de récoltes en termes de nombre d'items plastiques et de composition des populations de plastique. Le site de l'aquaculture contient le plus de plastiques et le site de l'émissaire présente la quantité la plus faible. Il est donc possible de détecter des variations de contenu en plastique et de composition entre les différents sites de récolte. Cependant, il n'a pas été possible de montrer une différence significative entre les deux périodes de récolte, mais il est probable que ce soit une conséquence du confinement stricte qui était en place en Corse lors de la période de récolte.

Il est donc possible d'utiliser les holothuries pour étudier la pollution plastique d'un milieu et, théoriquement, les variations des quantités de plastiques dans les sédiments d'un site. Des recherches ultérieures pourraient permettre d'étudier l'évolution de la quantité de plastique au niveau d'un ou plusieurs sites sur une période donnée pouvant aller de quelques mois à plusieurs années.

Abstract

In the Mediterranean Sea, plastic pollution is a real scourge. Plastics of all sizes can be found in all compartments of the Mediterranean basin and more particularly at the bottom of the sea, in the sediments where the vast majority of plastic particles are concentrated. One way of studying this pollution would be with sea cucumbers.

The objective of this study is to verify whether sea cucumbers from Calvi Bay can be used as bioindicator species for plastic pollution in Calvi Bay in Corsica by studying the plastic content of the digestive tract of these sea cucumbers. To do this, individuals belonging to the species *Holothuria tubulosa* and *Holothuria poli* were collected at three sites in the bay: the port of the STARESO station, the sea outfall of the Calvi municipality's waste water and below an aquaculture farm. The digestive tract is extracted from the individual via dissection, then digested by an alkaline-oxidising method to extract the sediment. This sediment is then observed under a binocular magnifying glass to identify the plastics present in four categories: fibers and filaments, gums, films and plastic fragments. To test for plastic discharges at the outfall during the tourist period, the results from this site are compared with those from sea cucumbers from the same site, but collected outside the tourist period.

Following the manipulations, it was possible to highlight significant differences between the three harvesting sites in terms of the number of plastic items and the composition of the plastic populations. The aquaculture site contains the most plastics and the outfall site has the least. It is therefore possible to detect variations in plastic content and composition between the different harvest sites. However, it was not possible to show a significant difference between the two harvest periods, but it is likely that this is a consequence of the strict containment that was in place in Corsica during the harvest period.

It is therefore possible to use sea cucumbers to study the plastic pollution of an environment and, theoretically, the variations in the quantities of plastics in the sediments of a site. Further research could allow the evolution of the quantity of plastic at one or more sites to be studied over a period of time ranging from a few months to several years.

Conformément aux règles imposées à la rédaction, ce mémoire ne doit pas dépasser 50 pages, rédigées en Times 12 ou équivalent

Introduction

1. La pollution plastique en Méditerranée

1.1. Les plastiques : définition et généralités

Selon le dictionnaire Larousse : « Une matière plastique est définie comme un mélange comportant, comme composant fondamental, une substance macromoléculaire et possédant, en général, la propriété d'être moulée ou modelée ». Toujours selon le dictionnaire Larousse, les matières qui peuvent être appelées « plastique » sont : les matières plastiques, tous matériaux organiques modernes - même s'ils ne rentrent pas dans la catégorie des matières plastiques - et les explosifs plastiques, cette dernière catégorie ne nous intéressant pas dans le cadre de ce travail. (Larousse, s. d.). Cette définition reprend donc de très nombreuses matières comme le polyéthylène (PE), le polychlorure de vinyle (PVC), la viscose, le polyuréthane (PU). D'un point de vue chimique, les plastiques sont constitués d'une matrice polymérique dans laquelle sont ajoutés des composants auxiliaires, comme des colorants et des adjuvants (Farhi et al., 1995). Aujourd'hui, les polymères peuvent avoir deux origines, associées ou non : une origine chimique et une origine naturelle. Les polymères d'origine chimique sont conçus à partir de monomères obtenus par vapocraquage du naphta. Cette étape permet de briser les polymères du naphta en monomères, plus simple à manipuler et à transformer. Une réaction de polymérisation est, ensuite, nécessaire pour former les polymères à partir des monomères. L'assemblage de plusieurs fibres de polymères permet d'obtenir la matrice plastique proprement dite (Farhi et al., 1995). Des adjuvants peuvent être ajoutés à la matrice polymérique pour obtenir diverses propriétés pour les plastiques. Par exemple, les phtalates permettent au PVC d'être plus souples et plus résistants dans le temps (Lyche et al., 2009).

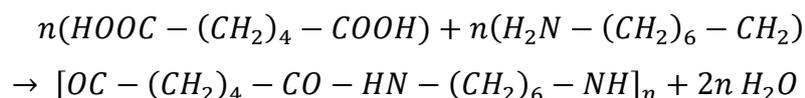


Figure 1 - Équation de polymérisation de l'acide adipique et du n-
examéthylèdiamine pour former du Nylon

Ce n'est que depuis 1950 que les plastiques sont produits en des quantités industrielles, soit plus de 70 ans. Depuis les années 50, la production de plastique dans le monde est en augmentation. Les chiffres passent de 2 millions de tonnes en 1950 (Ritchie & Roser, 2018) à 368 millions de tonnes en 2019 (« Plastics - the Facts 2021 • Plastics Europe », s. d.). Les gros avantages des matières plastiques sont la résistance dont elles peuvent faire preuve, la légèreté et la facilité de moulage de certains types de plastique, comme l'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS). Ces caractéristiques ont permis une très grande expansion de l'utilisation du plastique dans notre vie de tous les jours, que ce soit pour les emballages, la fabrication de pièces automobiles ou encore dans notre matériel technologique.

La résistance dont ils font preuve face aux éléments naturels est aussi leur inconvénient majeur. En effet, une fois relargué dans le milieu marin, on considère qu'il faut entre 20 ans et 600 ans pour que la dégradation du plastique soit « complète ». Cette durée de dégradation dépendant de la résistance de plastique. Ainsi, un sachet en polyéthylène mettra moins de temps à se dégrader qu'un fil de pêche. Cependant, cette dégradation ne correspond en fait qu'au morcellement de ces plastiques en plastiques plus petits (*Déchets*, 2019).

Les débris plastiques peuvent être classés dans trois catégories selon leur taille : les méga-débris plastiques ont une taille comprise entre 20 et 100 mm, les méso-débris ont une taille comprise entre 5 et 20 mm et les micro-débris ont une taille inférieure à 5 mm (Barnes et al., 2009). Cette classification a été mise en place dans un souci de simplicité. Cela évite de devoir mentionner systématiquement la taille des débris, sachant que cette classification varie en fonction des scientifiques. Par exemple, Anna Sanchez-Vidal considère les débris comme macro-débris si leur taille excède 25 mm (Sanchez-Vidal et al., 2021). Toutes ces classes de débris peuvent encore être divisées en deux : les débris primaires sont des plastiques produits à cette taille pour la fabrication de pièces plastiques plus grandes, pour une utilisation dans des dentifrices ou des produits de beauté, et les débris secondaires, issus de la fragmentation de plastiques primaires de plus grandes tailles.

L'accumulation des plastiques dans les sédiments représente 99 % de l'accumulation totale de plastique dans les différents compartiments de la mer Méditerranée. Le pourcentage restant correspond aux plastiques accumulés au niveau des côtes, de la colonne d'eau, des organismes marins et de la surface (Boucher & Billard, 2020). Les plastiques présents en Méditerranée proviennent des pays qui bordent le bassin, mais aussi de la mer Noire et des eaux charriées par le Danube, via le détroit du Bosphore et de l'océan Atlantique, la Méditerranée jouant un rôle de puits pour les plastiques de l'océan Atlantique (Cózar et al., 2015). Il n'existe cependant pas d'estimation de la quantité de plastique introduite par an en Méditerranée pour le détroit de Gibraltar. Pour la mer Noire et le détroit du Bosphore, l'apport en plastique est estimé à 1533 T par an (Cózar et al., 2015). Pour les plastiques charriés depuis la terre, l'apport est estimé à 200 000 T par an (Boucher & Billard, 2020). Ils proviennent des zones densément peuplées qui bordent la Méditerranée, mais peuvent aussi provenir de plus profondément dans les terres s'il sont charriés par les fleuves. Beaucoup de plastiques proviennent des bassins-versants des grands fleuves du pourtour méditerranéen comme, par exemple, le bassin du fleuve Pô, au nord de l'Italie, qui charrie entre 10 000 et 60 000 tonnes de plastiques par an. Le Nil apporte, lui aussi, de grandes quantités de plastiques originaires de tout son bassin-versant. Cet apport correspond à, environ, 74 000 T de plastique par an (Boucher & Billard, 2020) (Figure 2).

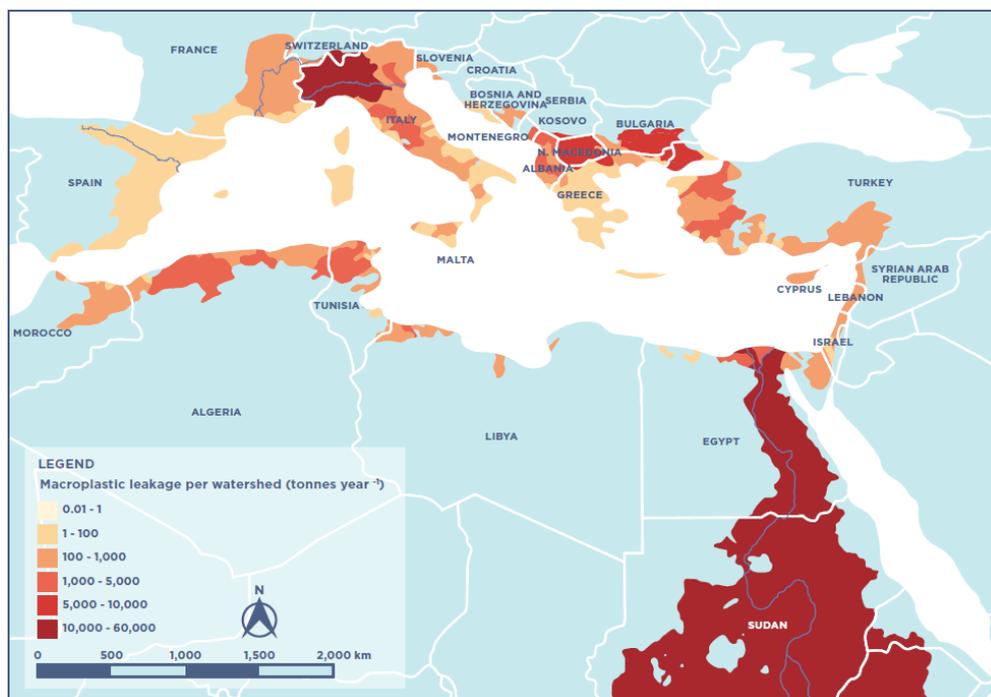


Figure 2 - Carte des rejets plastiques dans le bassin méditerranéens en Tonnes par an (Boucher & Billard, 2020)

En Méditerranée, l’herbier de posidonie facilite l’accumulation de plastiques dans les sédiments. En effet, l’herbier joue un rôle de barrière physique, perturbant la circulation des courants et créant des zones plus calmes par rapport aux environnements proches (Gobert & Abadie, 2018; Sanchez-Vidal et al., 2021). Cette diminution de la force et de la vitesse des courants permet aux particules en suspension dans la colonne d’eau, plastiques ou non, de sédimer sur les fonds. Il y a donc une accumulation de particules plastiques au niveau des herbiers de posidonie (Sanchez-Vidal et al., 2021). Dans leur étude de 2021, le docteur Anna Sanchez-Vidal et son équipe ont mis en évidence la présence, dans des aegagropiles, de plastiques qui ont une densité plus importante que l’eau de mer (Sanchez-Vidal et al., 2021) (Figure 3). Étant donné que les aegagropiles se forment sur le fond à partir de débris de posidonie (feuilles, rhizomes) (Lefebvre et al., 2021), les plastiques inclus dans ces aegagropiles sont très probablement issus de la matre des herbiers et des sédiments du fond de la Méditerranée (Sanchez-Vidal et al., 2021).

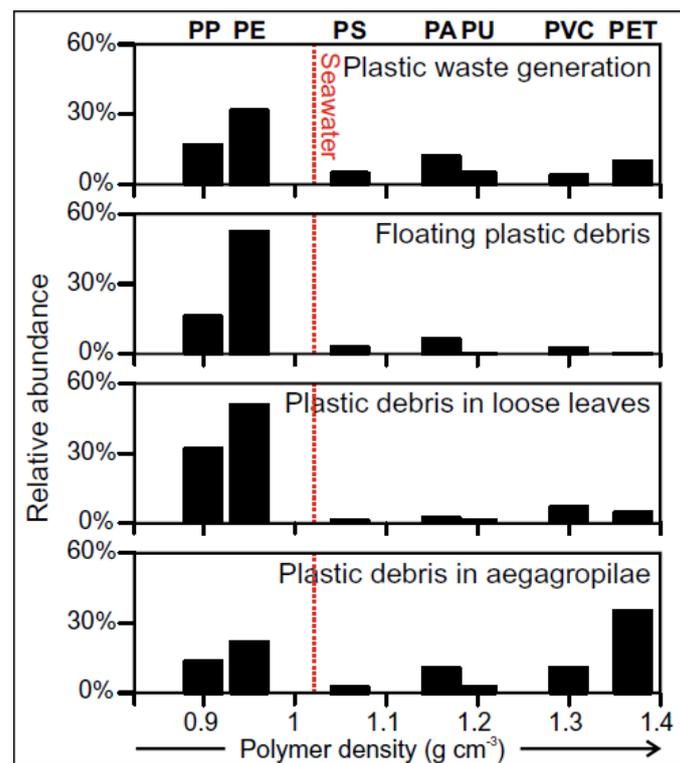


Figure 3 - Densité des débris plastiques observés dans des aegagropiles et des feuilles mortes de *Posidonia oceanica* récoltées sur des plages de l’île de Majorque (Sanchez-Vidal et al., 2021)

1.2. Ingestion de plastiques et risques pour les organismes

1.2.1. Types d'ingestion

Les plastiques se trouvant dans tous les compartiments du milieu marin, il est possible de trouver des plastiques dans le tractus digestif de nombreux animaux que ce soit des animaux benthiques ou pélagiques (Bulleri et al., 2021; Markic et al., 2020; Remy et al., 2015; Zazouli et al., 2022). Des études ont, ainsi, mesuré la présence de plastiques dans le tractus digestif de tortues de mer (Schuyler et al., 2014), de mammifères marins (Zantis et al., 2021), de poissons (Markic et al., 2020; Zazouli et al., 2022), d'holothuries (Bulleri et al., 2021; Plee & Pomory, 2020) ou encore des amphipodes (Remy et al., 2015).

Il y a plusieurs raisons qui peuvent expliquer l'ingestion de plastiques par les animaux : soit, ils confondent les plastiques avec de potentielles proies, soit, ils en ingèrent accidentellement, soit, ils consomment des proies déjà contaminées par des plastiques (Ryan, 2019). L'ingestion de plastique peut être classée en deux catégories : l'ingestion primaire et l'ingestion secondaire. L'ingestion primaire correspond à l'ingestion directe de plastiques de manière volontaire ou accidentelle alors que l'ingestion secondaire correspond à l'ingestion indirecte de plastiques. En général, l'ingestion secondaire de plastique correspond à la consommation d'une proie déjà contaminée par des plastiques ingérés de façon primaire ou secondaire (Ryan, 2019). Il y a donc une bioaccumulation des plastiques chez les organismes prédateurs (Figure 4) (Miller et al., 2020).

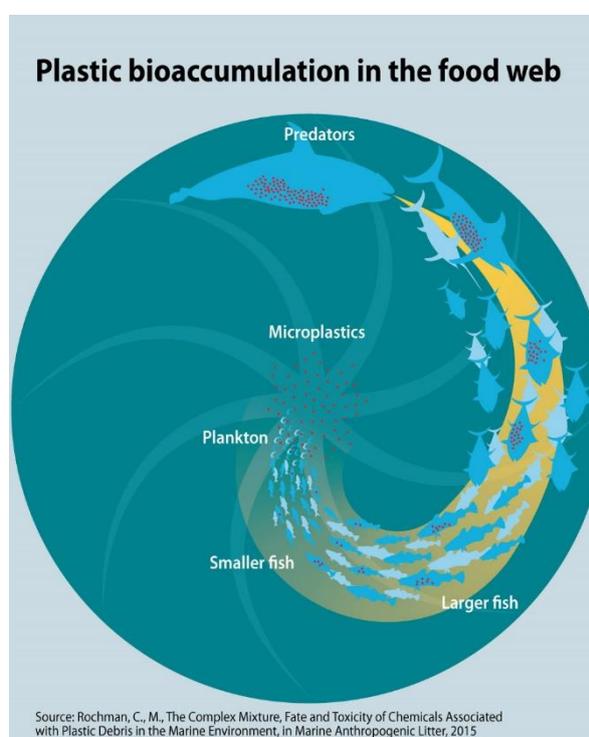


Figure 4 - Figure représentant la bioaccumulation de débris plastiques dans une chaîne alimentaire depuis les consommateurs primaires (le plancton) jusqu'aux super prédateurs (*Plastic bioaccumulation in the food web / GRID-Arendal, s. d.*)

1.2.2. Conséquences de l'ingestion de plastique

Pour les éléments plastiques, les plus gros, les animaux risquent l'obstruction des voies digestives ou des voies respiratoires. Pour les particules les plus petites, le risque est différent. En effet, ces fragments sont trop petits pour obstruer quoi que ce soit mais il a été montré que des éléments traces étaient souvent associés aux particules plastiques. Les plastiques en mer finissent par se recouvrir de biofilms ou d'organismes fixés, phénomène appelé le biofouling (Amaral-Zettler et al., 2021; Kaiser et al., 2017). Les biofilms vont permettre aux éléments-traces d'adhérer et de s'accumuler sur la surface des plastiques (Bradney et al., 2019; Holmes et al., 2014). Grâce à leur légèreté, les plastiques vont disséminer les éléments-traces sur de plus longues distances que s'ils avaient été directement émis dans l'océan (Brennecke et al., 2016). Cette association avec des contaminants explique en partie leurs effets néfastes chez les animaux marins ayant ingéré les éléments plastiques contaminés (Bradney et al., 2019; Holmes et al., 2014). L'analyse de particules plastiques récoltées dans le milieu marin lors de plusieurs études a pu montrer que les concentrations des éléments-traces sur les éléments plastiques étaient similaires voire supérieures aux concentrations des éléments-traces dans le milieu environnant (Holmes et al., 2012; Mitchell et al., 2019).

Les adjuvants ajoutés lors de la fabrication des plastiques peuvent, eux aussi, avoir un effet sur les organismes. En effet, certains des composés utilisés pour améliorer la flexibilité des plastiques ou obtenir d'autres propriétés comme une certaine couleur sont des perturbateurs endocriniens (Delacuvellerie et al., 2019). C'est le cas, par exemple, des phtalates utilisés pour conférer flexibilité et durabilité au PVC (Lyche et al., 2009). La matrice en elle-même peut, elle aussi, être toxique pour les animaux du milieu marin. C'est le cas, par exemple, du Bisphénol A, utilisé comme monomère pour la fabrication de plastiques en polycarbonates de bisphénol A, qui peut perturber le développement neuronal ou le fonctionnement de glandes endocrines comme la thyroïde (Rochester, 2013).

2. Les Holothuries

2.1. Classification et description générale

2.1.1. Diversité phylogénétique

L'embranchement des échinodermes regroupe environ 17 000 espèces exclusivement marines réparties en cinq classes (*WoRMS - World Register of Marine Species*, s. d.). Classé parmi les deutérostomiens, l'embranchement des échinodermes possède trois caractéristiques principales : la première est une symétrie pentaradiaire, signifiant que leur corps est organisé autour de cinq axes de symétries, la deuxième est la présence d'un système ambulacraire, appelé aussi système aquifère, et la troisième correspond à la présence d'un endosquelette constitué de plaques ou de spicules calcaires (Urry et al., 2020; Wanninger, 2015). Les cinq classes des Echinodermes sont les Asterozoaires, les Ophiurozoaires, les Crinozoaires, les Echinozoaires et les Holothurozoaires. Ces cinq classes sont réparties en trois sous-embranchements : les Asterozoaires, reprenant les classes des Asterozoaires et des Ophiurozoaires, les Crinozoaires pour la classe des Crinozoaires et le sous-embranchement des Echinozoaires, pour la classe des Echinozoaires et des Holothurozoaires (Urry et al., 2020; Wanninger, 2015; *WoRMS - World Register of Marine Species - Echinodermata*, s. d.). La classe des Holothurozoaires peut, elle-même, être divisée en deux sous-ordres : les Aspidochirotes et les Dendrochirotes. Ces deux sous-ordres sont différenciés par la morphologie des tentacules buccaux et par le mode de nutrition des individus (*WoRMS - World Register of Marine Species - Aspidochirota*, s. d.). Pour ce travail, il a été choisi d'étudier deux espèces de Méditerranée : *Holothuria tubulosa* et *Holothuria polii* (Figure 5).



Figure 5 - *Holothuria tubulosa* (à droite) et *Holothuria polii* (à gauche) (Crédit : Roberto PILLON)

2.1.2. Organisation générale et Morphologie

Bien que faisant partie de la même classe que les oursins, la morphologie des holothuries diffère assez bien par rapport à ceux-ci. Tout d'abord, les holothuries présentent un corps cylindrique allongé dans l'axe oral-aboral. Cet allongement est à l'origine de leur nom de concombre de mer (Hickman, 2008; Purcell et al., 2012; Urry et al., 2020). Ensuite, là où le test des oursins est constitué de plaques calcaires indissociables, l'endosquelette des holothuries n'est constitué que de spicules calcaires répartis au niveau de la paroi du corps. La forme de ces spicules varie beaucoup d'une espèce à l'autre, ce qui en fait un outil important pour l'identification (Purcell et al., 2012). Chez ces animaux, la symétrie pentaradiaire est observable grâce à la présence de cinq ambulacres méridionaux où se trouvent des podia, appelés aussi pieds ambulacraires. Cette symétrie est aussi observable dans l'organisation interne de l'animal grâce à la présence de quatre bandes de muscles longitudinaux dans la paroi de l'animal (Hickman, 2008; Purcell et al., 2012; Samyn et al., 2006). Cependant, la structure des podia varie en fonction de leur position sur le corps de l'animal. Ainsi, les podia qui se trouvent sur le bivium, correspondant à la face dorsale de l'animal, ne possèdent pas de ventouse et sont appelés papilles alors que ceux qui se trouvent sur le trivium, correspondant à la face ventrale de l'animal, possèdent des ventouses et servent à la locomotion de l'animal (Hickman, 2008; Samyn et al., 2006).

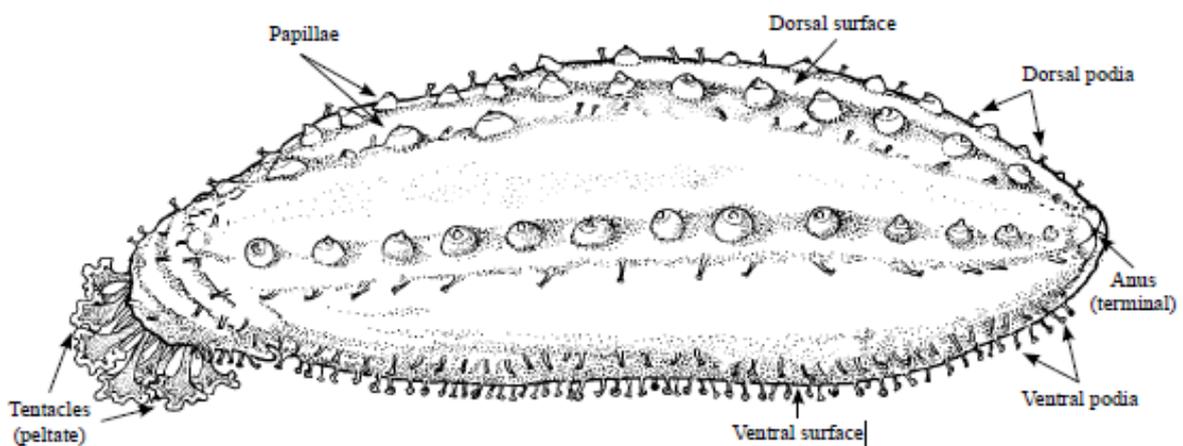


Figure 6 - Morphologie générale d'une holothurie (Purcell et al., 2012)

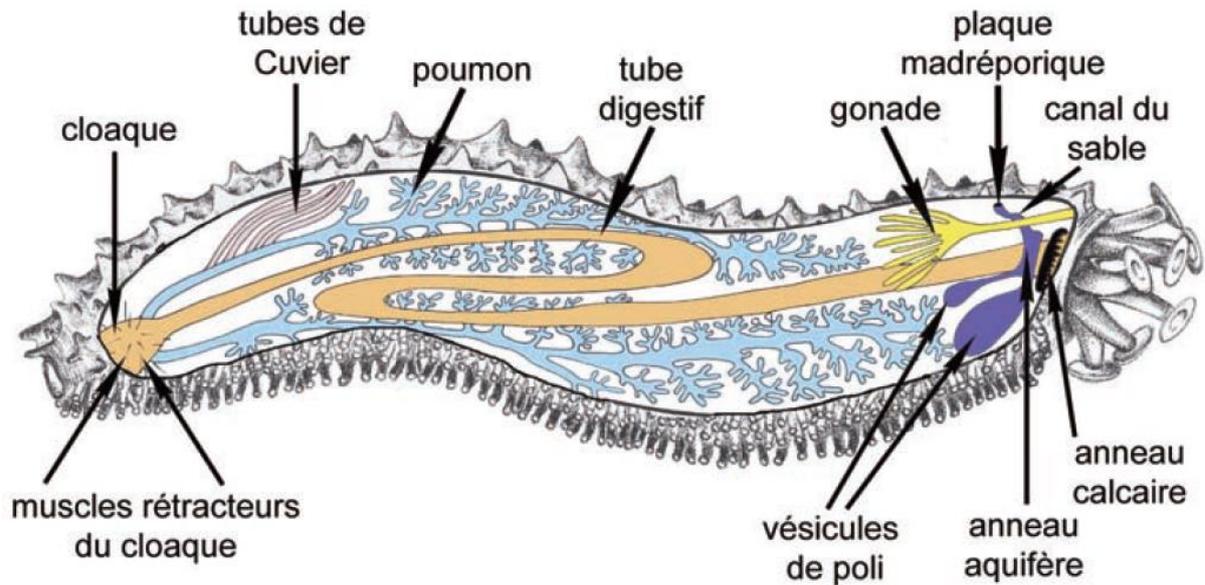


Figure 7 - Anatomie interne d'une holothurie aspidochirote montrant les principaux organes (Dessin de Nadine Van Noppen) (Samyn et al., 2006).

À l'intérieur du corps de l'holothurie, en retirant l'espace occupé par la cavité coelomique, c'est le système digestif qui occupe la plus grande part du volume restant. Ce système est rattaché aux deux extrémités du corps de l'animal au niveau de la bouche et de l'anus. Au niveau de la bouche, celle-ci est entourée de tentacules. Ces tentacules sont des podia modifiés du système ambulacraire. C'est aussi à ce niveau-là que se trouve l'anneau aquifère du système ambulacraire sur lequel sont fixés les cinq ambulacres courant sur toute la longueur du corps de l'animal. Sur ces ambulacres, sont fixés de nombreux podia (Hickman, 2008; Samyn et al., 2006). Au niveau de l'anus, le tube digestif forme un renflement appelé le cloaque sur lequel sont aussi fixés les arbres respiratoires gauches et droits. Dans la famille des Holothuriidae, des tubes de Cuvier sont rattachés aux arbres respiratoires proches du cloaque. Le rôle de cet organe est surtout défensif, car lorsque les tubes sont expulsés du corps de l'holothurie, ceux-ci viennent se coller sur le potentiel prédateur et vont restreindre ses mouvements grâce à leur élasticité (Flammang, 2002).

2.1.3. Cycle de vie et reproduction

Chez *Holothuria tubulosa* et *Holothuria polii*, le cycle de vie et de reproduction est à la fois benthique et pélagique. Ce sont des animaux gonochoriques (Bardanis & Batjakas, 2018; Despalatović et al., 2004). Certaines espèces peuvent être hermaphrodites, mais ça n'a pas été observé chez les deux espèces d'intérêt pour cette étude. Les gamètes mâles et femelles sont relâchés dans l'environnement et la fécondation se fait en pleine eau. Le zygote va alors évoluer en une larve auricularia planctonique. Cette larve va alors grossir et finir par se poser sur le fond pour former une nouvelle holothurie qui va pouvoir perpétuer ce cycle (Hickman, 2008). Ce cycle est annuel et divisé en cinq phases. Pour les deux espèces qui nous intéressent, ces cycles sont relativement synchrones entre eux (Despalatović et al., 2004; Mezali et al., 2022; Slimane-Tamacha et al., 2019).

Le cycle reproducteur semble régulé par de nombreux facteurs du milieu comme la température de l'eau, la disponibilité en nourriture, la photopériode ou, encore, l'intensité lumineuse (Conand, 1993; Despalatović et al., 2004; Leite-Castro et al., 2016; Venâncio et al., 2022). Cette corrélation entre l'évolution de certains paramètres et l'évolution de l'index gonadique a été mise en évidence chez certaines espèces d'holothuries, dont *Holothuria tubulosa* (Despalatović et al., 2004; Leite-Castro et al., 2016; Tahri et al., 2019) (Figure 8).

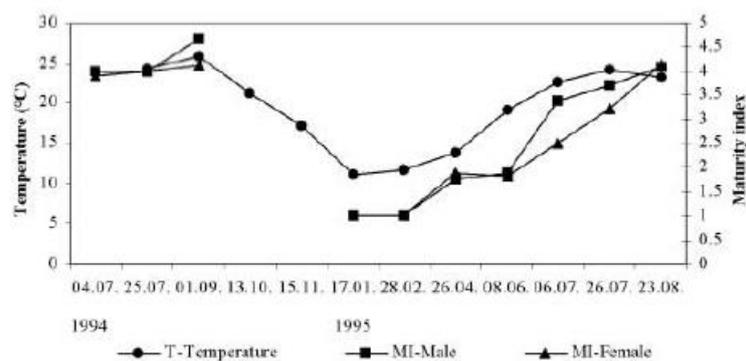


Figure 8 - *Holothuria tubulosa*. Changements des valeurs des indices de maturité chez les deux sexes en fonction des changements saisonniers de température pendant la période d'échantillonnage (juillet 1994 à août 1995) (Despalatović et al., 2004).

2.2. Écologie

Quant à leur écologie, les holothuries sont des organismes benthiques occupant la place de détritivore dans l'écosystème. Ces animaux ingèrent la couche supérieure des sédiments pour en retirer la matière organique présente (Massin & Jangoux, 1976; Purcell et al., 2016). En remuant le sédiment pour se nourrir, les holothuries permettent de maintenir et d'améliorer la santé du sédiments via la bioturbation des sédiments et le recyclage des nutriments (Purcell et al., 2016). Lorsque des holothuries consomment les quelques millimètres des couches supérieures des sédiments, les sédiments qui ressortent du tube digestif sont moins riches en matières organiques. Cette contribution est un passage important pour la régénération et la minéralisation des nutriments dans le sédiment (Purcell et al., 2016). Grâce à ce recyclage des nutriments, les holothuries permettent une amélioration de la productivité des producteurs primaires et ont aussi une influence positive sur la croissance des herbiers marins. (Purcell et al., 2016; Wolkenhauer et al., 2010).

2.3. *Holothuria tubulosa* et *Holothuria poli*

Holothuria tubulosa et *Holothuria poli* sont deux espèces d'holothuries présentes en Méditerranée. Ces deux espèces sont largement distribuées dans toute la Méditerranée et ont aussi été observées le long de la façade atlantique française et en mer Rouge (*WoRMS - World Register of Marine Species - Holothuria (Holothuria) Tubulosa Gmelin, 1791, s. d.*; *WoRMS - World Register of Marine Species - Holothuria (Roweothuria) Poli Delle Chiaje, 1824, s. d.*). Observable dès 1 à 2 m de profondeur et pouvant vivre jusqu'à une centaine de mètres de profondeur, les deux espèces vivent sur les fonds sableux de la Méditerranée proches des herbiers de posidonies, mais elles vivent aussi sur les fonds rocheux et les grandes étendues sableuses que l'on peut trouver en Méditerranée (Fischer et al., 1987; Massin & Jangoux, 1976). Ces espèces sont considérées comme « *Least concern* » par l'IUCN. Avec *Holothuria forskali* et *H. poli*, *H. tubulosa* est élevée et pêchée pour l'alimentation, notamment en Turquie. La production d'holothuries turques est en augmentation depuis les débuts de la pêche de ces espèces en 1996 passant de 19 T en 1996 à 77 T en 2007 (Aydin, 2009)

3. Objectif du mémoire

L'étude de la pollution plastique demande un moyen fiable de travail. Pour ce faire, il a été décidé de choisir un organisme bio-indicateur et une méthode robuste pour compter les plastiques. Pour choisir un organisme bio-indicateur, il faut que cet organisme réponde à ces caractéristiques : tout d'abord, l'organisme doit être abondant et suffisamment dispersé sur la zone qui nous intéresse, en l'occurrence, la baie de Calvi. Ensuite, ce doit être un organisme sédentaire ou se déplaçant très peu, de bonne taille et si possible facilement observable. Enfin, l'organisme doit aussi être tolérant aux contaminants à des concentrations similaires à celles observées dans l'environnement. Il doit aussi exister une relation entre les concentrations en contaminants dans le milieu externe et dans l'organisme (« Bioindicateur », 2022; *Bioindicateur*, s. d.).

Pour cette étude, nous avons décidé de prendre les holothuries de la baie de Calvi comme potentiel bio-indicateur, car elles sont abondantes et présentes, à peu près, dans tous les milieux de la baie de Calvi. De plus, ce sont des animaux repérables relativement facilement et suffisamment sédentaires que pour ne pas trop se déplacer. Avec ça, nous avons une bonne base pour que les holothuries servent de bio-indicateur de la pollution plastique d'un milieu dans le contexte de cette étude. Un de ses objectifs consiste à vérifier s'il est possible d'utiliser les holothuries présentes dans la baie de Calvi comme bio-indicateur de la pollution plastique du milieu.

À Calvi, la station d'épuration de la ville a subi une réfection complète en 2013 pour être mise aux normes européennes. Suite à ces travaux, la station d'épuration de la commune de Calvi est capable de traiter les eaux usées de 60 000 habitants. Hors période touristique, cette station d'épuration est plus que suffisante pour traiter les eaux usées des 5 774 habitants de la commune de Calvi (*Populations légales 2019 – Commune de Calvi (2B050) / Insee*, s. d.). En revanche, les statistiques concernant la population maximale atteinte lors de la période touristique ne sont pas disponibles. Il est donc nécessaire de s'intéresser à d'autres données pour pouvoir vérifier la suffisance des travaux menés dans la station d'épuration de Calvi. En regardant le nombre global d'échanges de la Corse, le pic de tourisme en Corse commence au mois d'avril pour atteindre son maximum au mois d'août et commencer à décliner pour prendre fin au mois d'octobre (Bolley et al., 2018) (Figure 9). La capacité de 60 000 habitants de la station a été calculée pour justement répondre à l'afflux de touristes. L'autre objectif de cette étude est donc de vérifier si cette station d'épuration est suffisamment dimensionnée pour la période touristique dans la

commune de Calvi en comparant le contenu plastique du tube digestif d'holothuries récoltées hors de la période touristique au niveau de l'Émissaire des égouts de Calvi avec le contenu plastique du tube digestif d'holothuries récoltées durant la période touristique au niveau de l'Émissaire des eaux usées de la ville de Calvi.

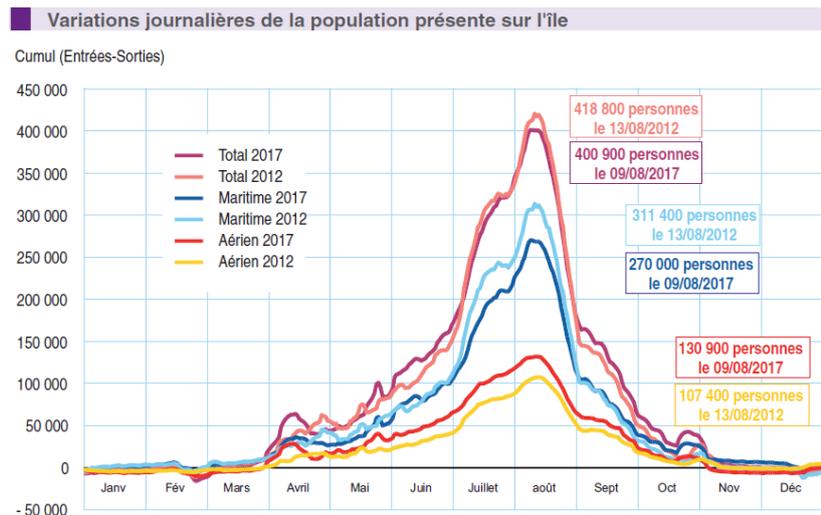


Figure 9 - Graphique des variations journalières de la population en Corse durant toute une année. Les nombres donnés correspondent aux maxima des cumuls des échanges (Entrées et Sorties) durant les années 2012 et 2017 (Bolleyn et al., 2018)

Matériel et méthode

1. Zone et stratégie d'échantillonnage

Pour ce mémoire, les holothuries ont été échantillonnées dans la baie de Calvi lors de la période touristique de l'année 2021 durant les mois de juin et de juillet au niveau de trois sites de la baie. Ces trois sites d'échantillonnage correspondent : 1) Au transect de STARESO entre 10 m et 40 m de profondeur ; 2) À la sortie de l'Émissaire en mer des eaux usées de la ville de Calvi entre 33 et 38 m de profondeur ; 3) À proximité de la ferme aquacole, à 22 m de profondeur.

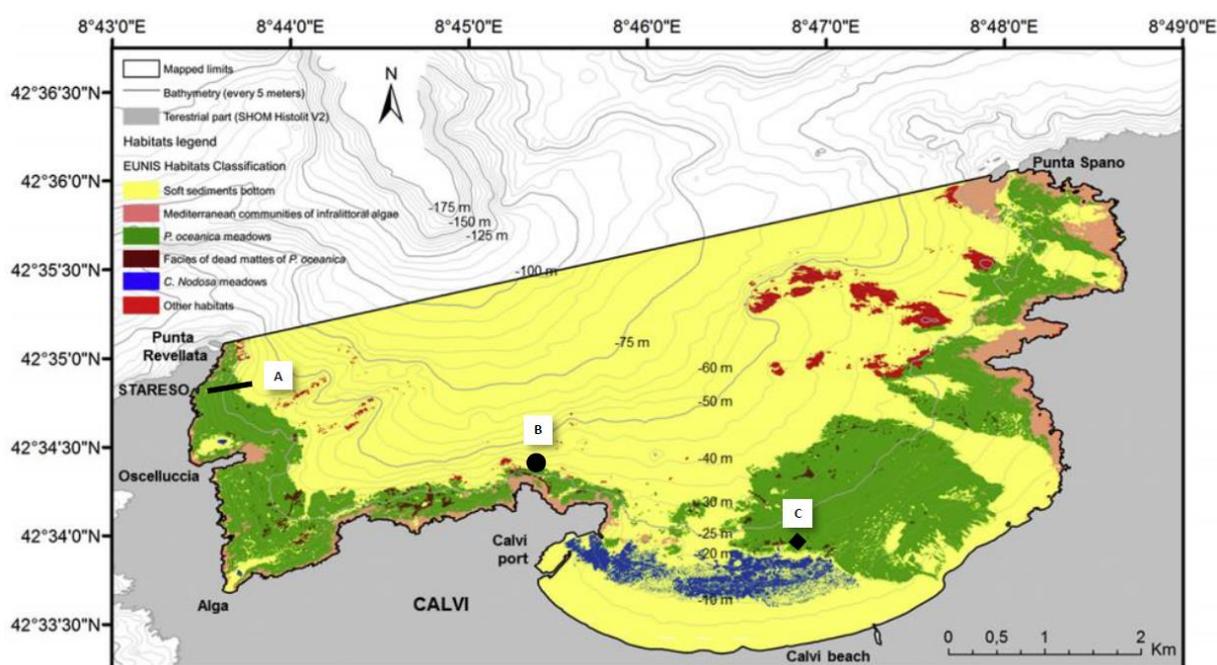


Figure 10 - Carte de la baie de Calvi reprenant les habitats sous-marins qu'elle abrite ainsi que les sites d'échantillonnages principaux (A = transect depuis STARESO, B = Emissaire des eaux usées, C = Ferme aquacole) (modifiée d'après Velimirov et al. (2016)) (Dogniez, 2021)

En tout, 18 holothuries ont été collectées ($n = 6$ pour chaque site). Le site de l'Émissaire a fait l'objet d'un échantillonnage supplémentaire en avril 2021 ($n = 3$), hors de la saison touristique, afin de comparer la concentration en plastique des échantillons pendant et hors de la saison touristique. Ainsi, nous pourrions déterminer l'influence potentielle ou non de la période d'échantillonnage sur la concentration en plastique des échantillons. L'échantillonnage a été effectué en plongée. Les holothuries ont été stockées au congélateur en attendant d'être disséquées.

2. Dissection des holothuries

Après une décongélation de 24 h en chambre froide à 4 °C, les holothuries ont été disséquées. La dissection s'est déroulée dans un bac de dissection dont le fond a été recouvert d'une plaque en verre pour éviter le frottement des outils contre le plastique du bac de dissection et ainsi éviter la contamination des échantillons. Pour éviter une contamination atmosphérique, la dissection, ainsi que toutes les étapes ultérieures des manipulations, ont été effectuées sous une hotte à flux laminaire. Pour éviter une contamination par des plastiques provenant de mes vêtements, toutes les manipulations ont été effectuées en portant un tablier de laboratoire en coton et des gants en nitrile.

Des blancs ont été réalisés pour vérifier si des contaminations plastiques étaient possibles suite aux manipulations. Des filtres GF/C ont été placés dans des sachets en polyéthylène à haute densité et laissés au congélateur durant 5 jours. Les filtres ont ensuite subi les manipulations décrites dans la partie suivante. L'analyse des blancs a permis de mettre en évidence certaines faiblesses de la méthodologie imaginée au départ. Le stockage des tubes digestifs précédant les manipulations a pu être amélioré. L'idée de départ était de stocker les tubes digestifs dans des sachets en PE au congélateur en attendant les manipulations, mais les blancs ont montré la présence de particules translucides sur les filtres, particules absentes des blancs placés dans des récipients en verre fermés et stockés en chambre froide. Les blancs ont aussi permis de mettre en évidence le fait que l'enveloppement des boîtes de pétri pour le séchage en étuve était suffisant pour éviter une contamination par des plastiques atmosphériques des échantillons.

La dissection commence par une incision longitudinale partant de l'anus jusqu'à l'apex en suivant le dos de l'animal (Figure 11). Le tube digestif est alors détaché du système hémal et des mésentères qui le maintiennent en place. Il est ensuite extrait du corps de l'animal par deux coupures : une au niveau de l'anneau calcaire péri-œsophagien et l'autre au niveau du cloaque. Une fois extraits, les tubes digestifs sont alors stockés dans des récipients en verre afin d'éviter les contaminations atmosphériques et replacés dans la chambre froide. Suite aux blancs, il a été décidé de stocker les tubes digestifs dans des pots en verre afin de ne pas contaminer nos échantillons avec du PE provenant de sachets en plastique.



Figure 11 - *Holothuria tubulosa* avant et après le début de la dissection (photos personnelles)

3. Extraction des plastiques

Pour extraire les plastiques des sédiments présents dans les tubes digestifs, il a été décidé d'utiliser le protocole établi par Martin Dogniez dans son mémoire (Dogniez, 2021). Pour la digestion des tubes digestifs, Martin Dogniez a mis en évidence que la méthode alcaline oxydante utilisant 50 ml de KOH 10 % et 15 ml d' H_2O_2 à 30 % permettait une bonne digestion de la matière organique végétale et du tube digestif. La réalisation des blancs et la soumission de ces blancs à cette méthodologie ont été utiles pour me familiariser avec la méthodologie.

L'extraction commence par la mise en contact du tube digestif avec 50 ml de KOH 10 % (poids/volume) dans un berlin. Le berlin est ensuite placé au bain-marie et maintenu à 50 °C pendant 6 h. Le surnageant de cette solution, constitué de MP et de KOH, est prélevé et filtré sur un filtre Whatman GF/C placé sur une rampe de filtration reliée à une pompe à vide (Figure 12). Le filtre est ensuite transféré dans une boîte de Pétri et placé dans une étuve maintenue à 50 °C pendant 24 h afin que la solution de KOH encore présente sur le filtre soit complètement évaporée. Dans un second temps, 15 ml de H_2O_2 sont ajoutés à la solution afin de digérer la matière organique réfractaire. Le berlin est alors maintenu à 50 °C pendant 12 h au bain-marie. Une fois ce délai passé, les sédiments sont filtrés sur une triple série de filtre de différentes tailles de mailles (500 μm et 63 μm en acier inoxydable et 1,2 μm GF/C) et rincés abondamment à l'eau Milli-Q pour en éliminer un maximum de solution KOH et H_2O_2 . Le filtre GF/C est ensuite placé dans une boîte de Pétri. La boîte de pétri est alors placée dans une étuve et maintenue à 50 °C pour faire évaporer la totalité de la solution KOH et H_2O_2 restante sur le filtre.

Les sédiments retenus par les filtres de 500 μm et 63 μm sont ensuite transvasés dans une solution aqueuse de ZnCl_2 concentré à 1 kg/l pour une séparation par densité des sédiments et des plastiques. La densité de cette solution étant de 1,6, les plastiques vont être mis en suspension dans la solution alors que les sédiments vont sédimenter au fond du berlin. La solution contenant les sédiments est agitée à l'aide d'une spatule métallique pendant une minute puis laissée à reposer pendant 5 minutes pour que la sédimentation puisse se faire. Le contenu du berlin est ensuite filtré sur une triple série de filtres placés sur une rampe de filtration. Une fois la filtration terminée, la solution est récupérée et les opérations de séparation par densité et de filtration sont répétées avec les contenus des filtres de 500 μm et de 63 μm afin de s'assurer que les microplastiques encore accrochés aux particules sédimentaires se retrouvent bien en suspension dans la solution de ZnCl_2 . Les sédiments retenus sur les filtres sont alors lavés avec de l'eau milli-Q pour éliminer un maximum de solution de ZnCl_2 . Le filtre GF/C ainsi obtenu est alors placé dans une boîte de pétri. Cette boîte est alors maintenue à 50 °C pendant 24 h dans une étuve. Les sédiments retenus dans les filtres de 500 μm et 63 μm sont, quant à eux, transvasés dans des boîtes de pétri pour être séchés à l'étuve à 50 °C pendant 24 h. Toutes ces boîtes de pétri seront analysées ultérieurement à la loupe binoculaire. Toutes les boîtes de pétri sont recouvertes d'une feuille d'aluminium pour éviter une pollution atmosphérique dans l'étuve.

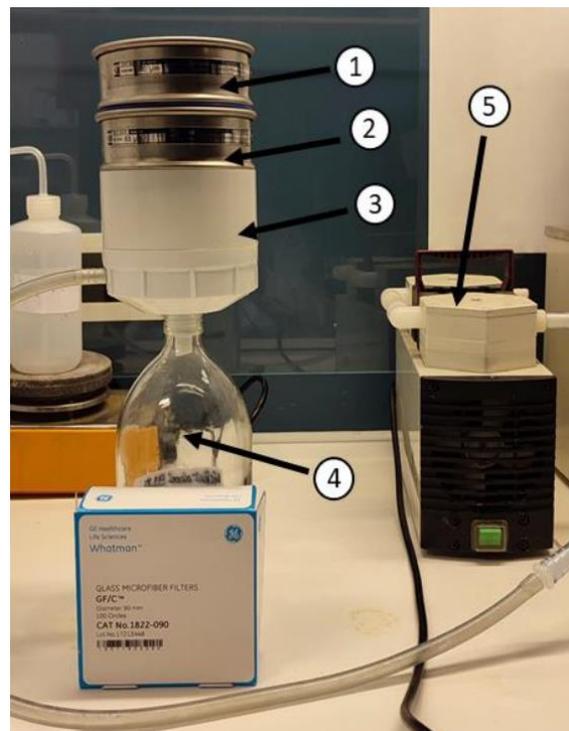


Figure 12 - Rampe de filtration utilisée pour l'extraction des MP de l'intestin des holothuries
 1)Filtre métallique 500 μm 2)Filtre métallique 63 μm
 3)Support de filtration pour le filtre GF/C
 4)Réceptacle des solutions filtrées 5)Pompe à vide.
 (Dogniez, 2021)

L'observation se déroule avec une loupe binoculaire Zeiss Stemi 2000 C équipée de l'objectif x 1. Les photos des filaments et des fragments sont prises avec cette même loupe binoculaire équipée d'une caméra Tucsen ISH 500 5.0 MP. Les plastiques sont ainsi recensés et photographiés afin de les identifier et de les classer dans quatre catégories. Cette classification se fait en fonction de la structure des plastiques rencontrés et elle divise les plastiques en 4 catégories que sont les fragments, les films, les fibres et les filaments et les gommages (Dogniez, 2021; Frias et al., 2018). La différenciation entre plastiques et matière organique des fibres et des filaments est effectuée grâce au test de l'aiguille chaude (De Witte et al., 2014). Tous les clichés obtenus sont traités avec le logiciel ImageJ dans sa version 1.53k pour mesurer la longueur des fibres et des filaments et la longueur du grand axe des fragments.

4. Statistiques

Dans les calculs concernant le nombre de plastiques dans les tubes digestifs, il est nécessaire de tenir compte des masses des tubes digestifs pour analyser les données, car celles-ci permettent de rendre compte de la taille des holothuries qui ont été récoltées sur les trois sites.

Les tests statistiques sont effectués avec les fonctions statistiques du programme Rstudio dans sa version 2022.07.1 build 554 et R en version 4.1.2 et à l'aide du package rstatix dans sa version 0.7.0 (Kassambara, 2021). Les graphiques sont générés grâce au package ggplot2 dans sa version 3.3.6 (Wickham, 2016) via des tableaux de données générés par le package data.table dans sa version 1.14.2 (Dowle et al., 2021).

Pour tous les tests statistiques, la valeur de confiance est fixée à 5 % ($p\text{-value} = 0.05$). Pour les tests statistiques, tout d'abord, la normalité et l'homoscédasticité du nombre d'items exprimés pour 10 g de poids frais du tube digestif ($/10g_{PF}$) et de la longueur en fonction du site sont respectivement mises à l'épreuve par un test de Shapiro-Wilk et un test de Levene. Un test ANOVA est effectué entre les données de tous les sites d'une même période pour tester l'influence du site de récolte sur le nombre d'items exprimé pour 10 g de poids frais du tube digestif et sur la longueur.

Si l'homoscédasticité n'est pas vérifiée, un test de Kruskal-Wallis sera effectué à la place du test ANOVA. Après vérification de l'homoscédasticité et de la normalité de chacune des grandes catégories de plastiques, l'influence du site de récolte sur le nombre de plastiques pour $10g_{PF}$ de tube digestif sera étudiée via l'utilisation d'un test ANOVA ou

d'un test de Kruskal-Wallis si l'une des deux conditions n'est pas respectée. Ces tests seront répétés pour les quatre classes de plastiques décrites dans ce travail.

Un test Student sera effectué pour le site de l'Émissaire pour vérifier s'il existe une différence significative entre les deux périodes de récolte pour ce site (touristique et période creuse). Si la normalité des données n'est pas satisfaite, c'est un test Wilcoxon qui sera effectué. En cas de normalité des données, mais d'hétéroscédasticité, un t test de Welch sera utilisé à la place du test Student. Les mêmes tests seront effectués pour les catégories de plastiques afin de déterminer si la période a une influence sur la teneur en plastiques selon leurs natures.

Résultats

1. Période touristique

1.1. Influence du site de récolte sur le nombre de particules plastiques

Sur les 18 holothuries récoltées durant la période touristique, 595 éléments plastiques ont été dénombrés. Le nombre d'éléments retrouvés varie de 14 à 53 éléments avec, en moyenne, 30 ± 10 éléments plastiques. En tenant compte de la masse des tubes digestifs, la moyenne du nombre d'éléments plastiques pour 10 g/PF de tube digestif est de 13 ± 11 éléments. Le tube digestif le plus léger correspond à celui d'une holothurie du site de STARESO, avec une masse de 6.3 g/PF, et le plus lourd est celui d'une holothurie du site de l'Émissaire des eaux usées, avec une masse de 89.1 g. En tout, la masse du tube digestif des holothuries est de 39.35 ± 25.01 g/PF. La figure 12 représente le nombre d'éléments plastiques recensés pour 10 g/PF de tube digestif. Elle permet de rendre compte des différences de contenu qui existent entre les holothuries des trois sites de récolte. Les holothuries de la ferme aquacole montrent une quantité de plastiques significativement plus importante que les deux autres sites (test de Kruskal-Wallis, p-value = 0.00115). Le site comptant le moins de plastiques étant le site de l'Émissaire. Les moyennes pour chaque site sont de 25.8 ± 10.2 éléments/10g/PF pour la ferme aquacole, 2.3 ± 1.7 éléments/10g/PF pour l'Émissaire et de 10 ± 4 éléments/10g/PF pour le site de STARESO.

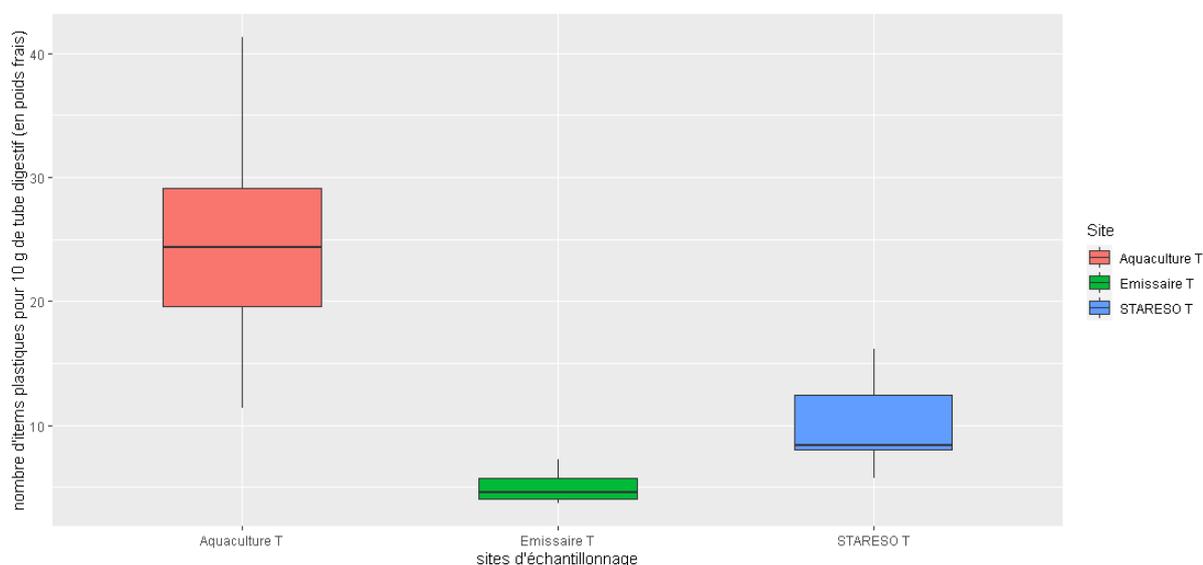


Figure 13 - Nombre d'items plastiques dans les tubes digestifs des holothuries récoltées pendant la période touristique

1.2. Influence du site de récolte sur la longueur des filaments et des fragments plastiques

Pour la période estivale et sur l'ensemble des sites, la taille moyenne des plastiques est de $1.149 \text{ mm} \pm 1.746 \text{ mm}$ avec une taille minimale de $25.3 \text{ }\mu\text{m}$ et une taille maximale de 22.802 mm . Sur les 476 éléments retrouvés dans les tubes digestifs des holothuries récoltées durant la période touristique sur les trois sites, 96,8 % des éléments font partie des micro-débris avec une taille inférieure à 5 mm. Pour la ferme aquacole, 98,5 % des débris retrouvés sont des micro-débris. Pour le site de l'Émissaire, la catégorie des micro-débris représente 97,8 % des débris retrouvés. Enfin, pour le site de STARESO, la part de micro-débris représente 98 % des débris recensés. C'est sur le site de l'Émissaire que le débris le plus grand a été trouvé, il s'agit d'un filament d'une longueur de 22.802 mm de long.

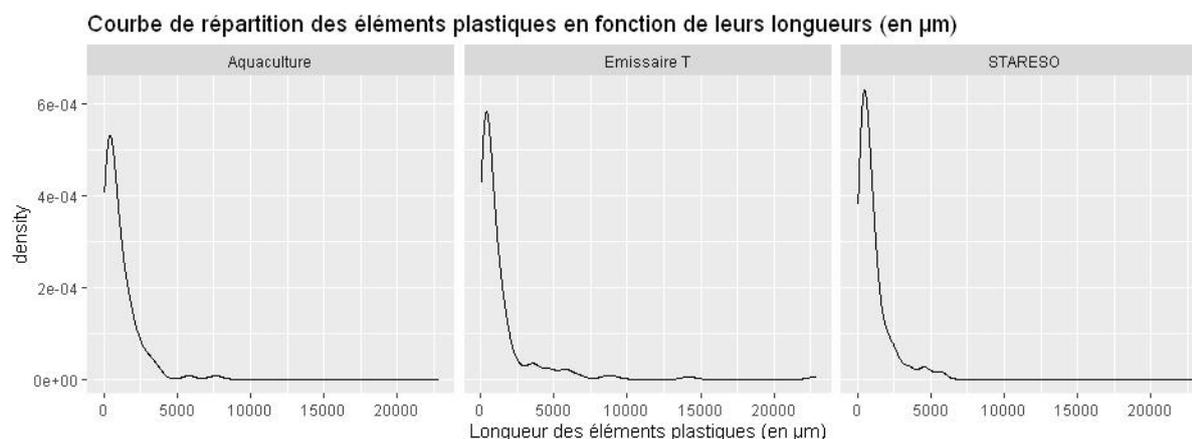


Figure 14 - Courbes de répartition des éléments plastiques en fonction de leurs longueurs (en μm)

La figure 15 représente les courbes de densité des éléments plastiques en fonction de leur taille pour les plastiques ayant une taille inférieure à 5 mm, soit 96,8 % des observations. Cette figure permet de constater que la répartition des plastiques selon leurs tailles est plus étalée au niveau de la ferme aquacole alors que les deux autres sites montrent une densité légèrement plus importante de plastiques ayant une taille comprise entre 0 et 1,5 mm. Il n'existe cependant pas de différence significative entre les trois sites pour ce qui est de la taille médiane des fragments et des filaments (test de Kruskal-Wallis, p-value = 0.738).

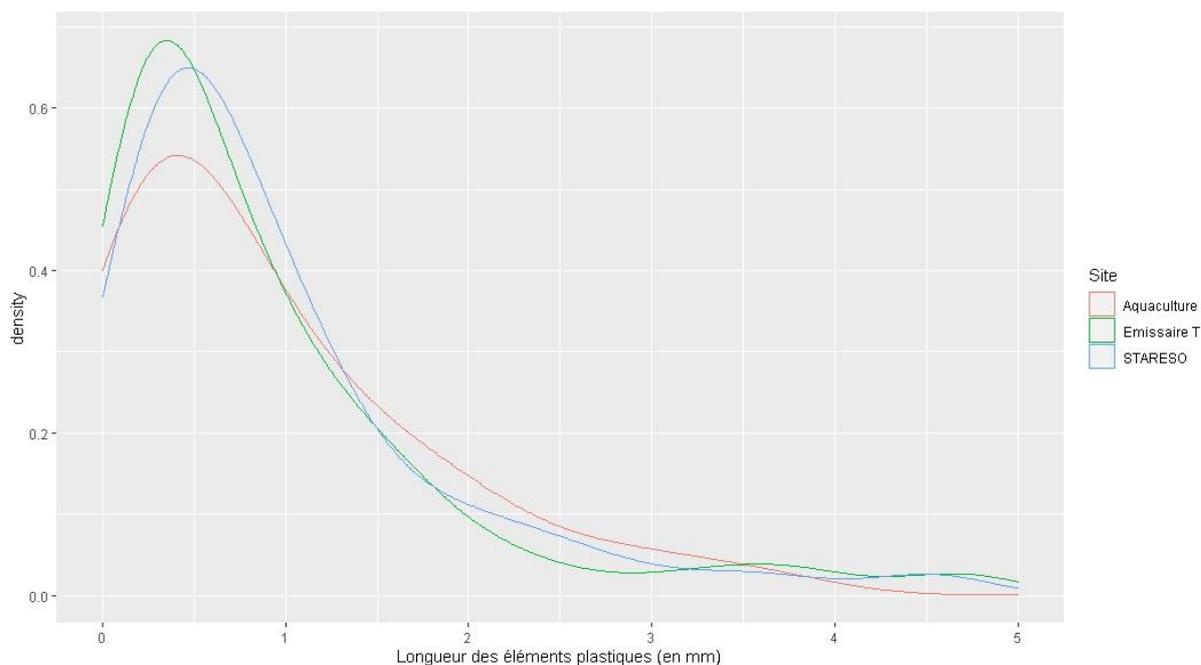


Figure 15 - Courbes de répartition des éléments plastiques d'une taille inférieure à 5 mm en fonction de leurs longueurs (en mm)

1.3. Influence du site de récolte sur les populations de plastiques en fonction de leur nature

Sur la période estivale et pour l'ensemble des sites, 595 éléments plastiques ont été recensés. Sur ces 595 éléments, les fibres et les filaments représentent 56.81 % des plastiques. 40,84 % sont des fragments, 1,51 % sont des films et 0.84 % sont des gommés. Excepté pour le site de l'Émissaire, les filaments et fibres sont les plastiques majoritaires suivis par les fragments. Le site de l'Émissaire présente quasiment la même proportion de fibres et de fragments, mais c'est aussi le seul site où des gommés ont été retrouvés.

Rapporté pour 10g/PF, le site de l'Émissaire se montre comme le site qui compte le moins de plastiques suivis par STARESO. Le site de l'aquaculture est le site qui compte le plus de plastique avec, en moyenne, 14 fibres/10g/PF et 15 fragments/10g/PF. Le site de l'Émissaire est le site où le moins de plastique ont été observés. Il ne semblerait pas y avoir de différence entre le site de STARESO et le site de l'Émissaire en ce qui concerne les fragments de plastiques (Figure 16). La figure 24 représente la répartition des plastiques recensés au niveau des trois sites de récolte en fonction de leurs natures pour les holothuries récoltées durant la période touristique.

Pour les trois sites, il est possible de montrer une différence statistique pour les fibres et les filaments (test ANOVA, p-value = 0.000453), les gommés (test Kruskal-Wallis, p-value = 0.00854) et les fragments (test Kruskal-Wallis, p-value = 0.0394) mais pas pour les films (test Kruskal-Wallis, p-value = 0.307). La figure 16 représente ces différences. Elle représente le nombre de plastiques répartis selon leurs natures pour chacun des sites.

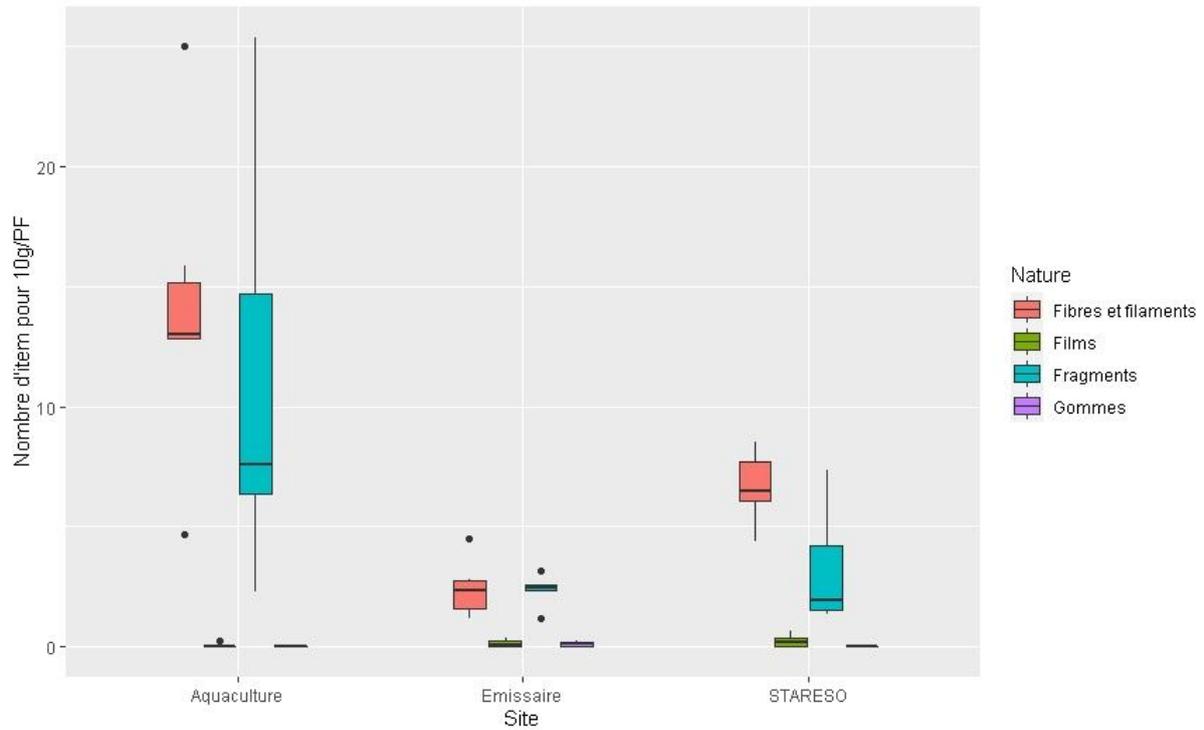


Figure 16 - Nombre d'item plastiques retrouvés pour 10 g/PF de tube digestif répartis selon le site de récolte et la nature des plastiques recensés

1. Comparaison entre la période touristique et la période creuse

2.1. Influence de la période sur le nombre d'items plastiques

Sur les holothuries récoltées hors de la période touristique – pour rappel, récolte opérée sur le site en avril 2021, 47 éléments plastiques ont été recensés. Dans ces éléments, 55.3 % sont des fibres et des filaments, 38.3 % sont des fragments, 4.3 % sont des gommes et 2.1 % sont des films. En moyenne, une holothurie de l'Émissaire contient 3.8 ± 1.4 éléments/10g_{PF} avec un maximum de 5.5 éléments et un minimum de 2.8 éléments pour 10g_{PF} de tube digestif. Durant la période touristique, en moyenne, une holothurie contient 5.0 ± 1.4 éléments/10g_{PF} avec un maximum de 7.2 éléments et un minimum de 3.7 éléments pour 10g_{PF} de tube digestif. Cependant, cette différence entre la période touristique et la période creuse n'est pas significative (test Student, p-value = 0.309).

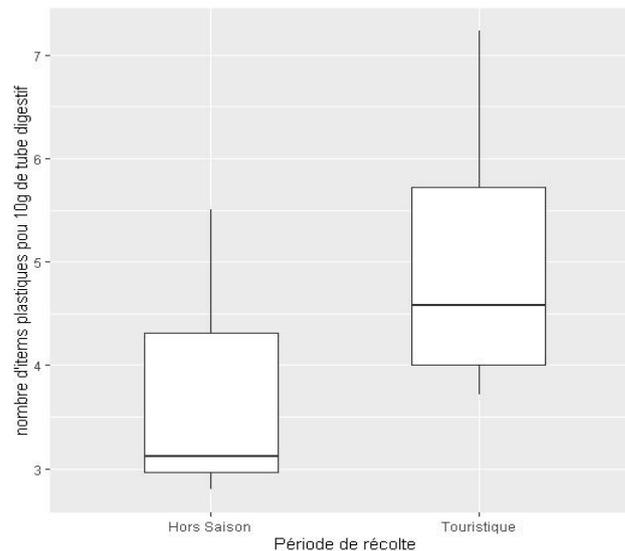


Figure 17 - Comparaison du contenu en plastiques des tubes digestifs des holothuries de l'Émissaire récoltées hors saison et durant la période touristique

2.2. Influence de la période sur la longueur des éléments plastiques

Pour la longueur des plastiques, les 47 éléments retrouvés dans les tubes digestifs des holothuries récoltées hors de la saison touristique font tous partie de la classe des micro-débris avec une taille maximale de 3 857,14 μm . La médiane des tailles des plastiques pour la période creuse correspond à une taille de 602.9 μm . Durant la période touristique, des plastiques de plus grande tailles que les micro-débris ont été retrouvés. Les micro-débris représentent 97.8 % des plastiques recensés. Il n'existe pas de différence significative pour la longueur des particules plastiques (Test Wilcoxon, p-value = 0.95). La Figure 18 représente les densités de répartition des plastiques selon leurs longueurs et permet de se rendre compte de la densité de répartition des fibres, des filaments et des fragments selon leurs longueurs sur les deux périodes de récolte.

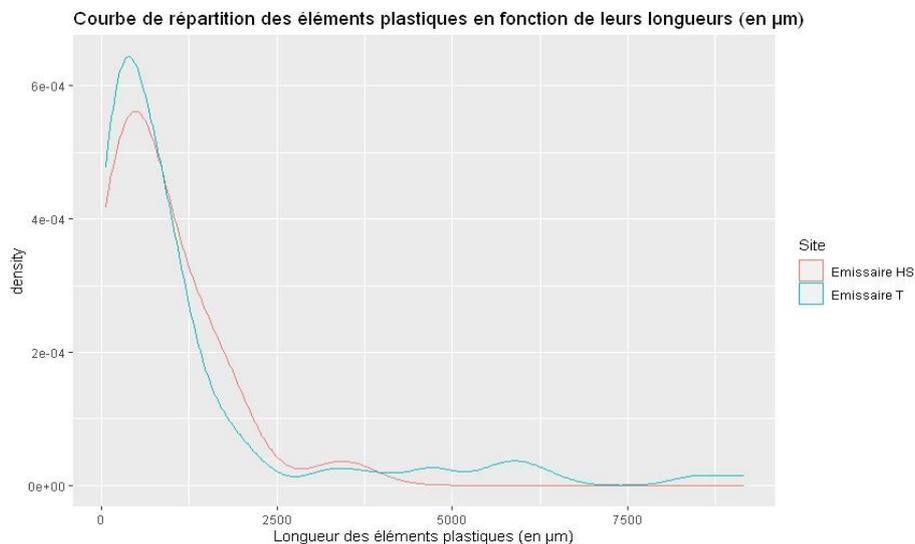


Figure 18 - Courbe de répartition des éléments plastiques des périodes touristiques et creuses du site de l'Emissaire en fonction de leurs longueurs (Emissaire HS = Emissaire lors de la période creuse, Emissaire T = Emissaire lors de la période touristique)

2.3. Influence de la période sur la composition des populations de plastiques

La figure 19 met en comparaison les différentes natures de plastiques rencontrés dans les tubes digestifs des holothuries récoltées durant la période touristique et lors de la période creuse. La comparaison des résultats obtenus pour les deux périodes ne permet pas de conclure à une différence significative entre les deux périodes, que ce soit pour les fibres et les filaments (test Student, p-value = 0.465), pour les films (test Wilcoxon, p-value = 1), pour les gommes (test Wilcoxon, p-value = 0.686) ou les fragments (test Student, p-value = 0.462). La figure 19 rend bien compte des similitudes de moyennes entre les deux périodes.

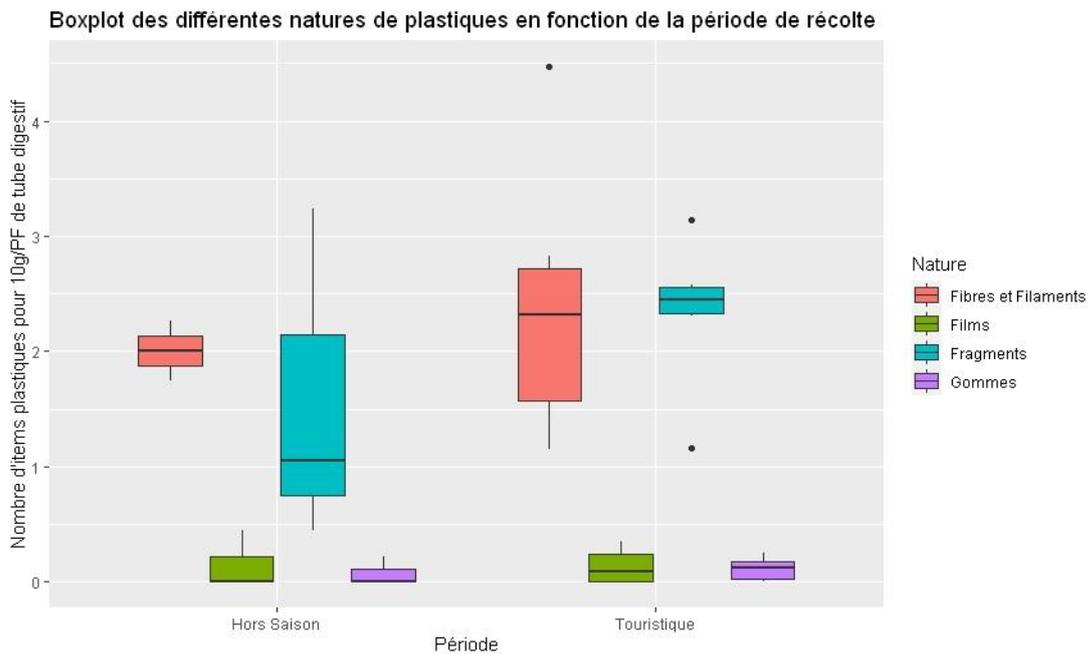


Figure 19 - Comparaison des contenus en plastique répartis selon leurs natures en fonction de la période de récolte

Discussion

1. Utilisation des holothuries comme bio-indicateurs de la pollution plastique

Durant cette étude, la moyenne d'éléments plastiques pour les trois sites de récoltes est de 30 ± 11 éléments par individu. Ramenée à 10 g_{PF} de tube digestif, cette moyenne est de 13 ± 11 éléments. Par rapport aux quantités mesurées dans l'archipel des îles Éoliennes en 2017 et au sud de l'île de Majorque en 2019 et 2020, les quantités mesurées en baie de Calvi sont 2 à 10 fois plus élevées (Renzi et al., 2020; Rios-Fuster et al., 2022). Des quantités de plastiques similaires à celles mesurées en baie de Calvi ont été observées chez des individus appartenant à l'espèce *Apostichus japonicus* élevés dans la mer de Bohai et la mer Jaune en 2017 et 2018, une zone du littoral chinois où les pressions anthropiques sont importantes (Mohsen et al., 2019). Les quantités de plastiques globales assez élevées dans la baie de Calvi pourraient être le témoignage des pressions touristiques importantes de la région.

Les résultats de cette étude ont permis de mettre en évidence les différences qui existent entre les trois sites de récolte. Les habitudes alimentaires des holothuries étudiées peuvent nous permettre d'étudier la pollution plastique du milieu sur des périodes de temps de l'ordre d'une année, mais aussi sur des périodes plus longues comme, par exemple, un suivi annuel de la pollution plastique du site choisi. En effet, lorsque les holothuries se nourrissent, elles ingèrent et remanient les premiers centimètres de sédiment. En faisant cela, les holothuries vont mettre au jour des plastiques qui sont enfouis dans le sédiment et qui se sont déposés sur le fond durant les années précédentes. De plus, les holothuries ingèrent de grandes quantités de sédiments estimées entre 9 et 82 $\text{kg individu}^{-1} \text{ année}^{-1}$ (Bulleri et al., 2021; Purcell et al., 2016). En étudiant plusieurs holothuries sur un site, il est possible de mettre en évidence la pollution chronique en plastiques dans les sédiments du dit site puisque les sédiments ingérés contiennent des plastiques qui étaient enfouis plus profondément.

D'autre part, le temps de rétention des sédiments chez *H. tubulosa* est relativement court. Cette espèce se nourrit en continu, c'est-à-dire que l'animal va se nourrir continuellement de sédiment et pousser les sédiments déjà présents dans le tube digestif vers l'anus. D'après de mesures effectuées sur plusieurs espèces qui possèdent ce type de comportement alimentaire, le temps de rétention des sédiments dans le tube digestif est compris entre 12 et 30 heures (Massin & Jangoux, 1976). Cela veut dire que les sédiments qui ont été étudiés dans cette étude sont les sédiments que l'holothurie a consommés

environ une journée avant l'échantillonnage et qu'il n'y a pas accumulation de ces sédiments dans le tube digestif de l'holothurie. Compte tenu de cela, il est raisonnable de penser que les sédiments ingérés par l'holothurie contiennent des plastiques qui se sont déposés sur le sédiment durant le 12 à 30 h précédant l'échantillonnage et qu'il n'y a peut-être pas accumulation de plastiques dans le tube digestif. Les quantités de plastiques mesurées dans les tubes digestifs pourraient être similaires à celles mesurées dans les sédiments. Il serait possible d'utiliser les holothuries d'une région comme bio-indicateur de la pollution plastique au cours du temps.

Cependant, les tests statistiques n'ont pas permis de montrer une différence significative entre la période touristique et la période creuse de l'année 2021. La figure 16 et la figure 17 décrivent les différences entre les deux périodes de récoltes. Plusieurs hypothèses peuvent nous permettre d'expliquer cette différence. Tout d'abord, les holothuries récoltées hors de la période touristique l'ont été à la fin du mois d'avril, le 27 avril 2021 pour être plus précis, et les holothuries récoltées lors de la période touristique l'ont été le 2 juin 2021. En observant le graphique des variations journalières de la population Corse (Figure 9), les différences d'échanges sont relativement faibles entre la fin avril et le début du mois de juin bien que celles-ci soient quand même visibles. De plus, les statistiques montrées dans ce graphique correspondent aux échanges sur l'ensemble du territoire corse. Cela veut dire que les échanges au niveau des deux grands aéroports de la Corse que sont l'aéroport de Bastia et l'aéroport d'Ajaccio sont aussi pris en compte. Ce comptage n'est pas forcément représentatif des variations de population dans la commune de Calvi.

La faible différence mesurée entre les deux périodes peut aussi être le fait des conditions particulières dans lesquelles se trouvait la Corse durant le 2^e et le 3^e semestre de l'année 2021. À cause de la pandémie de Covid-19, un 3^e confinement a été décrété par le gouvernement français entre le 17 mars et le 3 mai 2021 (*Décret n° 2021-296 du 19 mars 2021 modifiant le décret n° 2020-1310 du 29 octobre 2020 prescrivant les mesures générales nécessaires pour faire face à l'épidémie de covid-19 dans le cadre de l'état d'urgence sanitaire - Légifrance, s. d.*). Ce confinement a drastiquement fait chuter le tourisme en Corse qui, sur le mois d'avril 2021, a subi une diminution de plus de 80 % des hébergements par rapport à l'année 2019 (Figure 20). Ce niveau de 2019 n'est à nouveau atteint que lors du mois de juillet 2021 (*Bilan économique 2021 - Corse - Insee Conjoncture Corse - 39, s. d.*). Il est donc probable que le tourisme particulièrement faible

n'ait pas causé de dépassement de la capacité de traitement de la station de traitement des eaux usées de la ville de Calvi. Pour rappel, la capacité de traitement de la station de traitement des eaux usées de Calvi est de 60 000 habitants. Il est donc possible que, comme il n'y a pas eu de dépassement de la capacité de traitement, les rejets de plastiques via l'Émissaire des eaux usées aient été plus faibles qu'en temps normal. De plus, avec moins de touristes en Corse, cela représente une consommation plus faible qu'en pleine période touristique. La consommation est donc en diminution et le nombre de plastiques rejetés dans la nature est plus faible par rapport à une année touristique normale.

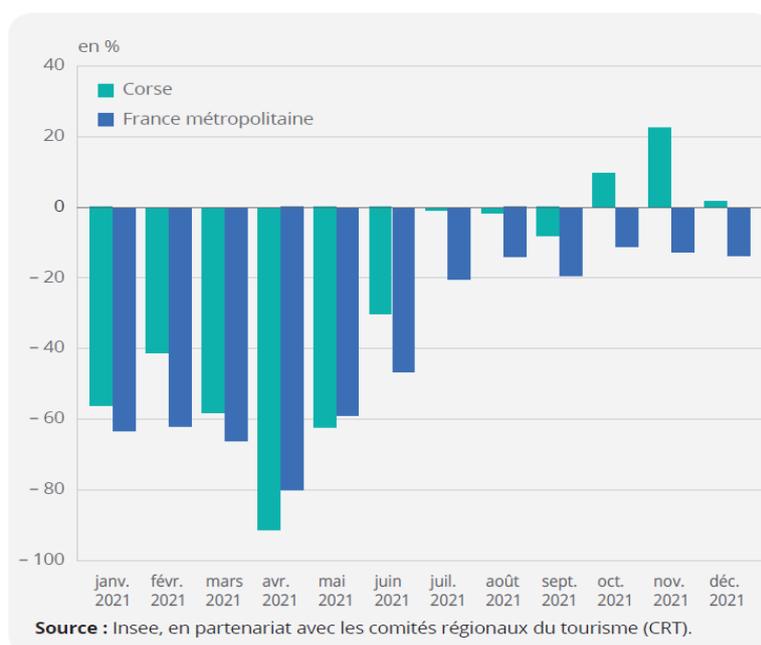


Figure 20 - Évolution du nombre de nuitées totales dans les hôtels par rapport au même mois de 2019 (*Bilan économique 2021 - Corse - Insee Conjoncture Corse - 39, s. d.*)

2. Comparaison des trois sites entre eux

2.1. Quantités de plastiques entre les sites et entre les deux périodes

Les résultats par sites des différentes holothuries ont permis de mettre en évidence des différences significatives entre les trois sites concernant les quantités de plastiques, différences très bien marquées sur le graphe de la figure 13. Dans les trois sites étudiés, le site de la ferme aquacole est celui qui présente le plus de plastiques avec 25.8 ± 10.2 éléments/10g/PF. En comptant le nombre d'éléments plastiques par individu, la moyenne est de 39 ± 9 éléments. Cette forte concentration en plastiques dans les sédiments sous la ferme aquacole semble être le témoignage de l'utilisation intensive de plastiques dans l'aquaculture. En effet, pour pouvoir résister aux conditions du milieu marin, les fermes aquacoles cherchent à avoir le matériel le plus résistant possible et les plastiques

permettent d'obtenir ce genre de résultat, et ce, pour, à peu près, tous les types d'aquacultures (Bringer et al., 2021; Park & Kim, 2013).

À l'opposé du site de la ferme aquacole, le site de l'Émissaire des égouts de Calvi présente le taux de plastiques le plus faible, plus faible que celui de notre site de référence, le site de STARESO. Pourtant, il n'est pas déraisonnable de penser que l'Émissaire des égouts de la ville de Calvi a une influence sur le milieu qui l'entoure. Il a été montré que les infrastructures de traitement des eaux usées sont une importante source de pollution plastique (Wang et al., 2022; Yaseen et al., 2022). L'influence de l'Émissaire peut être observée dans les données de la masse du tube digestif des holothuries, car c'est au niveau de l'Émissaire que les plus grosses holothuries ont été retrouvées avec une masse du tube digestif moyenne de $69.24 \pm 13,81$ g/PF. Cette masse plus importante pourrait être causée par les apports en matière organique via les eaux usées de la ville de Calvi. Cette différence surprenante peut être expliquée en regardant l'hydrodynamique de la baie de Calvi. Lorsqu'il n'y a pas de vents forts entraînant un forçage, la baie de Calvi est soumise à une circulation anticyclonique des masses d'eau dans sa moitié Ouest et une circulation cyclonique dans sa moitié Est. Cette circulation anticyclonique fait circuler les masses d'eau depuis la pointe de la citadelle de Calvi vers la pointe de la Revellate (Skliris et al., 2001). Cette circulation participe probablement à la dispersion des plastiques rejetés dans la colonne d'eau par l'Émissaire des eaux usées de Calvi ayant une densité proche de celle de l'eau de mer alors que les plastiques ayant une densité plus importante que l'eau de mer, comme les fragments et les gommages, sont transportés à des distances plus faibles et restent dans un périmètre relativement proche de l'Émissaire. La présence de bandelettes métalliques au niveau de l'émissaire et l'absence totale de ces bandelettes sur les autres sites permettent d'abonder dans le sens de cette hypothèse.

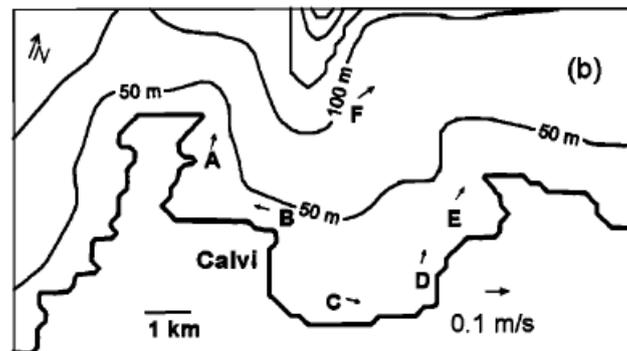


Figure 21 - Schéma de la circulation des masses d'eau dans la baie de Calvi (Skliris et al., 2001)

Un autre facteur permettant d'expliquer la différence qui existe entre le site de l'Émissaire et STARESO, c'est la présence de l'herbier de posidonie au niveau du transect alors qu'autour de l'Émissaire des eaux usées, l'environnement correspond plus à des zones de sables sans aucun herbier (Figure 10). L'herbier de *Posidonia oceanica*, par sa présence, joue un rôle de barrière physique. Par leurs présences, les herbiers de posidonies génèrent des zones à l'hydrodynamique plus calme qu'aux alentours, ce qui favorise la sédimentation des plastiques et des particules en suspension au niveau des herbiers de posidonies (Gobert & Abadie, 2018; Sanchez-Vidal et al., 2021). Ces particules plastiques pouvant rester en suspension durant de longues périodes, il peut y avoir la formation de biofilms autour de ces plastiques, ce qui va faciliter la sédimentation des particules plastiques en augmentant légèrement la densité des particules. Ce phénomène est appelé « Biofouling » ou « Encrassement Biologique », en français (Amaral-Zettler et al., 2021; Kaiser et al., 2017).

La présence des herbiers au niveau de STARESO et de la ferme aquacole pourrait permettre d'expliquer la quantité de plastiques plus élevée dans le tube digestif des holothuries du site de STARESO par rapport à l'Émissaire. La présence d'un herbier au niveau de la ferme aquacole pourrait permettre de retenir les plastiques générés par cette même ferme que les courants de surface feraient dériver vers l'Est (Skiriris et al., 2001) si l'herbier n'était pas présent. Le fait que les plastiques dont la densité proche de celle de l'eau de mer puissent être transportés par les courants peut aussi être visible dans les compositions en plastiques des échantillons, car le site de l'Émissaire est le seul où des gommages ont été retrouvés alors que des films et des fibres ont été retrouvés sur l'ensemble des sites d'échantillonnage.

2.2. Composition en plastiques en fonction de leurs natures

Les éléments majoritaires dans les plastiques étudiés sont les fibres et les filaments qui, sur l'ensemble de mes observations, représentent 56.5 % des plastiques. Cette prévalence des fibres et filaments dans les particules plastiques retrouvées dans les tubes digestifs d'holothuries coïncide avec les résultats d'autres études menées sur des holothuries dans d'autres parties du monde (Plee & Pomory, 2020; Rios-Fuster et al., 2022). Cependant, la proportion de fragments diffère fortement de celle mesurée dans le tube digestif d'holothuries provenant d'autres études. Dans plusieurs études, les scientifiques ont remarqué que la quantité de fibres dans le tube digestif des holothuries de Méditerranée approchait souvent des 80 % de fibres pour la totalité des plastiques observés alors que les fragments représentent environ 12 à 15 % des plastiques observés (Renzi et al., 2020; Rios-Fuster et al., 2022) (Figure 22).

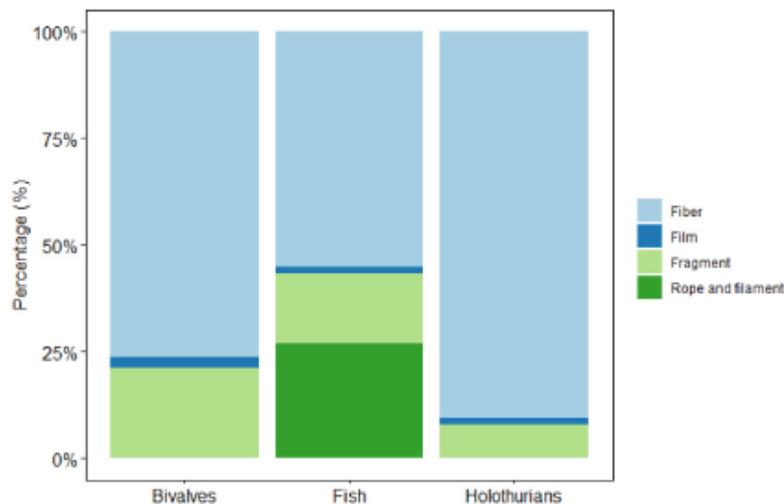


Figure 22 - Proportion des différentes catégories de plastiques détectées dans des bivalves, des poissons et des holothuries (Rios-Fuster et al., 2022)

Dans les mesures de cette étude, les parts de fragments correspondent à 30 à 50 % des plastiques observés au niveau des différents sites. La possibilité que cela soit causé par des conditions très particulières dans la baie de Calvi semble fort peu probable, car Martin, dans son mémoire, n'a pas trouvé de résultats similaires aux résultats de ce travail concernant la proportion de fragments dans ses échantillons. Il y a eu probablement surestimation concernant le nombre de fragments, mais aussi une confusion possible entre la catégorie des fibres et des filaments et la catégorie de fragments. Il est tout à fait possible que, durant les observations à la loupe binoculaire, des particules de sédiments aient été confondues avec des particules plastiques. Le test de l'aiguille chaude permet la

différenciation des fibres plastiques et des fibres organiques, mais n'est pas utilisée pour les fragments les plus petits.

Une question concernant la classification utilisée dans l'étude peut aussi être posée. En effet, la définition des fragments est assez floue puisqu'ils ne s'agit que de petits morceaux de plastiques. Certains morceaux de filaments peuvent poser la question de savoir dans quelle catégorie ils peuvent être classés. Pour les plus petits morceaux de filament, il a donc été décidé de les classer dans les fragments, car, selon nous, il s'agissait de fragments de filament. La Figure 23 montre un exemple de ce genre de dilemme rencontré durant les observations. De plus, la différenciation visuelle était la seule méthode disponible pour différencier un fragment de plastiques d'une particule sédimentaire d'une couleur pouvant faire penser à des plastiques.

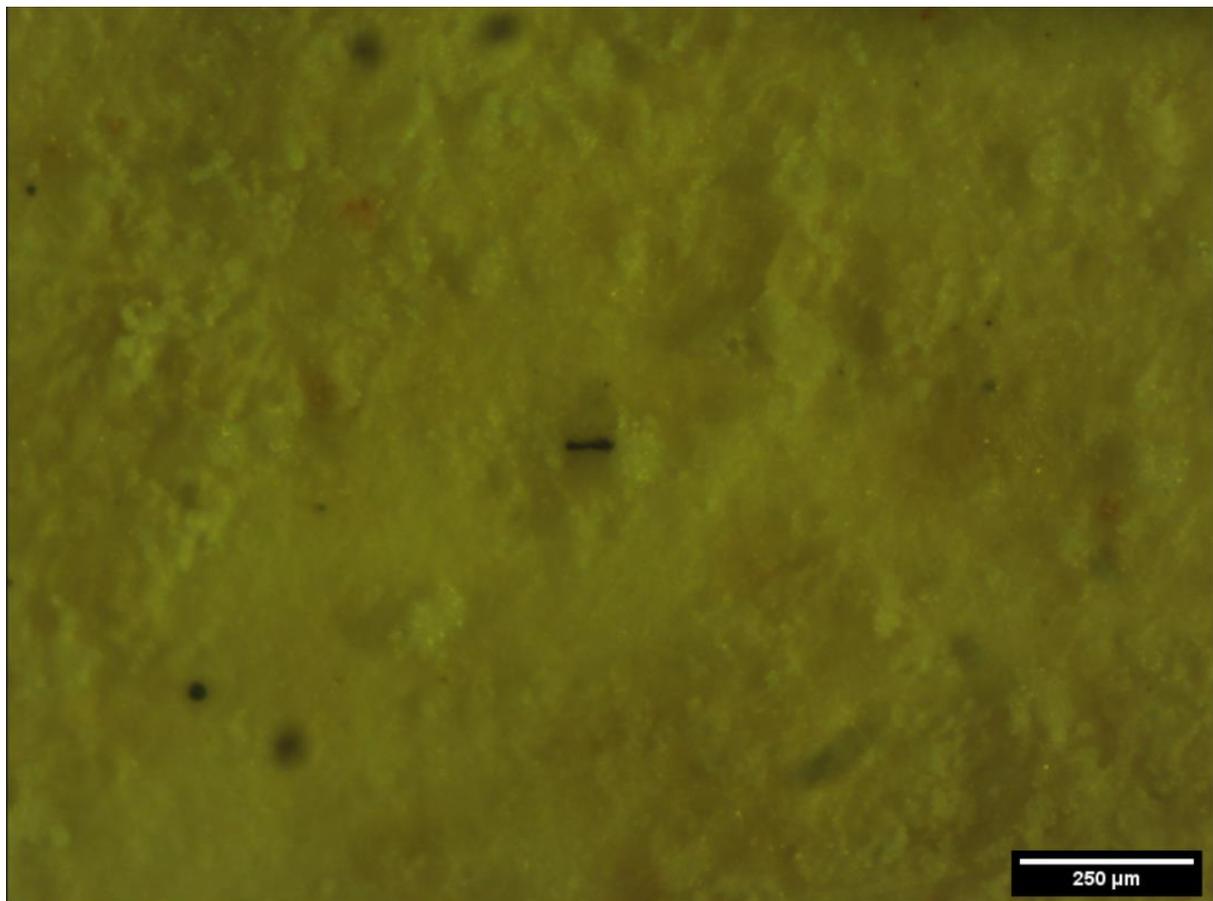


Figure 23 - Fragment de fibre au centre de l'image pour lequel la question de la classification a été posée (photo personnelle)

Au niveau de la taille des débris, les résultats obtenus suivent la même tendance que dans d'autres études sur l'ingestion de plastiques par des holothuries, réalisées en mer Jaune et mer de Bohai en 2017 et 2018, à Pangkor Island en Malaisie et dans l'archipel des îles Éoliennes en 2017. Dans leurs résultats, ces études montrent que les plastiques ingérés sont, en très grande majorité, des micro-débris suivis par quelques méso-débris (Mohsen et al., 2019; Muhammad Husin et al., 2021; Renzi et al., 2020). Les résultats obtenus en baie de Calvi se distinguent par rapport aux autres études, car un macro-débris a été observé dans le tube digestif d'une holothurie du site de l'Émissaire. Il s'agissait d'un long filament de 22 802 μm de long. La présence d'un macro-débris au niveau de l'Émissaire nous suggère que des éléments plus gros se trouvent au niveau de ce site. Le fait qu'un élément de cette taille ait été retrouvé dans le tube digestif d'holothurie est qu'il a été retrouvé dans le tube digestif d'un individu de *H. tubulosa*, la plus grande des deux espèces. Cette espèce est possiblement capable d'ingérer des plastiques de grandes tailles. Martin, lors de son mémoire avait, lui aussi, trouvé un macro-débris dans le tube digestif d'une holothurie de l'espèce *H. tubulosa*.

La taille mesurée de ces macro-débris et des débris recensés semble être la véritable taille de ces plastiques, car le processus de digestion ne modifie pas leur taille (Bulleri et al., 2021). Durant la digestion, les sédiments, dans lesquels se trouvent les éléments plastiques, sont malaxés et broyés au niveau du bulbe pharyngien et de l'estomac. Cette étape de la digestion réduit donc la taille des sédiments (Massin, 1982). Il semble donc possible que les éléments plastiques présents dans les sédiments ingérés subissent une réduction de leur taille, eux aussi. Pourtant, les plastiques étudiés dans les pseudofèces de *H. tubulosa* ont une taille similaire à celle des plastiques présents dans les sédiments (Bulleri et al., 2021). Cela veut donc dire que la taille des plastiques est très proche de celle mesurée dans des sédiments. Pour étudier la taille des plastiques dans les sédiments, les holothuries sont une bonne solution pour l'échantillonnage.

Pour que les holothuries de la baie de Calvi puissent servir de bio-indicateur de la pollution en plastiques, il est nécessaire de vérifier si la concentration en plastique dans les tubes digestifs est identique, proportionnelle ou bien différente de celle des sédiments. Dans une étude 2009, les docteurs Graham et Thompson ont montré que lors du nourrissage, les holothuries ont tendance à ingérer préférentiellement des particules plastiques présentes dans les sédiments (Graham & Thompson, 2009). De plus, il semblerait que les holothuries ingèrent aussi en priorité des filaments plastiques, même si

les sédiments sont majoritairement pollués par des films plastiques (Renzi et al., 2018). La forte proportion de filament dans le tube digestif peut aussi être expliquée par le fait que ces éléments sont plus difficiles à évacuer du corps de l'animal. En effet, une étude de 2021 a mis en évidence une proportion faible de filaments dans les pseudofèces des holothuries. Malgré la quantité importante de filaments plastiques dans le tube digestif, la quantité de filaments plastiques dans les pseudofèces ne diffère pas de la quantité de filament dans les sédiments (Bulleri et al., 2021). Au vu des éléments cités, il semblerait que les plastiques présents dans les tubes digestifs des holothuries ne reflètent pas parfaitement les quantités de plastiques dans les sédiments que ce soit en termes de composition ou de quantité.

3. Améliorations possibles et ouverture pour de futures recherches

Tout d'abord, il est tout à fait probable que la quantité de fragments dans les échantillons de cette étude ait été surestimée et certaines améliorations pourraient être mises en place pour éviter cet écueil à l'avenir. La première chose qui pourrait être mise en place serait un double comptage des plastiques par deux personnes différentes. La perception différant entre les deux personnes, ça permettrait de faire une moyenne des deux comptages pour chacun des échantillons ce qui permettrait de se rapprocher de la véritable valeur. Une autre méthode qui pourrait être couplée au comptage visuel serait le comptage par spectroscopie infrarouge par transformée de Fourier qui permettrait de déterminer la nature des fibres observées pour différencier les fibres naturelles et plastiques, et ce, de manière plus automatisée.

En ce qui concerne la différence entre les périodes, une étude menée sur toute une année permettrait, très certainement, d'obtenir des résultats probants. En échantillonnant les trois sites de la baie de Calvi, il serait très certainement possible de mettre en évidence une variation de concentration en plastique durant toute l'année et de voir si cette variation peut être mise en corrélation avec le tourisme en Corse. Un échantillonnage de 3 holothuries par mois sur les trois sites étudiés dans cette étude serait suffisant pour mettre en évidence la variation temporelle des moyennes. En faisant cela, il serait peut-être possible de voir si la station d'épuration de la commune de Calvi et sa capacité de 60 000 habitants est suffisante pour traiter les eaux usées de tous les touristes qui passent par la ville de Calvi.

Enfin, la mise en place d'une étude pour déterminer la proportion qui existe entre les plastiques dans les sédiments et ingérés par *H. tubulosa* et *H. poli* permettrait une comparaison des contenus en plastiques dans le tube digestif avec une masse de sédiment du même site identique à celle des sédiments contenu dans le tube digestif. Cette comparaison permettrait probablement de déterminer la proportion qui existe entre les sédiments du sites et les sédiments ingérés, et ce pour chaque type de plastiques et pour leurs quantités globales. Cette mise en évidence permettrait alors de déterminer la quantité absolue de plastique pour chaque gramme de sédiments dans une zone donnée. Cette proportionnalité étant toujours une donnée manquante pour nous permettre d'utiliser les holothuries comme bio-indicateurs de la pollution plastique absolue de la baie de Calvi.

Conclusion

Pour rappel, nos objectifs dans cette étude étaient de voir s'il était possible d'utiliser les holothuries, et plus particulièrement *Holothuria tubulosa* et *Holothuria poli*, comme bio-indicateur de la pollution plastique d'un milieu.

L'étude menée pour préparer ce travail permet d'arriver à la conclusion qu'en effet, les holothuries peuvent être utilisées pour étudier la pollution plastique d'un milieu. Les deux espèces étudiées, sont abondantes dans la baie de Calvi et largement réparties dans toute la Méditerranée. Les deux espèces sont faciles à observer et à récolter. De plus, ces deux espèces sont relativement sédentaires. Elles restent donc généralement dans la même zone ne se déplaçant que très peu pour trouver des sédiments plus riches en matières organiques.

Nos observations ont permis de mettre en évidence que toutes les holothuries récoltées avaient ingéré des plastiques. Les quantités de plastiques sont très différentes d'autres sites en Méditerranée et montrent une pollution plastique plus importante dans la baie de Calvi. Il a aussi été possible de mettre en évidence des différences de concentration entre les holothuries des trois sites, ce qui suggère des niveaux de pollution plastique différents entre les sites. Il n'a pas été possible de mettre en évidence une différence entre les deux périodes de récoltes, mais il semble que l'explication vienne de l'année de récolte et des restrictions mises en place par les institutions françaises lors de la pandémie de Covid-19. Des études supplémentaires seront donc nécessaires pour révéler les différences qui existent entre la période touristique et la période creuse. Une étude menée sur toute une année avec des échantillonnages réguliers au niveau du site de l'Émissaire et de STARESO permettrait certainement de mettre en évidence la variation « naturelle » de la concentration en plastiques dans les sédiments ingérés et l'impacte de la période de l'année sur la concentration en plastiques.

Bien que l'ingestion de plastique ait été confirmée, il semble que la concentration et la composition de la population de plastiques ingérés diffèrent de ceux présents dans les sédiments. Des investigations supplémentaires sont nécessaires pour trouver la relation entre les concentrations de différentes natures de plastiques dans les sédiments et dans les tubes digestifs des holothuries. Il est cependant possible d'utiliser les holothuries pour mesurer une variation relative de la pollution par rapport à un site donné, car des différences ont été visibles dans les résultats obtenus.

Remerciements

Pour commencer, je tiens à remercier chaleureusement Sylvie GOBERT, ma promotrice, pour tous les conseils qu'elle m'a fournis tout au long de cette période éprouvante, mais aussi pour l'occasion rêvée de m'exercer à la transmission du savoir scientifique lors de la semaine passée fin avril à la station STARESO avec les gagnants du concours Corsica. Cette semaine fut magnifique et un point en plus sur la liste des avantages qui me poussent à envisager un doctorat et à m'engager dans la longue voie de la recherche scientifique.

Je tiens aussi à remercier Cédric DELFORGE et Gilles LEPOINT pour eux aussi, leurs conseils et leur aide précieuse durant les manipulations et pour la mise à disposition du matériel indispensable à la bonne réalisation de ce travail. Cédric, je n'aurais qu'une seule chose à dire : « Qu'est-ce que nous ferions sans toi ? ». Je remercie aussi Xavier Raick pour l'aide apportée pour la première dissection réalisée avant de commencer les manipulations.

Je tiens aussi à remercier mes compagnons de pause-café et collègues de laboratoire durant ces sept derniers mois : Jérôme, Suzie, Mathilde, Jan et Chiara. Ce fut un plaisir de travailler avec vous et j'espère que nous pourrons continuer de nous voir et de boire du café (ou tout autre boisson) ensemble. Jérôme et Suzie, j'espère aussi que nous pourrons un jour faire une plongée ensemble, une fois la deuxième étoile atteinte.

Ensuite, je souhaite remercier les membres de ma famille. Mes parents, dans un premier temps, pour le soutien indéfectible dont ils ont fait preuve durant toute mes études et qui continuent, encore aujourd'hui de me soutenir dans mes projets même si, à un moment, « je commence à pédaler dans la choucroute ». Dans un second temps, mon frère et ma sœur, pour les nombreuses pauses-café réalisées durant toute la période de mes études, mais aussi pour la patience dont ils ont fait preuve pendant que je me plaignais que mes sessions d'examens étaient trop longues et que j'en avais marre.

Enfin, je souhaite remercier les élèves de l'Athénée Royale Thil Lorrain de Vervier, gagnants du concours Corsica pour la semaine passée à la station STARESO avec eux. Je souhaite remercier plus particulièrement Colin LEDENT, pour son aide apportée à la récolte d'holothuries dans le port de STARESO pour des expérimentations ultérieures. Même si elles n'ont pas servi dans ce mémoire, elles me serviront très certainement pour les expérimentations de mon potentiel doctorat.

Table des abréviations

PE	Polyéthylène
PVC	Polychlorure de vinyle
PU	Polyuréthane
ABS	Acrylonitrile Butadiène Styrène
g/PF	Grammes en poids frais
MP	Micro-plastiques

Annexes

Echantillons	Code	Site	Profondeur (en m)	Espèce	Date de Récolte	Période	Masse du tube digestif (en g)	Nombre d'items plastiques	# Fibres et filaments	# Films	# Gommages	# Fragments
1	HE02062021-17	Emissaire	35	<i>H. tubulosa</i>	02/06/2021	Touristique	77,95	29	9	0	2	18
2	HE02062021-11	Emissaire	35	<i>H. tubulosa</i>	02/06/2021	Touristique	58,1	42	26	2	0	14
3	HE02062021-08	Emissaire	35	<i>H. poli</i>	02/06/2021	Touristique	54,1	32	13	1	1	17
4	HE02062021-06	Emissaire	35	<i>H. tubulosa</i>	02/06/2021	Touristique	60,1	24	17	0	0	7
5	HE02062021-09	Emissaire	35	<i>H. tubulosa</i>	02/06/2021	Touristique	89,1	36	12	0	1	23
6	HE02062021-19	Emissaire	35	<i>H. tubulosa</i>	02/06/2021	Touristique	76,1	39	17	2	1	19
7	HS07072021-01	STARESO	10	<i>H. tubulosa</i>	07/07/2021	Touristique	30,5	42	26	1	0	15
8	HS07072021-02	STARESO	10	<i>H. poli</i>	07/07/2021	Touristique	14,9	24	12	1	0	11
9	HS07072021-03	STARESO	10	<i>H. tubulosa</i>	07/07/2021	Touristique	30	25	20	1	0	4
10	HS07072021-04	STARESO	10	<i>H. poli</i>	07/07/2021	Touristique	25,2	21	16	0	0	5
11	HS07072021-05	STARESO	10	<i>H. tubulosa</i>	07/07/2021	Touristique	43,5	25	19	0	0	6
12	HS07072021-06	STARESO	10	<i>H. tubulosa</i>	07/07/2021	Touristique	31,8	25	19	0	0	6
13	HA21062021-01	Aquaculture	22	<i>H. tubulosa</i>	21/06/2021	Touristique	6,3	26	10	0	0	16
14	HA21062021-02	Aquaculture	22	<i>H. tubulosa</i>	21/06/2021	Touristique	13,1	39	17	0	0	22
15	HA21062021-03	Aquaculture	22	<i>H. tubulosa</i>	21/06/2021	Touristique	22,7	43	29	0	0	14
16	HA21062021-04	Aquaculture	22	<i>H. poli</i>	21/06/2021	Touristique	13,2	36	33	0	0	3
17	HA21062021-05	Aquaculture	22	<i>H. poli</i>	21/06/2021	Touristique	16,8	36	22	0	0	14
18	HA21062021-06	Aquaculture	22	<i>H. poli</i>	21/06/2021	Touristique	44,9	53	21	1	0	31
19	HE27042021-01	Emissaire	33	<i>H. tubulosa</i>	27/04/2021	Hors Saison	57,2	16	10	0	0	6
20	HE27042021-02	Emissaire	33	<i>H. tubulosa</i>	27/04/2021	Hors Saison	44,8	14	9	2	1	2
21	HE27042021-03	Emissaire	33	<i>H. poli</i>	27/04/2021	Hors Saison	30,9	17	7	0	0	10

Tableau 1 - Résultats des comptages visuels des items plastiques

Echantillons	Code	Site	Profondeur (en m)	Espèce	Date de Récolte	Période	Masse du tube digestif (en g)	items/10g/PF	Fibres/10g/PF	films/10g/PF	gommes/10g/PF	fragments/10g/PF
1	HE02062021-17	Emissaire	35	<i>H. tubulosa</i>	02/06/2021	Touristique	77,95	3,720333547	1,154586273	0	0,256574727	2,309172547
2	HE02062021-11	Emissaire	35	<i>H. tubulosa</i>	02/06/2021	Touristique	58,1	7,228915663	4,475043029	0,344234079	0	2,409638554
3	HE02062021-08	Emissaire	35	<i>H. poli</i>	02/06/2021	Touristique	54,1	5,914972274	2,402957486	0,184842884	0,184842884	3,14232902
4	HE02062021-06	Emissaire	35	<i>H. tubulosa</i>	02/06/2021	Touristique	60,1	3,993344426	2,828618968	0	0	1,164725458
5	HE02062021-09	Emissaire	35	<i>H. tubulosa</i>	02/06/2021	Touristique	89,1	4,04040404	1,346801347	0	0,112233446	2,581369248
6	HE02062021-19	Emissaire	35	<i>H. tubulosa</i>	02/06/2021	Touristique	76,1	5,124835742	2,23390276	0,262812089	0,131406045	2,496714849
7	HS07072021-01	STARESO	10	<i>H. tubulosa</i>	07/07/2021	Touristique	30,5	13,7704918	8,524590164	0,327868852	0	4,918032787
8	HS07072021-02	STARESO	10	<i>H. poli</i>	07/07/2021	Touristique	14,9	16,10738255	8,053691275	0,67114094	0	7,382550336
9	HS07072021-03	STARESO	10	<i>H. tubulosa</i>	07/07/2021	Touristique	30	8,333333333	6,666666667	0,333333333	0	1,333333333
10	HS07072021-04	STARESO	10	<i>H. poli</i>	07/07/2021	Touristique	25,2	8,333333333	6,349206349	0	0	1,984126984
11	HS07072021-05	STARESO	10	<i>H. tubulosa</i>	07/07/2021	Touristique	43,5	5,747126437	4,367816092	0	0	1,379310345
12	HS07072021-06	STARESO	10	<i>H. tubulosa</i>	07/07/2021	Touristique	31,8	7,86163522	5,974842767	0	0	1,886792453
13	HA21062021-01	Aquaculture	22	<i>H. tubulosa</i>	21/06/2021	Touristique	6,3	41,26984127	15,87301587	0	0	25,3968254
14	HA21062021-02	Aquaculture	22	<i>H. tubulosa</i>	21/06/2021	Touristique	13,1	29,77099237	12,97709924	0	0	16,79389313
15	HA21062021-03	Aquaculture	22	<i>H. tubulosa</i>	21/06/2021	Touristique	22,7	18,94273128	12,7753304	0	0	6,167400881
16	HA21062021-04	Aquaculture	22	<i>H. poli</i>	21/06/2021	Touristique	13,2	27,27272727	25	0	0	2,272727273
17	HA21062021-05	Aquaculture	22	<i>H. poli</i>	21/06/2021	Touristique	16,8	21,42857143	13,0952381	0	0	8,333333333
18	HA21062021-06	Aquaculture	22	<i>H. poli</i>	21/06/2021	Touristique	44,9	11,80400891	4,677060134	0,222717149	0	6,904231626
19	HE27042021-01	Emissaire	33	<i>H. tubulosa</i>	27/04/2021	Hors Saison	57,2	2,797202797	1,748251748	0	0	1,048951049
20	HE27042021-02	Emissaire	33	<i>H. tubulosa</i>	27/04/2021	Hors Saison	44,8	3,125	2,008928571	0,446428571	0,223214286	0,446428571
21	HE27042021-03	Emissaire	33	<i>H. poli</i>	27/04/2021	Hors Saison	30,9	5,501618123	2,265372168	0	0	3,236245955

Tableau 2 - Tableau des comptages des items plastiques ramenés pour 10g de tube digestif en poids frais

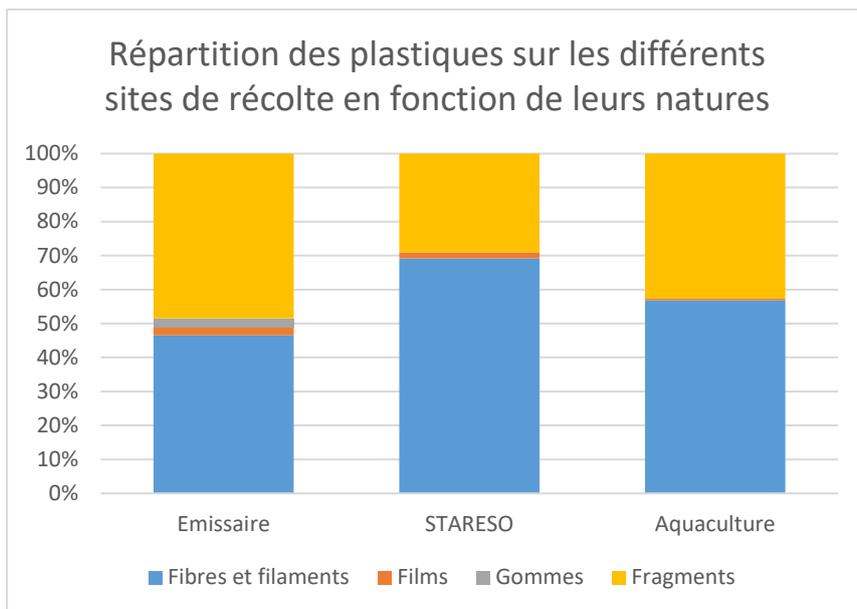


Figure 24 - Répartition des plastiques selon leurs natures sur les différents sites de récoltes lors de la période touristique. Chaque couleur correspond à une nature de plastique.

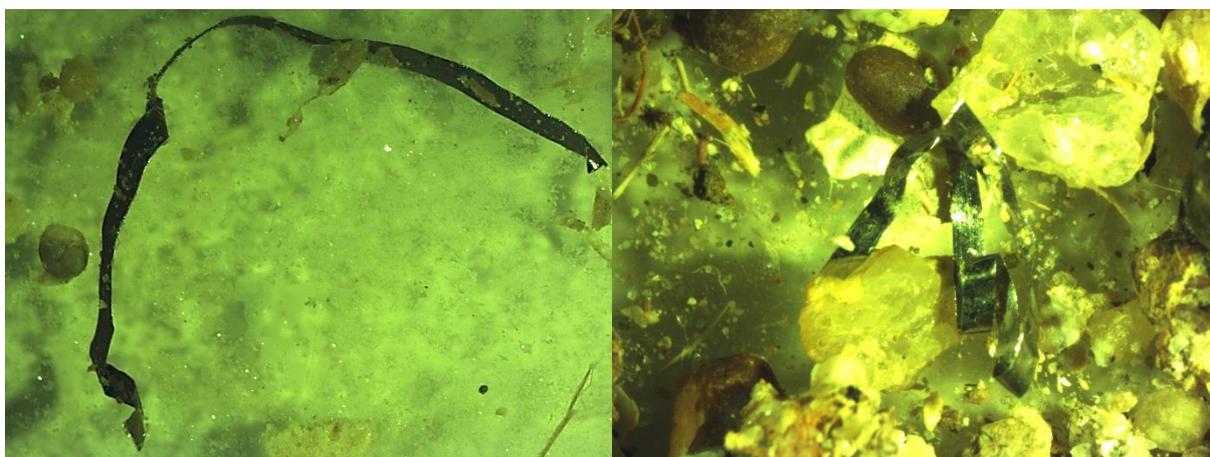


Figure 25 - bandelettes métalliques retrouvées dans le tube digestif d'holothuries provenant du site de l'émissaire

Bibliographie

- Amaral-Zettler, L. A., Zettler, E. R., Mincer, T. J., Klaassen, M. A., & Gallagher, S. M. (2021). Biofouling impacts on polyethylene density and sinking in coastal waters : A macro/micro tipping point? *Water Research*, 201, 117289. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117289>
- Aydin, M. (2009). La pêche commerciale d'holothuries en Turquie. *Bulletin de la CPS*, 28, 2.
- Bardanis, E., & Batjakas, I. (2018). *Reproductive cycle of Holothuria poli in Gera gulf, Lesvos island, Greece*. 2.
- Barnes, D. K. A., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 1985-1998. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0205>
- Bilan économique 2021—Corse—Insee Conjoncture Corse—39*. (s. d.). Consulté 20 août 2022, à l'adresse <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6324673>
- Bioindicateur. (2022). In *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Bioindicateur&oldid=189703569>
- Bioindicateur : Définition et explications*. (s. d.). AquaPortail. Consulté 28 juillet 2022, à l'adresse <https://www.aquaportail.com/definition-411-bioindicateur.html>
- Bolleyn, A. G., Torre, V., & Tirrotoni, A. (2018). *Bilan annuel du tourisme—2017*. Direction régionale de l'Insee Corse. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiqz4Cr7t72AhWJ3YUKHXrFB0IQFnoECAyQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.insee.fr%2Ffr%2Fstatistiques%2Ffichier%2F3545896%2Fco_ind_09.pdf&usg=AOvVaw0n0HNY1Ho7PAZfKkdaDdNW
- Boucher, J., & Billard, G. (2020). *The Mediterranean : Mare Plasticum*. IUCN. <https://portals.iucn.org/library/node/49124>
- Bradney, L., Wijesekara, H., Palansooriya, K. N., Obadamudalige, N., Bolan, N. S., Ok, Y. S., Rinklebe, J., Kim, K.-H., & Kirkham, M. B. (2019). Particulate plastics as a vector for toxic trace-element uptake by aquatic and terrestrial organisms and human health risk. *Environment International*, 131, 104937. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104937>

- Brennecke, D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I., & Canning-Clode, J. (2016). Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 178, 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>
- Bringer, A., Le Floch, S., Kerstan, A., & Thomas, H. (2021). Coastal ecosystem inventory with characterization and identification of plastic contamination and additives from aquaculture materials. *Marine Pollution Bulletin*, 167, 112286. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112286>
- Bulleri, F., Ravaglioli, C., Anselmi, S., & Renzi, M. (2021). The sea cucumber *Holothuria tubulosa* does not reduce the size of microplastics but enhances their resuspension in the water column. *Science of the Total Environment*, 781. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146650>
- Conand, C. (1993). Reproductive biology of the holothurians from the major communities of the New Caledonian Lagoon. *Marine Biology*, 116(3), 439-450. <https://doi.org/10.1007/BF00350061>
- Cózar, A., Sanz-Martín, M., Martí, E., González-Gordillo, J. I., Ubeda, B., Gálvez, J. Á., Irigoien, X., & Duarte, C. M. (2015). Plastic Accumulation in the Mediterranean Sea. *PLOS ONE*, 10(4), e0121762. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121762>
- De Witte, B., Devriese, L., Bekaert, K., Hoffman, S., Vandermeersch, G., Cooreman, K., & Robbens, J. (2014). Quality assessment of the blue mussel (*Mytilus edulis*): Comparison between commercial and wild types. *Marine Pollution Bulletin*, 85(1), 146-155. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.006>
- Déchets : Combien de temps pour se dégrader en mer ?* (2019, janvier 17). SPF Santé publique. <https://www.health.belgium.be/fr/flyer-combien-de-temps-pour-se-degrader-en-mer>
- Décret n° 2021-296 du 19 mars 2021 modifiant le décret n° 2020-1310 du 29 octobre 2020 prescrivant les mesures générales nécessaires pour faire face à l'épidémie de covid-19 dans le cadre de l'état d'urgence sanitaire—Légifrance.* (s. d.). Consulté 20 août 2022, à l'adresse <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043268538>
- Delacuvellerie, A., Cyriaque, V., Gobert, S., Benali, S., & Wattiez, R. (2019). The plastisphere in marine ecosystem hosts potential specific microbial degraders including *Alcanivorax borkumensis* as a key player for the low-density

- polyethylene degradation. *Journal of Hazardous Materials*, 380, 120899. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120899>
- Despalatović, M., Grubelić, I., šimunović, A., Antolić, B., & Žuljević, A. (2004). Reproductive biology of the holothurian *Holothuria tubulosa* (Echinodermata) in the Adriatic Sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 84(2), 409-414. <https://doi.org/10.1017/S0025315404009361h>
- Dogniez, M. (2021). *Evaluation du potentiel bioindicateur de deux espèces d'holothuries, Holothuria polii et Holothuria tubulosa, en Méditerranée nord-occidentale : Cas des éléments traces et des particules plastiques* [Mémoire de fin d'étude, Université de Liège]. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/12870>
- Dowle, M., Srinivasan, A., Gorecki, J., Chirico, M., Stetsenko, P., Short, T., Lianoglou, S., Antonyan, E., Bonsch, M., Parsonage, H., Ritchie, S., Ren, K., Tan, X., Saporta, R., Seiskari, O., Dong, X., Lang, M., Iwasaki, W., Wenchel, S., ... Schwen, B. (2021). *data.table : Extension of « data.frame »* (1.14.2). <https://CRAN.R-project.org/package=data.table>
- Farhi, R., Morel, C., Chéron, J., & Centre d'études des Matières Plastiques. (1995). *Matières plastiques et adjuvants : Hygiène et sécurité*. INRS.
- Fischer, W., Schneider, M., & Bauchot, M.-L. (1987). *Méditerranée et Mer Noire (Zone de Pêche 37). Fiches FAO d'identification des espèces pour les besoins de la pêche. Rev.1. (2 volumes)*. (Vol. 1). Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. <https://www.jstor.org/stable/1523706?origin=crossref>
- Flammang, P. (2002). Biomechanics of Adhesion in Sea Cucumber Cuvierian Tubules (Echinodermata, Holothuroidea). *Integrative and Comparative Biology*, 42(6), 1107-1115. <https://doi.org/10.1093/icb/42.6.1107>
- Frias, J., Pagter, E., Nash, R., O'Connor, I., Carretero, O., Filgueiras, A., Viñas, L., Gago, J., Antunes, J., Bessa, F., Sobral, P., Goruppi, A., Tirelli, V., Pedrotti, M. L., Suaria, G., Aliani, S., Lopes, C., Raimundo, J., Caetano, M., & Gerds, G. (2018). *Standardised protocol for monitoring microplastics in sediments*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36256.89601/1>
- Gobert, S., & Abadie, A. (2018). *La plante de la mer du milieu : La posidonie*. Première Edition. <http://hdl.handle.net/2268/224030>

- Graham, E. R., & Thompson, J. T. (2009). Deposit- and suspension-feeding sea cucumbers (Echinodermata) ingest plastic fragments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 368(1), 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2008.09.007>
- Hickman, C. P. (Éd.). (2008). *Integrated principles of zoology* (14th ed). McGraw-Hill/Higher Education.
- Holmes, L. A., Turner, A., & Thompson, R. C. (2012). Adsorption of trace metals to plastic resin pellets in the marine environment. *Environmental Pollution*, 160, 42-48. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.08.052>
- Holmes, L. A., Turner, A., & Thompson, R. C. (2014). Interactions between trace metals and plastic production pellets under estuarine conditions. *Marine Chemistry*, 167, 25-32. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.06.001>
- Kaiser, D., Kowalski, N., & Waniek, J. J. (2017). Effects of biofouling on the sinking behavior of microplastics. *Environmental Research Letters*, 12(12), 124003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8e8b>
- Kassambara, A. (2021). *rstatix : Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests* (0.7.0). <https://CRAN.R-project.org/package=rstatix>
- Larousse, É. (s. d.). *Définitions : Plastique - Dictionnaire de français Larousse*. Consulté 21 juillet 2022, à l'adresse <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/plastique/61502>
- Lefebvre, L., Compère, P., Léonard, A., Plougouven, E., Vandewalle, N., & Gobert, S. (2021). Mediterranean aegagropiles from *Posidonia oceanica* (L.) Delile (1813) : A first complete description from macroscopic to microscopic structure. *Marine Biology*, 168(3), 37. <https://doi.org/10.1007/s00227-021-03833-y>
- Leite-Castro, L. V., de Souza Junior, J., Salmito-Vanderley, C. S. B., Nunes, J. F., Hamel, J.-F., & Mercier, A. (2016). Reproductive biology of the sea cucumber *Holothuria grisea* in Brazil : Importance of social and environmental factors in breeding coordination. *Marine Biology*, 163(3), 67. <https://doi.org/10.1007/s00227-016-2842-x>
- Lyche, J. L., Gutleb, A. C., Bergman, Å., Eriksen, G. S., Murk, A. J., Ropstad, E., Saunders, M., & Skaare, J. U. (2009). Reproductive and Developmental Toxicity of Phthalates. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 12(4), 225-249. <https://doi.org/10.1080/10937400903094091>

- Markic, A., Gaertner, J.-C., Gaertner-Mazouni, N., & Koelmans, A. A. (2020). Plastic ingestion by marine fish in the wild. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(7), 657-697. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1631990>
- Massin, C. (1982). Effects of feeding on the environment : Holothuroidea. *Echinoderm Nutrition*, 493-497. Scopus.
- Massin, C., & Jangoux, M. (1976). Observations écologiques sur *Holothuria tubulosa*, *H. poli* et *H. forskali* (Echinodermata, Holothuroidea) et comportement alimentaire de *H. tubulosa*. *Cahiers de Biologie Marine*, 17, 15.
- Mezali, K., Lebouazda, Z., Slimane-Tamacha, F., & Lila Soualili, D. (2022). Biometry, size structure and reproductive cycle of the sanded sea cucumbers *Holothuria poli* (Echinodermata, Holothuriidae) from the west Algerian coast. *Invertebrate Reproduction & Development*, 66(1), 67-77. <https://doi.org/10.1080/07924259.2022.2033331>
- Miller, M. E., Hamann, M., & Kroon, F. J. (2020). Bioaccumulation and biomagnification of microplastics in marine organisms : A review and meta-analysis of current data. *PLOS ONE*, 15(10), e0240792. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240792>
- Mitchell, K., Lima, A. T., & Van Cappellen, P. (2019). Selenium in buoyant marine debris biofilm. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110562. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110562>
- Mohsen, M., Wang, Q., Zhang, L., Sun, L., Lin, C., & Yang, H. (2019). Microplastic ingestion by the farmed sea cucumber *Apostichopus japonicus* in China. *Environmental Pollution*, 245, 1071-1078. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.083>
- Muhammad Husin, M. J., Mazlan, N., Shalom, J., Saud, S. N., & Abdullah Sani, M. S. (2021). Evaluation of microplastics ingested by sea cucumber *Stichopus horrens* in Pulau Pangkor, Perak, Malaysia. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(43), 61592-61600. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15099-4>
- Park, C.-J., & Kim, S. Y. (2013). Abalone Aquaculture in Korea. *Journal of Shellfish Research*, 32(1), 17-19. <https://doi.org/10.2983/035.032.0104>
- Plastics—The Facts 2021 • Plastics Europe. (s. d.). *Plastics Europe*. Consulté 9 août 2022, à l'adresse <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>
- Plee, T. A., & Pomory, C. M. (2020). Microplastics in sandy environments in the Florida Keys and the panhandle of Florida, and the ingestion by sea cucumbers

- (Echinodermata : Holothuroidea) and sand dollars (Echinodermata: Echinoidea). *Marine Pollution Bulletin*, 158, 111437. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111437>
- Populations légales 2019 – Commune de Calvi (2B050) | Insee.* (s. d.). Consulté 4 août 2022, à l'adresse <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6005800?geo=COM-2B050>
- Purcell, S. W., Conand, C., Uthicke, S., & Byrne, M. (2016). Ecological Roles of Exploited Sea Cucumbers. *Oceanography and Marine Biology*, 54, 367-386. <https://doi.org/10.1201/9781315368597-8>
- Purcell, S. W., Samyn, Y., & Conand, C. (2012). *Commercially important sea cucumbers of the world*. FAO.
- Remy, F., Collard, F., Gilbert, B., Compère, P., Eppe, G., & Lepoint, G. (2015). When Microplastic Is Not Plastic : The Ingestion of Artificial Cellulose Fibers by Macrofauna Living in Seagrass Macrophytodetritus. *Environmental Science & Technology*, 49(18), 11158-11166. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02005>
- Renzi, M., Blašković, A., Bernardi, G., & Russo, G. F. (2018). Plastic litter transfer from sediments towards marine trophic webs : A case study on holothurians. *Marine Pollution Bulletin*, 135, 376-385. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.07.038>
- Renzi, M., Blašković, A., Broccoli, A., Bernardi, G., Grazioli, E., & Russo, G. (2020). Chemical composition of microplastic in sediments and protected detritivores from different marine habitats (Salina Island). *Marine Pollution Bulletin*, 152. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.110918>
- Rios-Fuster, B., Alomar, C., Paniagua González, G., Garcinuño Martínez, R. M., Soliz Rojas, D. L., Fernández Hernando, P., & Deudero, S. (2022). Assessing microplastic ingestion and occurrence of bisphenols and phthalates in bivalves, fish and holothurians from a Mediterranean marine protected area. *Environmental Research*, 214, 114034. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114034>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2018). Plastic Pollution. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>
- Rochester, J. R. (2013). Bisphenol A and human health : A review of the literature. *Reproductive Toxicology*, 42, 132-155. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2013.08.008>
- Ryan, P. G. (2019). Ingestion of Plastics by Marine Organisms. In H. Takada & H. K. Karapanagioti (Éds.), *Hazardous Chemicals Associated with Plastics in the Marine*

- Environment* (Vol. 78, p. 235-266). Springer International Publishing.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-95568-1>
- Samyn, Y., VandenSpiegel, D., & Massin, C. (2006). *Taxonomie des holothuries des Comores* (J. Degreef, Éd.; Vol. 1).
- Sanchez-Vidal, A., Canals, M., de Haan, W. P., Romero, J., & Veny, M. (2021). Seagrasses provide a novel ecosystem service by trapping marine plastics. *Scientific Reports*, *11*(1), 254. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79370-3>
- Schuyler, Q., Hardesty, B. D., Wilcox, C., & Townsend, K. (2014). Global Analysis of Anthropogenic Debris Ingestion by Sea Turtles. *Conservation Biology*, *28*(1), 129-139. <https://doi.org/10.1111/cobi.12126>
- Skirris, N., Goffart, A., Hecq, J. H., & Djenidi, S. (2001). Shelf-slope exchanges associated with a steep submarine canyon off Calvi (Corsica, NW Mediterranean Sea) : A modeling approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *106*(C9), 19883-19901. <https://doi.org/10.1029/2000JC000534>
- Slimane-Tamacha, F., Soualili, D. L., & Mezali, K. (2019). Reproductive biology of *Holothuria (Roweothuria) poli* (Holothuroidea : Echinodermata) from Oran Bay, Algeria. *SPC Beche-de-Mer Information Bulletin*, *39*, 7.
- Tahri, Y., Dermeche, S., Chahrour, F., & Bouderbala, M. (2019). The reproduction cycle of the sea cucumber *Holothuria (Holothuria) tubulosa* Gmelin, 1791 (Echinodermata Holo-thuroidea Holothuriidae) in Oran coast, Algeria. *Biodiversity Journal*, *10*(2), 159-172. <https://doi.org/10.31396/Biodiv.Jour.2019.10.2.159.172>
- Urry, L. A., Cain, M. L., Wasserman, S. A., Minorsky, P. V., Reece, J. B., Campbell, N. A., Campeau-Péloquin, A., Racine, C., & Dubé, S. (2020). *Campbell biologie* (9e édition). Erpi.
- Venâncio, E., Félix, P. M., Brito, A. C., Azevedo e Silva, F., Simões, T., Sousa, J., Mendes, S., & Pombo, A. (2022). Reproductive Biology of the Sea Cucumber *Holothuria mammata* (Echinodermata : Holothuroidea). *Biology*, *11*(5), 622. <https://doi.org/10.3390/biology11050622>
- Wang, M.-H., Chen, C.-F., Albarico, F. P. J. B., Chen, C.-W., & Dong, C.-D. (2022). Occurrence and distribution of phthalate esters and microplastics in wastewater treatment plants in Taiwan and their toxicological risks. *Chemosphere*, *307*, 135857. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135857>

- Wanninger, A. (Éd.). (2015). *Evolutionary Developmental Biology of Invertebrates 6*. Springer Vienna. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-1856-6>
- Wickham, H. (2016). *ggplot2 : Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Wolkenhauer, S.-M., Uthicke, S., Burrige, C., Skewes, T., & Pitcher, R. (2010). The ecological role of *Holothuria scabra* (Echinodermata : Holothuroidea) within subtropical seagrass beds. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 90(2), 215-223. <https://doi.org/10.1017/S0025315409990518>
- WoRMS - World Register of Marine Species. (s. d.). Consulté 29 juin 2022, à l'adresse <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=stats>
- WoRMS - World Register of Marine Species—Aspidochirotida. (s. d.). Consulté 12 août 2022, à l'adresse <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=123109>
- WoRMS - World Register of Marine Species—Echinodermata. (s. d.). Consulté 28 juin 2022, à l'adresse <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=1806>
- WoRMS - World Register of Marine Species—Holothuria (Holothuria) tubulosa Gmelin, 1791. (s. d.). World Register of Marine Species. Consulté 19 août 2022, à l'adresse <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=124525#distributions>
- WoRMS - World Register of Marine Species—Holothuria (Roweothuria) poli Delle Chiaje, 1824. (s. d.). World Register of Marine Species. Consulté 19 août 2022, à l'adresse <https://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=125182>
- Yaseen, A., Assad, I., Sofi, M. S., Hashmi, M. Z., & Bhat, S. U. (2022). A global review of microplastics in wastewater treatment plants : Understanding their occurrence, fate and impact. *Environmental Research*, 212, 113258. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113258>
- Zantis, L. J., Carroll, E. L., Nelms, S. E., & Bosker, T. (2021). Marine mammals and microplastics : A systematic review and call for standardisation. *Environmental Pollution*, 269, 116142. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116142>
- Zazouli, M., Nejati, H., Hashempour, Y., Dehbandi, R., Nam, V. T., & Fakhri, Y. (2022). Occurrence of microplastics (MPs) in the gastrointestinal tract of fishes : A global systematic review and meta-analysis and meta-regression. *Science of The Total Environment*, 815, 152743. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152743>

Table des figures

Figure 1 - Équation de polymérisation de l'acide adipique et du n-éxaméthylèdiamine pour former du Nylon	1
Figure 2 - Carte des rejets plastiques dans le bassin méditerranéens en Tonnes par an (Boucher & Billard, 2020)	3
Figure 3 - Densité des débris plastiques observés dans des aegagropiles et des feuilles mortes de <i>Posidonia oceanica</i> récoltées sur des plages de l'île de Majorque (Sanchez-Vidal et al., 2021)	4
Figure 4 - Figure représentant la bioaccumulation de débris plastiques dans une chaîne alimentaire depuis les consommateurs primaires (le plancton) jusqu'aux super prédateurs (<i>Plastic bioaccumulation in the food web GRID-Arendal, s. d.</i>)	5
Figure 5 - <i>Holothuria tubulosa</i> (à droite) et <i>Holothuria poli</i> (à gauche) (Crédit : Roberto PILLON)	7
Figure 6 - Morphologie générale d'une holothurie (Purcell et al., 2012)	8
Figure 7 - Anatomie interne d'une holothurie aspidochirote montrant les principaux organes (Dessin de Nadine Van Noppen) (Samyn et al., 2006).	9
Figure 8 - <i>Holothuria tubulosa</i> . Changements des valeurs des indices de maturité chez les deux sexes en fonction des changements saisonniers de température pendant la période d'échantillonnage (juillet 1994 à août 1995) (Despalatović et al., 2004).	10
Figure 9 - Graphique des variations journalières de la population en Corse durant toute une année. Les nombres donnés correspondent aux maxima des cumuls des échanges (Entrées et Sorties) durant les années 2012 et 2017 (Bolley et al., 2018)	13
Figure 10 - Carte de la baie de Calvi reprenant les habitats sous-marins qu'elle abrite ainsi que les sites d'échantillonnages principaux (A = transect depuis STARESO, B = Emissaire des eaux usées, C = Ferme aquacole) (modifiée d'après Velimirov et al. (2016)) (Dogniez, 2021)	14
Figure 11 - <i>Holothuria tubulosa</i> avant et après le début de la dissection (photos personnelles)	16
Figure 12 - Rampe de filtration utilisée pour l'extraction des MP de l'intestin des holothuries 1)Filtre métallique 500µm 2)Filtre métallique 63µm 3)Support de filtration	

pour le filtre GF/C 4)Réceptacle des solutions filtrées 5)Pompe à vide. (Dogniez, 2021)	17
Figure 13 - Nombre d'items plastiques dans les tubes digestifs des holothuries récoltées pendant la période touristique	20
Figure 14 - Courbes de répartition des éléments plastiques en fonction de leurs longueurs (en μm)	21
Figure 15 - Courbes de répartition des éléments plastiques d'une taille inférieure à 5 mm en fonction de leurs longueurs (en mm)	22
Figure 16 - Nombre d'item plastiques retrouvés pour 10 g/PF de tube digestif répartis selon le site de récolte et la nature des plastiques recensés	23
Figure 17 - Comparaison du contenu en plastiques des tubes digestifs des holothuries de l'Emissaire récoltées hors saison et durant la période touristique	24
Figure 18 - Courbe de répartition des éléments plastiques des périodes touristiques et creuses du site de l'Emissaire en fonction de leurs longueurs (Emissaire HS = Emissaire lors de la période creuse, Emissaire T = Emissaire lors de la période touristique)	25
Figure 19 - Comparaison des contenus en plastique répartis selon leurs natures en fonction de la période de récolte	26
Figure 20 - Évolution du nombre de nuitées totales dans les hôtels par rapport au même mois de 2019 (<i>Bilan économique 2021 - Corse - Insee Conjoncture Corse - 39, s. d.</i>)	29
Figure 21 - Schéma de la circulation des masses d'eau dans la baie de Calvi (Skiris et al., 2001)	30
Figure 22 - Proportion des différentes catégories de plastiques détectées dans des bivalves, des poissons et des holothuries (Rios-Fuster et al., 2022)	32
Figure 23 - Fragment de fibre au centre de l'image pour lequel la question de la classification a été posée (photo personnelle)	33
Figure 24 - Répartition des plastiques selon leurs natures sur les différents sites de récoltes lors de la période touristique. Chaque couleur correspond à une nature de plastique.	x
Figure 25 - bandelettes métalliques retrouvées dans le tube digestif d'holothuries provenant du site de l'émissaire	x