

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA - Béjaia

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Biologiques de L'environnement
Spécialité : Toxicologie Industrielle et Environnementale



Réf :.....

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

**Évaluation de la pollution marine aux
microplastiques dans la région de Bejaia**

Présenté par :
Ouadi Ilesse & Ouali Idir
Soutenu le : 14 / 09 / 2022

Devant le jury composé de :

Mme. AYOUNI Z	MAA	Président
Mme. ABDELLI M	MCB	Examineur
M. MOUSSAOUI R	MCB	Promoteur

Année universitaire : 2021/ 2022

Remerciements

Nous tenons avant tout à remercier dieu tout puissant de nous avoir donné la patience et le courage pour mener à bien et à bout ce modeste travail.

Nous adressons toute notre gratitude et nos remerciements à notre promoteur M. MOUSSAOUI Rabia pour son engagement et son accompagnement, ses conseils et sans qui ce travail n'aurait sans doute pas été réalisé.

Nos plus vifs remerciements vont aussi à Mme. ABDELLI Meriem qui a accepté d'examiner notre modeste travail et de contribuer à son amélioration, mais également à Mme. AYOUNI Zahra qui nous a fait l'honneur de présider le jury de notre soutenance.

Aussi, nous exprimons nos plus sincères remerciements à notre ingénieur de laboratoire M. ZEMMOURI Mourad qui nous a guidés tout au long de notre période de pratique au laboratoire.

Pour finir nos remerciements sont adressés à nos amis qui nous ont épaulés de près ou de loin pendant notre parcours, et à nos familles respectives qui nous ont permis d'en arriver là où nous sommes aujourd'hui.

Dédicace

Je dédie mon travail à toutes les personnes qui m'ont soutenues, pas seulement durant ce travail mais aussi pendant tout mon parcours universitaire :

À mes chers parents, sans qui je ne serais jamais parvenu jusqu'ici.

À mes frères Lynas, Youram et notre petit Amayas.

À mon groupe d'amis, à savoir Yanis, Baha, Layla et lyna, avec qui on a durement travaillé, je vous dis merci pour les moments inoubliables qu'on a pu vivre ensemble durant ces quelques années, merci pour votre belle amitié et c'est grâce à votre présence ici à nos côtés que la réalisation de ce travail-là été possible.

À mon binôme Mounir (Idir), avec qui je suis entré à l'université et avec qui je suis sur le point d'en sortir, le premier jour nous étions les seuls garçons de la classe, merci pour ces belles années d'amitié.

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je vous porte tous.

Ilesse

Dédicace

Je dédie ce travail :

À mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentis pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie de tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagnera pour toujours.

À mes chers et adorables frères et à ma sœur

En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et de reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu vous protège et vous garde.

À mes chères collègues

Qui m'ont aidé et soutenu à la réalisation de ce travail: Ilesse, Abdelhak, Yanis, Layla, Lyna, et Ella

À mes amis Massi, Fayçal

Merci pour être là chaque fois que j'ai besoin de vous.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce projet, et tous ceux qui œuvrent pour la promotion de la science.

Idir

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction	01
Chapitre I. Plastiques et microplastiques	
I.1 Les plastiques	03
I.1.1 Qu'est-ce que le plastique ?	03
I.1.2 Composition et origine des plastiques	03
I.1.3 Familles de matières plastiques	04
I.1.3.1 Les thermoplastiques	04
I.1.3.2 Les thermodurcissables	04
I.1.3.3 Les élastomères	04
I.2 Les microplastiques ou particules de plastiques	04
I.2.1 Qu'est-ce qu'un microplastique ?	04
I.2.2 Types de microplastiques	05
I.2.2.1 Les microplastiques primaires	05
I.2.2.1 Les microplastiques secondaires	05
I.2.3 Transferts et risques associés aux microplastiques dans l'environnement	05
I.2.3.1 Les effets physiques	06
I.2.3.2 Les effets chimiques	06
Chapitre II. Caractérisation de matières plastiques dans les échantillons biologiques	
II.1 La détection optique	08
II.2 La Microscopie Électronique à Balayage (MEB)	09
II.3 La spectrométrie infrarouge à transformée de fourier (FTIR)	09
II.4 La spectroscopie Raman	11
II.5 Les méthodes d'identification thermo-analytique	11
II.6 L'imagerie hyperspectrale (HSI)	12
Chapitre III. Matériel et méthodes	
III.1 Échantillonnage de poissons	13
III.2 Transport et conservation des échantillons de poissons	14
III.3 Taille et poids des poissons	14
III.4 Examen optique des tubes digestifs des poissons	14

III.4.1 Extraction des tubes digestifs des poissons	14
III.4.2 Examen des tubes digestifs des poissons au stéréomicroscope	14
III.5 Analyse chimique des tubes digestifs des poissons	15
III.5.1 Digestion chimiques des tubes digestifs des poissons	15
III.5.2 Analyse des minéralisâts par spectroscopie FTIR	15
Chapitre IV. Résultats et discussion	
IV.1 Résultats	16
IV.1.1 Taille et poids des poissons	16
IV.1.2 Examen des tubes digestifs des poissons au stéréomicroscope	16
IV.1.3 Analyse par spectroscopie FTIR des tubes digestifs des poissons	17
IV.2 Discussion	20
IV.2.1 Détection optique de microplastiques	20
IV.2.2 Caractérisation de microplastiques par l'analyse chimique	20
Conclusion	23
Références bibliographiques	24
Résumé/Abstract	

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Fig. 1	Groupes de plastiques	03
Fig. 2	Techniques ou méthodologies de caractérisation de polymères de microplastiques	08
Fig. 3	Principe de microscopie électronique à balayage	09
Fig. 4	Schéma théorique de fonctionnement de la spectroscopie FTIR	10
Fig. 5	Espèces de poissons capturées au large et dans les eaux côtières de Bejaia	13
Fig. 6	Fragments contaminants observés au stéréomicroscope dans les tubes digestifs des espèces de poissons échantillonnées	16
Fig. 7	Spectre FTIR de l'échantillon biologique de <i>Sardinella aurita</i>	17
Fig. 8	Spectre FTIR de l'échantillon biologique de <i>Mullus surmuletus</i>	18
Fig. 9	Spectre FTIR de l'échantillon biologique de <i>Pagelus acarne</i>	19

Liste des abréviations

ATR : Réflexion totale atténuée

cm : Centimètre

EDS : Spectroscopie à Dispersion d'Énergie

FTIR : Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

g : Gramme

HSI : Hyperspectral imaging

IR : infrarouge

MEB : Microscopie électronique à balayage

MP : Micropastiques

PA : Polyamide

PCB : Polychlorobiphényles

PE : Polyéthylène

PEHD : Polyéthylène haute densité

PET : Polyéthylène terephthalate

PF : Phénoplastes

POPs : Polluant organique persistant

PP : Polypropylène

PS : Polystyrène

PUR : Polyuréthannes

PVC : Polychlorure de vinyle

TF : Transformée de Fourier

UP : Polyesters insaturés

Introduction

Introduction

La population mondiale ne cesse de croître, un accroissement en partie corrélé avec des besoins élémentaires humains grandissants, mais aussi des besoins émergents de l'homme en quête d'assouvir un élan pressant de développement civilisationnel. Ces ancrages imposeraient systématiquement à la civilisation humaine de nouvelles problématiques qui sont liées notamment à la santé des populations, à l'environnement, et à la santé des écosystèmes (**Li et al., 2019**).

Effectivement, longtemps l'homme s'est multiplié ses activités afin de subvenir à ses besoins croissants et d'assurer son confort, ce qui est tout de même flanqué avec des pollutions et des déchets divers. Qu'ils soient solides ou liquides, ces déchets et polluants proviennent des ménages, du tourisme, de la pêche, de l'industrie, et de l'agriculture, ..., et ils seraient pour la plupart des agresseurs environnementaux et écosystémiques effectifs. Sur la liste de ces agresseurs potentiels dont l'impact est nettement dommageable pour les écosystèmes on en retrouve ; les métaux lourds, les hydrocarbures, les engrais, les pesticides, et les plastiques extrêmement délétères et de plus en plus envahissants (**Kamble, 2014**).

De fait, la pollution plastique est particulièrement reconnue comme hautement préjudiciable au fonctionnement des écosystèmes marins. La production de plastique a phénoménalement augmenté à partir des années 50, et se trouve de nos jours l'un des matériaux de fabrication les plus utilisés au niveau mondial (**Andrady, 2011**). Son utilisation massive agencée à une gestion manquante des déchets à base de plastique les rendent extrêmement affluants et abondants dans l'environnement (**Jambeck et al., 2015**). Et encore, les plastiques persistent longtemps dans l'environnement à cause de leurs propriétés chimiques stables, favorisant ainsi leur rétention et leur accumulation (**Galgani et al., 2020**).

Éventuellement, la décomposition du plastique dans l'environnement génère de petits fragments qu'on appelle des microplastiques ou larmes de sirène (**Cole et al., 2015 ; Galloway & Lewis, 2016 ; Ding et al., 2020**). De si petits granulés susceptiblement ingérables par les organismes vivants (**Lambert et al., 2014**), et conséquemment maléfiques pour les faunes aquatiques. En fait, de par leur petite taille et leur aspect phytoplanctonique, ces granulés aux effets pernicioeux sont ingérés par les organismes aquatiques les plus petits et passent ensuite dans les maillons trophiques supérieurs (phénomène de contagion de l'effet) (**Van Cauwenberghe & Janssen, 2014 ; Desforges et al., 2015 ; Welden & Cowie, 2016 ; Lusher et al., 2017 ; Zhang et al., 2017**). Les effets délétères observés chez les espèces marines qui les ingèrent se traduisent généralement par un blocage des voies digestives, un

endommagement des organes digestifs, des effets reprotoxiques, et des cancers inductifs (**Wright *et al.*, 2013 ; Cole *et al.*, 2015 ; Phillips & Boner, 2015**).

Curieusement dans le Sud de la Méditerranée, quoique la mer se vide remarquablement de ses populations de poissons (**Vasilakpoulos *et al.*, 2014**), qu'éventuellement la pollution aux microplastiques en pourrait expliquer en partie, l'intérêt que l'on en porte demeure manifestement manquant. De fait, nous nous disposons de très peu de données pratiques quant d'abord, aux potentiels transferts des microplastiques présents dans l'eau dans l'organisme des poissons marins vivant dans le Sud du bassin méditerranéen, puis, à l'impact direct ou indirect de ces polluants silencieux sur la dynamique actuelle de leurs stocks. Dans cette étude, nous tenterons d'apporter les premières preuves empiriques de l'interaction potentielle des microplastiques dans l'eau avec des espèces marines subsistant dans le Sud de la Méditerranée. Pour cela, nous examinerons des tubes digestifs de poissons capturés au large et dans les eaux côtières de Bejaia en Algérie pour rechercher de potentiels microplastiques contaminants les poissons.

Chapitre I. Plastiques et microplastiques

Chapitre I. Plastiques et microplastiques

I.1 Les plastiques

I.1.1 Qu'est-ce que le plastique ?

Le plastique encore appelé matière plastique, est un polymère généralement mélangé à des additifs, des colorants, ou de charges (miscibles ou non dans la matrice polymère) (Sahajwalla & Gaikwad, 2018).

On appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères reliées par des liaisons covalentes. On distingue des homopolymères, qui sont des polymères comportant des motifs monomères tous identiques, et des copolymères qui comportent des motifs monomères de deux ou plus sortes différentes (Gedde, 1995).

Le terme plastique s'applique à une large gamme de matériaux qui, sous des conditions modérées de pression et de température s'écoulent de manière à pouvoir être extrudés, moulés, coulés, filés ou appliqués comme revêtement. Il peut se former soit de manière naturelle (polymère naturel : le caoutchouc, par exemple), soit de manière artificielle (polymère synthétique: le polystyrène, par exemple) à partir de pétrole, de gaz naturel, ou de charbon. Nous comptons aujourd'hui plus d'une trentaine de groupes de plastiques différents, chacun avec de propres variétés et propriétés physico-chimiques (Fig. 1) (APME, 2006).

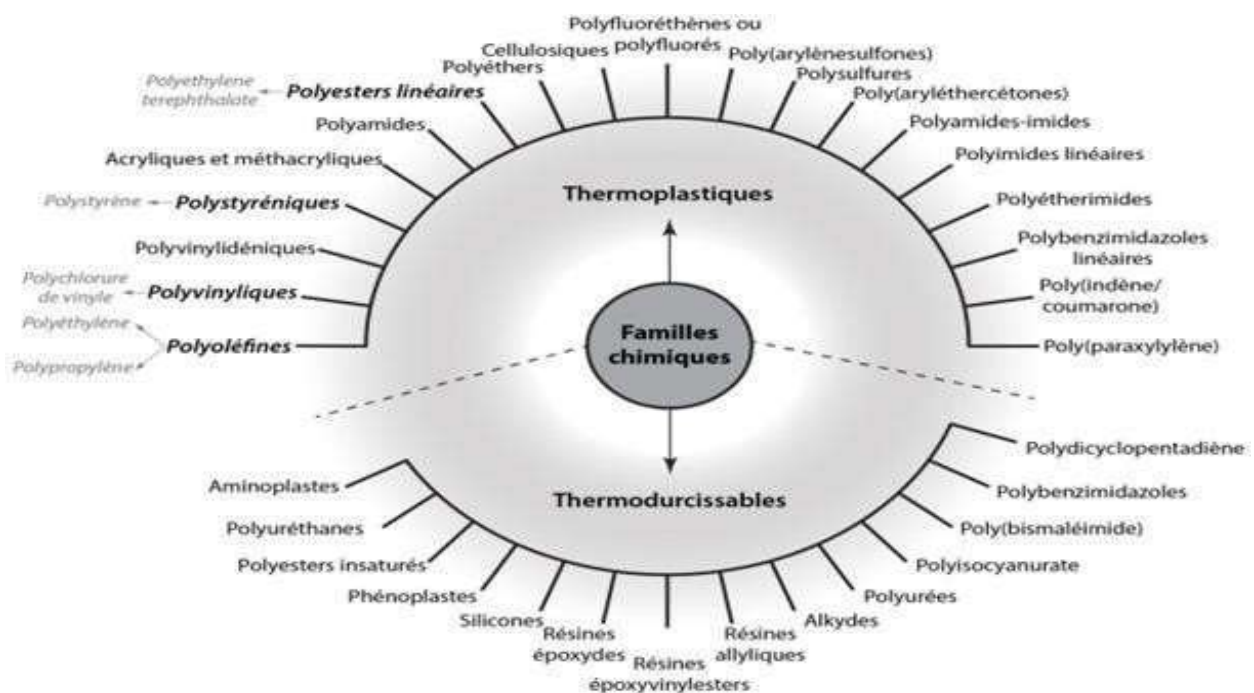


Figure 1. Groupes de plastiques (Vijayakumar & Sebastian, 2018)

I.1.2 Composition et origine des plastiques

Le plastique est composé de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O), d'azote (N), de soufre (S), et de silicium (Si) (Morét-Ferguson *et al.*, 2010).

I.1.3 Familles de matières plastiques

Les trois principales catégories de plastiques sont les thermoplastiques, les thermodurcissables, et les élastomères (Xu *et al.*, 2020).

I.1.3.1 Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des matières plastiques qui se ramollissent sous l'action de la chaleur et se durcissent en se refroidissant de manière réversible. La plupart des plastiques utilisés dans l'emballage sont des thermoplastiques, ce qui permet de les recycler (Heckele & Schomberg, 2003).

Les principaux thermoplastiques sont les polyéthylènes (PE), les polyéthylènes haute densité (PEHD), les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes terephtalate (PET), les polypropylènes (PP), les polystyrènes (PS), et les polyamides (PA).

I.1.3.2 Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des matières plastiques qui sous l'action de la chaleur, se durcissent progressivement pour atteindre un état solide irréversible. Ces matières ne peuvent être recyclées (Longhitano, 2021).

Les principaux thermodurcissables sont les polyuréthanes (PUR), les polyesters insaturés (UP), les phénoplastes (PF), le silicone, les époxydes, et les aménolastes.

I.1.3.3 Les élastomères

Un élastomère est un polymère présentant des propriétés « élastiques », obtenues après réticulation. Il supporte de très grandes déformations avant la rupture. Le terme de caoutchouc est un synonyme usuel d'élastomère (Hsissou *et al.*, 2021).

I.2 Les microplastiques ou particules de plastiques

I.2.1 Qu'est-ce qu'un microplastique ?

Les microplastiques sont de petites particules de matière plastique dispersées dans l'environnement. Il peut s'agir de fragments d'objets en plastique ou de microbilles de plastique de plus en plus utilisées par l'industrie, dans les cosmétiques, ou de fibres synthétiques (Hale *et al.*, 2020).

Il n'existe pas de consensus absolu sur la définition de ce qu'est un « microplastique » en termes de taille. Autrement, aucune définition claire des limites hautes et basses des microplastiques n'est retenue. De fait, en 2009, un groupe de travail de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) a défini les MP comme étant des particules de plastiques de tailles inférieures à 5 mm sans donner de limite de taille basse (Arthur *et al.*, 2009).

Pour **Lambert *et al.* (2014)** les particules :

> 5 mm sont des macroplastiques,

5 à > 1mm sont des mésoplastiques,

1 mm à > 0,1 µm sont des microplastiques,

0,1 µm sont des nanoplastiques.

Toutefois encore, une définition qui retient pour seule caractéristique la taille des particules de plastique reste relative et peut manquer de clarté. En fait, au prorata de la taille de la particule, pour de longueurs équivalentes, de grandes différences de poids ou de volumes peuvent émerger (**Filella, 2015**). Encore, les microplastiques se caractérisent de par leur forme et leur couleur. De fait, les méthodologies classiques de détection optique de microplastiques qui peuvent être aspirés par des plantes ou assimilés par des animaux tiennent aux formes (fragment, fibre, sphère, billes, mousse) et aux couleurs (transparent, noir, blanc, rouge, bleu, autre couleur) caractéristiques des microplastiques (**Li *et al.*, 2022**).

I.2.2 Types de microplastiques

Les microplastiques peuvent être divisés en deux catégories selon la source dont ils proviennent : les microplastiques primaires et secondaires (**Xu *et al.*, 2020**).

1.2.2.1 Les microplastiques primaires

Les microplastiques primaires sont directement rejetés dans l'environnement sous forme de particules. On estime actuellement qu'ils représentent entre 15 et 31 % de la totalité des microplastiques des mers et des océans. Parmi ces microplastiques primaires, 35 % proviennent du lavage des vêtements synthétiques du fait de leur présence dans ces matières, tandis que 28 % sont issus du frottement des pneus sur les routes. Enfin, 2 % proviennent de certains cosmétiques dans lesquels ils sont ajoutés volontairement.

1.2.2.1 Les microplastiques secondaires

Les microplastiques secondaires sont issus de la dégradation ou de la transformation d'objets plastiques plus grands déjà en mer, comme les sacs de plastique, les bouteilles, ou les filets de pêche. Après une immersion dans l'eau et une exposition au prolongée soleil, ces déchets se dégradent en morceaux plus petits pour finalement former des microplastiques. Les microplastiques secondaires représentent entre 70 et 80 % des microplastiques retrouvés dans les mers et les océans.

I.2.3 Transferts et risques associés aux microplastiques dans l'environnement

Lorsqu'ils se répandent dans l'environnement, les microplastiques produisent une série d'effets toxiques, comme l'inhibition de la croissance et du développement des espèces vivantes, la perturbation de l'alimentation et du comportement des animaux, ou encore des

effets toxiques (reprotoxiques, immunotoxiques, génotoxiques) pour la faune du milieu (**Li et al., 2021**).

On peut distinguer deux effets majeurs des microplastiques dans l'environnement ; des effets physiques et des effets chimiques (**Verney et al., 2018**).

I.2.3.1 Les effets physiques

Les microplastiques sont de petite taille, ils sont donc notamment ingérés par les petits organismes présents dans l'eau, les poissons, les planctons ou bien les mammifères marins (**Wilson & Wilson's, 2017**).

Le fait que ces petits morceaux de plastique soient biodisponibles et éventuellement assimilables par les détritivores, les planctophages, et les organismes filtreurs, suivis de leur translocation et leur déplacement dans la chaîne trophique fait encore débat (**Fendall & Sewell, 2009**).

En laboratoire, il a été démontré que les polymères sont ingérés par une multitude d'espèces et que ce processus dépend en grande partie de leur taille, forme, densité, et accessoirement leur couleur (**Trestrail et al., 2020**).

Les effets physiques observés chez 250 espèces différentes se manifestent par l'étranglement, la suffocation ou l'obstruction des voies digestives lors de l'ingestion en question.

Réellement, les blessures internes du tube digestif font partie des effets directs de l'ingestion de microplastiques, ils deviennent une entrave au passage de la nourriture, ce qui réduit considérablement les apports nutritifs, et conduit inévitablement le biote à la famine puis à la mort. Pour certaines espèces qui respire de l'air, les MP obstruent leurs branchies, réduisant ainsi leur capacité respiratoire (**Wilson & Wilson's, 2017**).

I.2.3.2 Les effets chimiques

Les matières plastiques ne représentent pas un danger en soi pour l'environnement, car elles sont initialement biochimiquement inertes. Cependant, l'ajout des additifs submicroniques les rend plus aptes à s'infiltrer dans les membranes des cellules et à participer aux réactions biochimiques, ce qui a pour conséquence un changement comportemental et physiologique grave, et des altérations au niveau de la reproduction (**Wilson & Wilson's, 2017**).

Il a été prouvé que quelques POPs, PCB et pesticides peuvent imiter les hormones naturelles, ce qui conduit à des troubles de reproduction. Le taux d'absorption de ces POPs dans la matière plastique dépend essentiellement de la nature du polymère et du polluant conjointement, ainsi que le type, la densité, le poids moléculaire et l'hydrophobicité (L'hydrophobie caractérise les surfaces qui semblent repousser l'eau). Quand les contaminants

Chapitre I. Plastiques et microplastiques

hydrophobes sont ingérés, ils sont capables de s'introduire dans les réseaux alimentaires et être mêlés à des phénomènes comme la bioaccumulation ou la bioamplification qui ne sont pas sans conséquence sur la santé animale et humaine. Cela explique que les particules peuvent traverser certains organes du corps comme le foie, les testicules et le sang pour arriver au cerveau, ce qui peut avoir de lourdes conséquences sur l'autorégulation des signes vitaux de l'espèce (**Wilson & Wilson's, 2017**).

Chapitre II. Caractérisation de matières plastiques dans les échantillons biologiques

Chapitre II. Caractérisation de matières plastiques dans les échantillons biologiques

Les techniques de caractérisation (analyse qualitative) et de quantification (analyse quantitative) des plastiques dans les matrices végétales et animales vont de méthodes peu dispendieuses simples à mettre en œuvre, aux méthodes onéreuses impliquant des équipements sophistiqués, et qui fournissent des résultats fiables et précis (Romeo, 2015).

La figure 2 illustre les techniques utilisées (développées ci-après) pour identifier et évaluer des microplastiques incidemment présents dans les matrices biologiques.

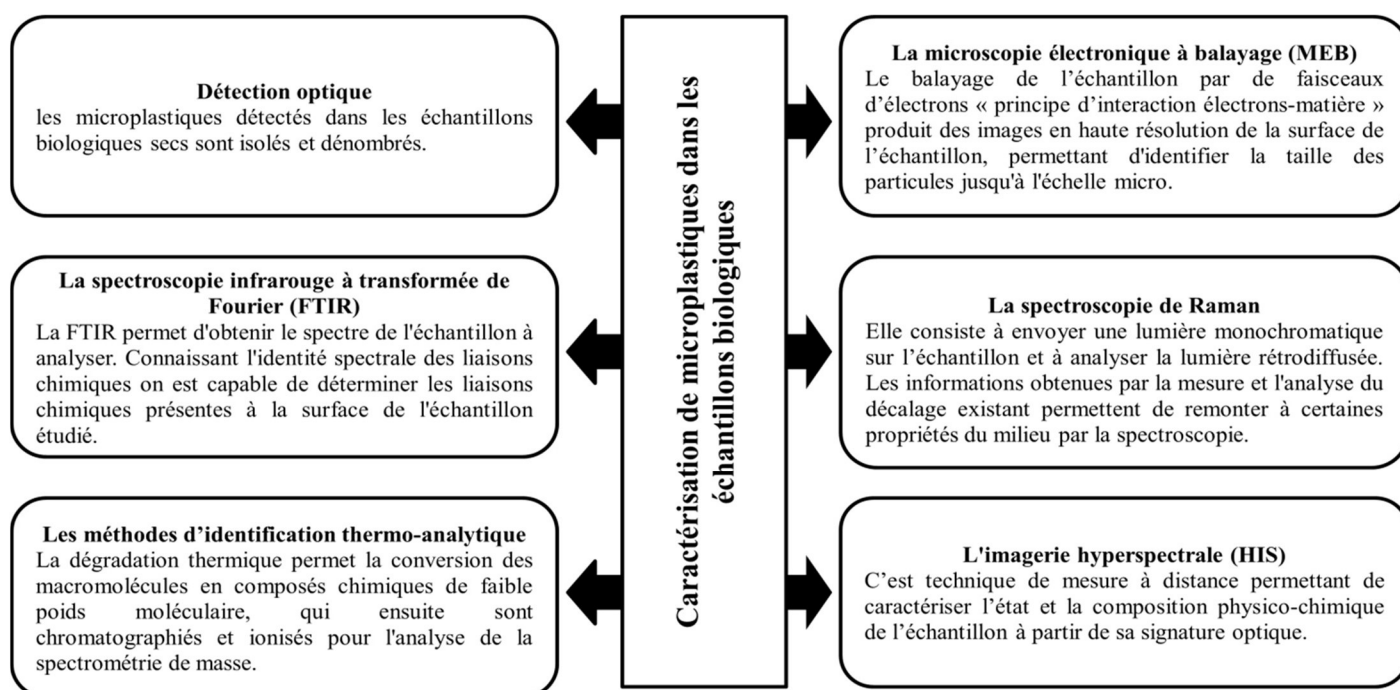


Figure 2. Techniques ou méthodologies de caractérisation de polymères de microplastiques (Sridhar *et al.*, 2022)

II.1 La détection optique

L'approche à l'œil nu est très utilisée pour la visualisation et la caractérisation des MP, car elle est simple et facile à mettre en œuvre. Les particules visibles à l'œil nu (supérieure à 500 μm) sont manuellement séparées sur la taille, la couleur et la forme de plastique, et qui ensuite sont comptabilisés. Bien que la technique soit peu coûteuse et simple, la détection optique ne peut pas être recommandée comme méthode d'identification standard, car le comptage manuel ou microscopique est relativement peu fiable et peut entraîner des erreurs de calcul (Renner *et al.*, 2018).

Chapitre II. Caractérisation de matières plastiques dans les échantillons biologiques

II.2 La Microscopie Électronique à Balayage (MEB)

La microscopie électronique à balayage est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions « électrons-matière » (Regourd & Hornain, 1975).

Dans un microscope électronique à balayage, un faisceau électronique balaye la surface d'un échantillon. L'interaction électron-matière génère alors plusieurs types d'émissions, comme le montre le schéma simplifié ci-contre (Fig. 3). Les électrons secondaires permettent d'imager la surface de l'échantillon, avec un contraste topographique, et les électrons rétrodiffusés donnent une image avec un contraste chimique sur une surface plane (Regourd & Hornain, 1975). Les photons X rendent possible l'analyse chimique en Spectroscopie à Dispersion d'Énergie (EDS).

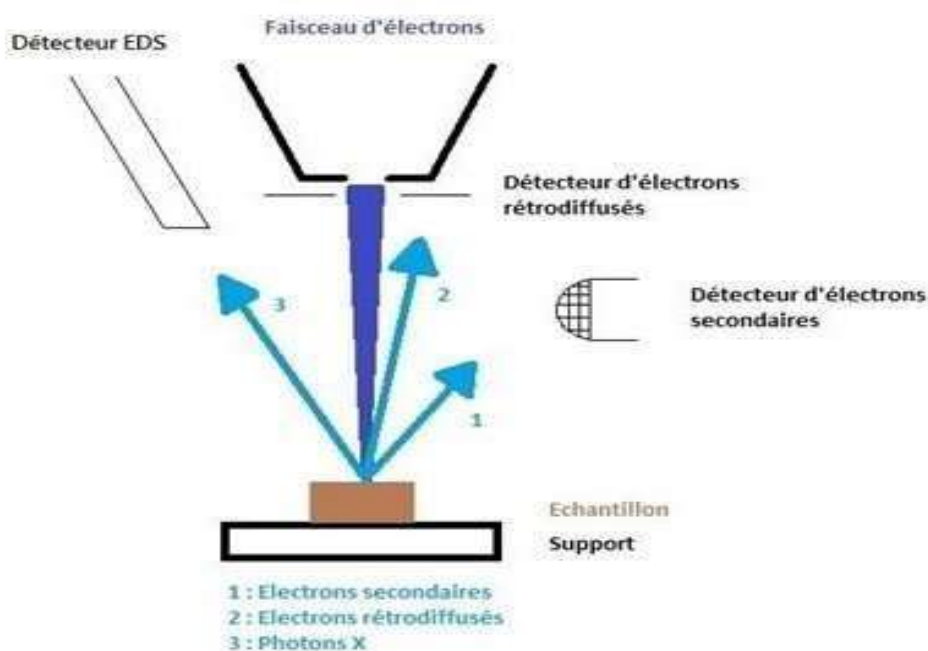


Figure 3. Principe de microscopie électronique à balayage (Regourd & Hornain, 1975)

II.3 La spectrométrie infrarouge à transformée de fourier (FTIR)

La spectroscopie infrarouge appelée en anglais (FTIR) (Fourier Transformed Infrared Spectroscopy), est une technique de mesure basée sur l'analyse d'un rayonnement infrarouge à travers l'échantillon. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer une topographie des fonctions chimiques présentes dans le matériau. L'appareil émet un rayonnement sur une plage de longueur d'onde (infrarouge). Le domaine infrarouge traité par l'instrument de mesure est de (25 à 2,5 micromètres) ou encore en

Chapitre II. Caractérisation de matières plastiques dans les échantillons biologiques

longueur d'onde de 4000 à 400 cm^{-1} . Quand la longueur d'onde (énergie des photons) avoisine l'énergie de vibration ou d'absorption des molécules présentes dans l'échantillon, une partie du rayonnement lumineux est absorbée. Sur le capteur analyseur d'intensité lumineuse apparaissent des pics représentant des baisses d'intensité. Chaque fonction chimique est sensible à différentes longueurs d'onde (une patate est un large creux d'absorption sur la plage du nombre d'onde). Toutes les vibrations ne donnent pas forcément lieu à une absorption, cela dépend de la géométrie et de la symétrie des molécules. La position de ces bandes d'absorption va dépendre en particulier de la différence d'électronégativité des atomes et de leur masse. Le fait qu'une molécule se trouve dans une disposition géométrique ou une autre, cela lui confère différentes possibilités de mouvement et donc d'absorption (bending: l'un monte l'autre descend; stretching: les deux particules montent et descendent en même temps; rocking: rapprochement angulaire des deux particules) (Movasaghi & Rehman, 2008).

Le faisceau infrarouge provenant de la source IR est dirigé vers l'interféromètre qui va moduler chaque longueur d'onde à une fréquence différente (Fig. 4). Le faisceau arrive sur la séparatrice qui le divise en deux. Une partie est dirigée vers le miroir fixe (miroir fixé) et le reste passe à travers la séparatrice vers le miroir mobile. Quand les deux faisceaux se recombinent, des interférences constructives ou destructives apparaissent en fonction de la position du miroir mobile (Movasaghi & Rehman, 2008).

Le faisceau modulé est réfléchi vers l'échantillon où des absorptions interviennent (Fig. 4). Le faisceau arrive ensuite sur le détecteur qui le transforme en signal électrique. Le signal du détecteur apparaît comme un interférogramme : signature de l'intensité en fonction de la position du miroir (somme de toutes les fréquences du faisceau). Cet interférogramme est ensuite converti en un spectre infrarouge par une opération mathématique appelée Transformée de Fourier (TF) (Movasaghi & Rehman, 2008).

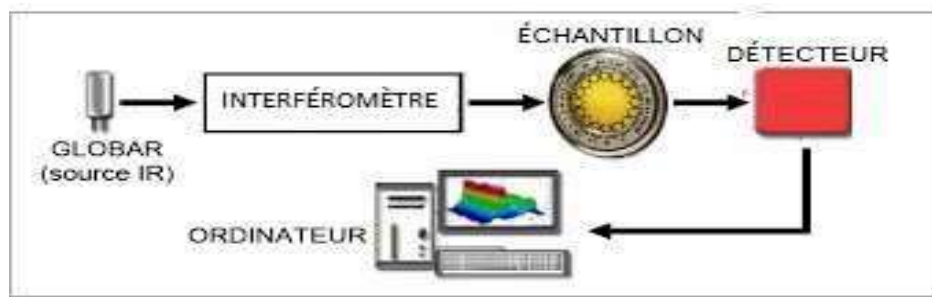


Figure 4. Schéma théorique de fonctionnement de la spectroscopie FTIR (Movasaghi & Rehman, 2008)

Chapitre II. Caractérisation de matières plastiques dans les échantillons biologiques

II.4 La spectroscopie Raman

Comme la FTIR, la spectroscopie Raman est une technique de spectroscopie moléculaire qui repose sur l'interaction de la lumière avec la matière pour obtenir des informations sur la composition ou les caractéristiques de la matière étudiée. Les informations obtenues par spectroscopie Raman résultent d'un processus de diffusion de la lumière, alors que la spectroscopie IR repose sur l'absorption de lumière. La spectroscopie Raman permet d'obtenir des informations sur les vibrations intra- et intermoléculaires et peut fournir des données complémentaires pour mieux comprendre la réaction. Les spectroscopies FTIR et Raman définissent le spectre caractéristique des vibrations d'une molécule (« empreinte moléculaire »), dans le but d'identifier une substance. Cependant, la spectroscopie Raman permet d'obtenir des informations supplémentaires sur les modes de fréquence inférieurs et sur les vibrations caractéristiques des réseaux cristallins et des structures moléculaires (**Lewis et al., 2001**).

Les spectres Raman sont mesurés en excitant un échantillon à l'aide d'un faisceau laser de haute intensité, la lumière diffusée résultante étant passée à travers un spectromètre. Le décalage Raman est la différence d'énergie entre la lumière incidente et la lumière diffusée. Dans le spectre résultant, l'axe vertical est l'intensité de la lumière diffusée et l'axe horizontal est le nombre d'onde du décalage Raman (cm^{-1}) (**Smith & Dent, 2019**).

II.5 Les méthodes d'identification thermo-analytique

L'analyse thermo-analytique est une technique d'analyse thermique qui consiste en la mesure de la variation de grandeurs physiques ou chimiques d'un échantillon en fonction du temps, pour une température ou un profil de température donné (**Baitalow et al., 2002**).

D'ordinaire, l'identification de polymères est basée sur des produits de pyrolyse spécifiques ou sur le profil des pics du pyrogramme. La décomposition thermique de certains polymères tels que le polystyrène (PS), donne lieu à un petit nombre de produits de dégradation spécifiques et, comme cela, à des pyrogrammes simples comportant quelques pics discrets. Le pyrogramme du polyéthylène (PE), par exemple, est beaucoup plus complexe. Il est constitué d'une série de triplets provenant de séries homologues d'alcanes, d'alcènes et d'alcadiènes. L'interprétation des pyrogrammes des polymères réticulés (comme les vernis et les résines) tout comme l'identification de leurs produits de décomposition individuels est très difficile. Cependant, l'identification des polymères est possible en comparant les pyrogrammes avec ceux des matériaux de référence (**Lin et al., 2021**).

Chapitre II. Caractérisation de matières plastiques dans les échantillons biologiques

Les méthodes thermo-analytiques utilisant des produits de dégradation typiques comme composés indicateurs, sont des approches prometteuses pour la quantification des MP. Ces composés indicateurs doivent être spécifiques aux différents polymères, et une relation linéaire entre la masse du polymère et la quantité de composé indicateur libéré pendant la dégradation thermique est nécessaire. Au moyen de courbes d'étalonnage, la quantification indirecte des polymères est possible en utilisant le signal du détecteur des composés indicateurs. Cependant, comme certains de ces produits de dégradation peuvent également être formés à partir d'ingrédients de la matrice présents dans l'échantillon biologique, la sélectivité des composés indicateurs doit être évaluée (Fries *et al.*, 2013).

II.6 L'imagerie hyperspectrale (HSI)

L'imagerie hyperspectrale ou spectro-imagerie est une technologie permettant d'obtenir l'image d'une scène dans un grand nombre (généralement plus d'une centaine) de bandes spectrales à la fois étroites et contiguës. Autrement, elle fournit l'information spatiale et spectrale de chaque pixel de l'image et permet ainsi d'identifier une molécule, un matériau ou un tissu grâce à sa signature spectrale unique. Effectivement, la lumière qui frappe chaque pixel est décomposée en plusieurs bandes spectrales différentes afin de fournir plus d'informations sur ce qui est imagé (Heirman, 2020).

Chapitre III. Matériel et méthodes

III.1 Échantillonnage de poissons

Tous nos échantillons de poissons proviennent des eaux marines et côtières de Bejaia. Pendant tout le mois de Mai et tous les deux jours, des marins pêcheurs qui sillonnaient quotidiennement le large et les eaux côtières de Bejaia nous fournissaient des échantillons de poissons.

Notre intérêt est porté sur les espèces de poissons suivantes (**Fig. 5**) : Pageot acarné (*Pagelus acarne*), Rouget barbet (*Mullus surmuletus*), Chinchard ou Saurel (*Trachurus trachurus*), Allache (*Sardinella aurita*), Engraulidé ou Anchois (*Engraulis encrasiocolus*), et la Bogue (*Boops Boops*). Ces espèces prisées et largement consommées sont comptées parmi les espèces méditerranéennes qui connaissent aujourd'hui une diminution drastique de leurs stocks (**Vasilakopoulos et al., 2014**).

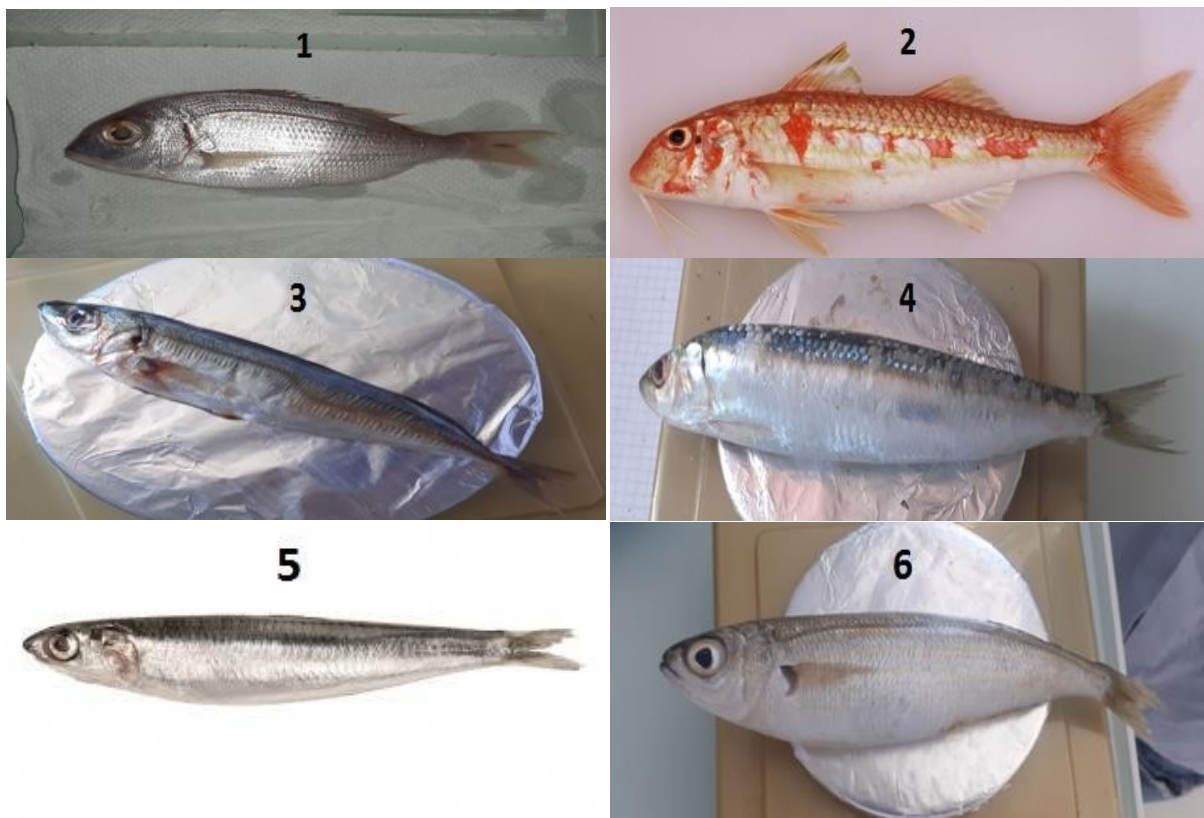


Figure 5. Espèces de poissons capturées au large et dans les eaux côtières de Bejaia (**Clichés, Ouali & Ouali, 2022**). 1. Pageot acarné (*Pagelus acarne*) 2. Rouget barbet (*Mullus surmuletus*) 3. Chinchard (*Trachurus trachurus*) 4. Allache (*Sardinella aurita*) 5. Engraulidé (*Engraulis encrasiocolus*) 6. Bogue (*Boops Boops*).

III.2 Transport et conservation des échantillons de poissons

Pour préserver nos échantillons de poissons, ces derniers étaient transportés dans des glacières, Une fois arrivés au laboratoire, ils étaient mis dans des sachets plastiques Zip étiquetés (l'étiquette sur le sachet Zip portait le nom de l'espèce et la date de l'échantillonnage), puis conservés dans un réfrigérateur à 0° C.

III.3 Taille et poids des poissons

Le travail dans le laboratoire a consisté d'abord à prendre les mensurations de taille et de poids des poissons. Les mesures de tailles (la longueur allant de la porte du museau jusqu'à l'extrémité du lobe de la nageoire caudale) et de poids des poissons étaient respectivement effectuées au moyen de pied à coulisse électronique digital 16Er Mahr et de balance KERN PCB de précision 0.1 g.

III.4 Recherche des microplastiques dans les tubes digestifs des poissons

III.4.1 Examen optique des tubes digestifs des poissons

III.4.1.1 Extraction des tubes digestifs des poissons

Pour séparer le tube digestif du reste du corps de poisson, nous pratiquions à l'aide d'un ciseau et d'une sonde cannelée une incision du corps du poisson allongé sur le dos (face dorsale contre la planche à dissection) de l'anus jusqu'à la tête, et par le truchement d'une pince à dissection nous retirions le tube digestif de l'animal.

III.4.1.2 Examen des tubes digestifs des poissons au stéréomicroscope

Avec une pince fine nous prélevons une petite partie de faible épaisseur du tube digestif de poissons. Le prélèvement est ensuite monté entre lame et lamelle en vue d'une observation au stéréomicroscope (loupe binoculaire).

La recherche de potentiels microplastiques dans ces prélèvements consiste à explorer minutieusement toute la surface du prélèvement à la recherche de formes particulières (fragment, fibre, sphère, bille, mousse) ou de couleurs caractéristiques (transparent, noir, blanc, rouge, bleu, autre couleur) de microplastiques. Un smartphone est fixé sur l'oculaire du stéréomicroscope pour prendre des photos des observations montrant des formes ou des couleurs particulières de matériaux contaminants.

Les tubes digestifs correspondant aux prélèvements avec des observations intéressantes au stéréomicroscope étaient récupérés et séchés dans une étuve sous une température de 50 °C, puis broyés au moyen d'un mortier en porcelaine. Les broyats obtenus étaient ensuite conservés - dans des sachets de plastique Zip portant les noms des espèces de poissons en question- pour l'analyse par spectroscopie FTIR.

III.4.2 Analyse chimique des tubes digestifs des poissons

Après que de potentiels contaminants MP aient été détectés dans les tubes digestifs de nos poissons, nous aurons besoin de l'analyse des broyats obtenus par spectroscopie FITR pour confirmer la nature polymérique des matériaux détectés.

III.4.2.1 Digestion chimiques des tubes digestifs des poissons

La digestion dans ce cas permet d'éliminer le maximum de matière organique et d'épargner les plastiques qui ne devraient pas être dégradés. Ainsi, nous avons choisi la digestion alcaline, très recommandée et réputée sans effet sur l'intégrité chimique des polymères de plastiques (**Enders et al., 2016**).

Avec la digestion alcaline, les broyats des tubes digestifs des poissons sont attaqués par une solution mélange d'hydroxyde de potassium et de perchlorate de sodium (KOH/NaClO₄ diluée à 30%) ; nous ajoutons 5 ml de la solution de digestion pour chaque gramme de broyat (**Enders et al., 2016**). Les traitements étaient ensuite soumis à un bain ultrasonique (Stainless Steel 304 Digital Axiva Ultrasonicator) de 15 minutes suivi de deux heures d'agitation mécanique (AM4 Digital PRO Agitateur chauffant multipositions) (**Enders et al., 2016**).

Les produits de digestion (minéralisats) des tubes digestifs des espèces de poissons étaient après coup séchés et conservés pour l'analyse par spectroscopie FTIR.

III.4.2.2 Analyse des minéralisats par spectroscopie FTIR

Pour caractériser la composition chimique des minéralisats obtenus, nous avons utilisé la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (spectromètre Nicolet iS50 FTIR Spectrometer) en mode réflexion totale atténuée (ATR). Les spectres des minéralisats ont été obtenus en effectuant des balayages entre 4 000 et 400 cm⁻¹, avec une résolution de 1 cm⁻¹. Ces spectres étaient ensuite comparés aux spectres de références pour identifier les macromolécules (polymères) présentes dans nos minéralisats.

Chapitre IV. Résultats et discussion

IV.1 Résultats

IV.1.1 Taille et poids des poissons

Les tailles et poids des poissons dans nos échantillons varient notablement selon les espèces. Les longueurs et poids moyens par espèce varient de 14.8-17.93 cm, et de 21.8-64.5 g, respectivement.

IV.1.2 Examen des tube digestifs des poissons au stéréomicroscope

L'observation au stéréomicroscope des prélèvements des tubes digestifs des six espèces de poissons échantillonnées montrent de petits fragments contaminants (**Fig. 6**) de formes et de couleurs différentes dans leurs parties digestives.

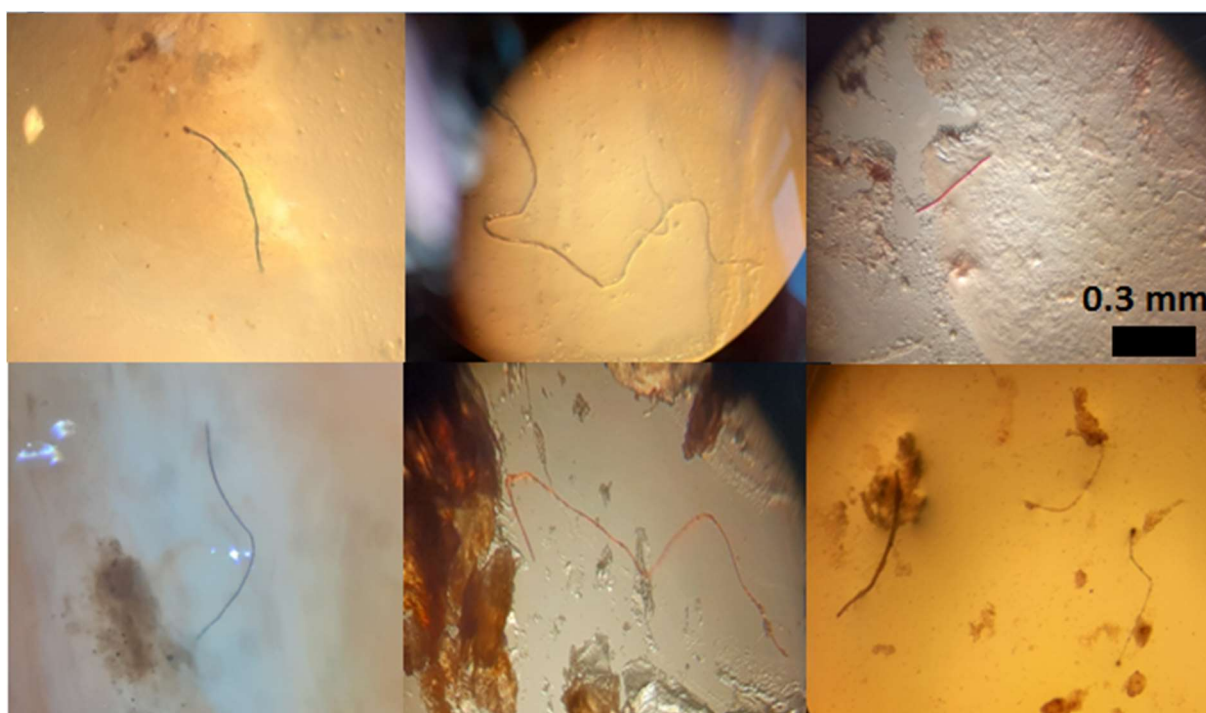


Figure 6. Fragments contaminants observés au stéréomicroscope dans les tubes digestifs des espèces de poissons échantillonnées (Clichés, Ouadi & Ouali, 2022)

Nous distinguons parmi les fragments caractéristiques observés dans les parties digestives de nos poissons des formes fibreuses, sphériques, et microbilles aux couleursb particulièrement rouges, bleues, noires, violettes, et vertes.

IV.1.3 Analyse par spectroscopie FTIR des tubes digestifs des poissons

L'analyse et la comparaison des spectres de nos échantillons biologiques (minéralisés des tubes digestifs de poissons) obtenus par spectroscopie FTIR confirment la présence de polymères de microplastiques dans trois de nos échantillons correspondant aux espèces de *Sardinella aurita*, *Mullus surmuletus*, et *Pagelus acarne*. Effectivement, les liaisons chimiques présentes à la surface de nos trois échantillons correspondent à l'identité spectrale des liaisons chimiques CH_2 et C-CH_3 de Polychlorure de vinyle (PVC). (Fig. 7, 8, 9).

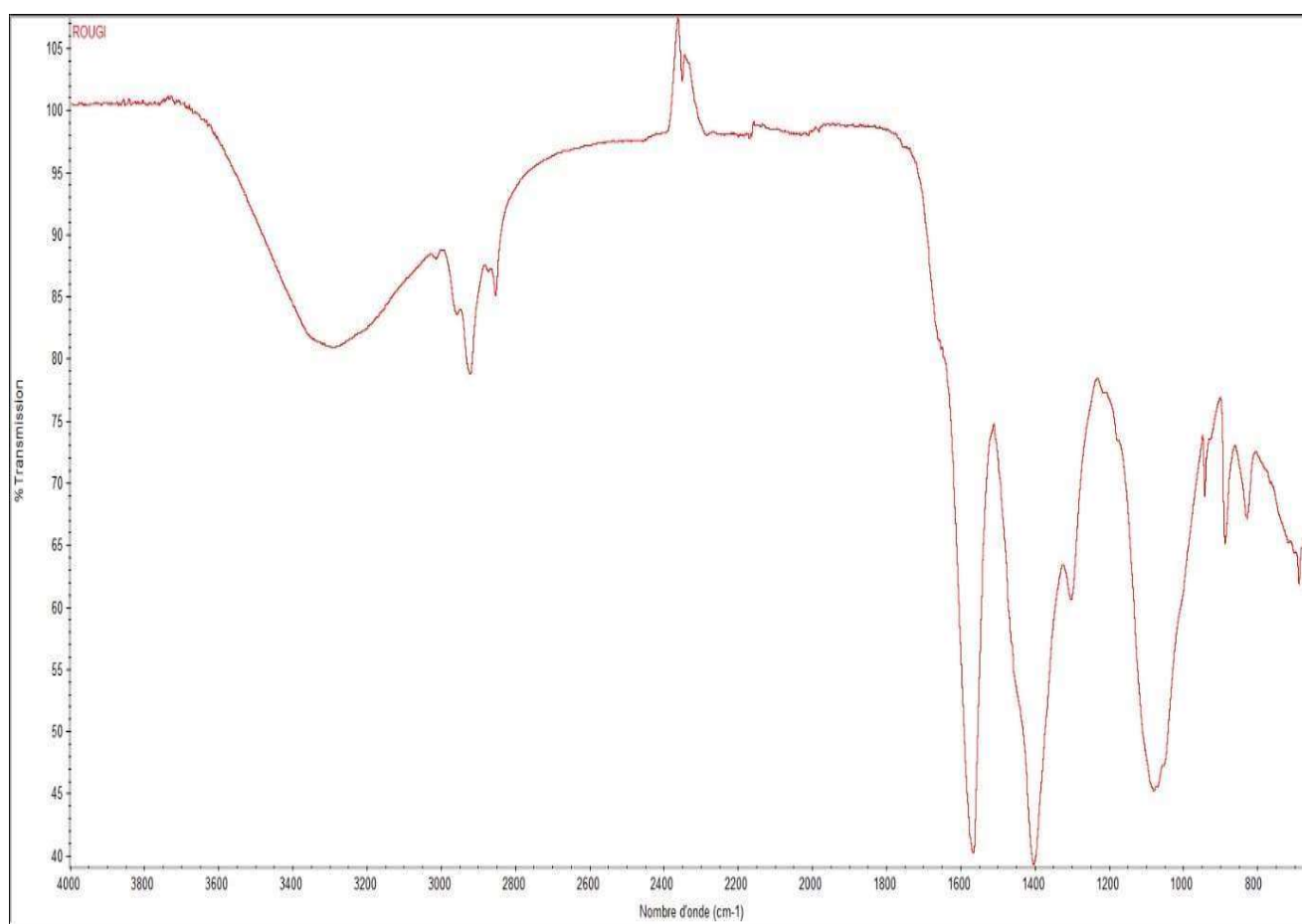


Figure 7. Spectre FTIR de l'échantillon biologique de *Sardinella aurita*

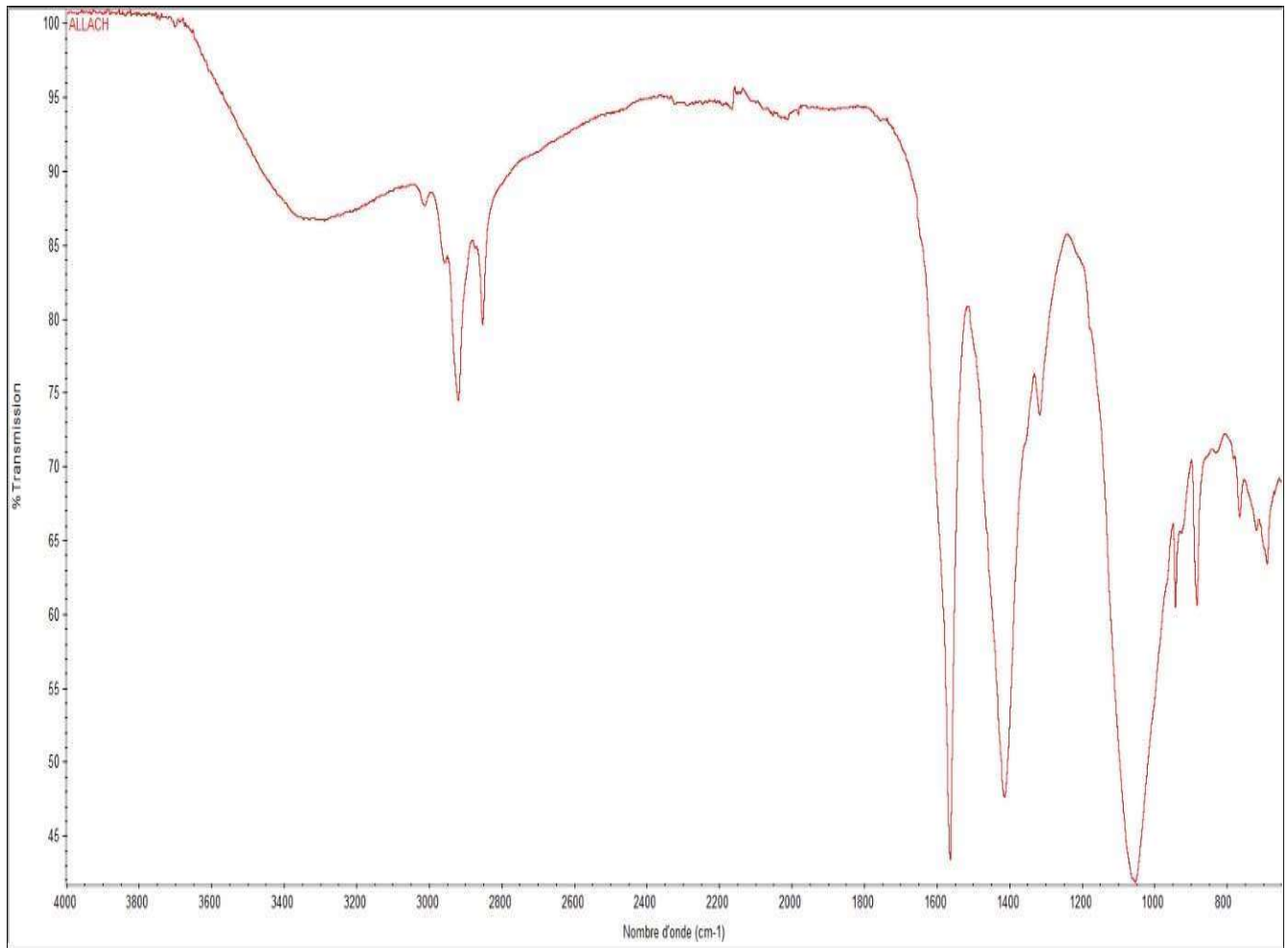


Figure 8. Spectre FTIR de l'échantillon biologique de *Mullus surmuletus*

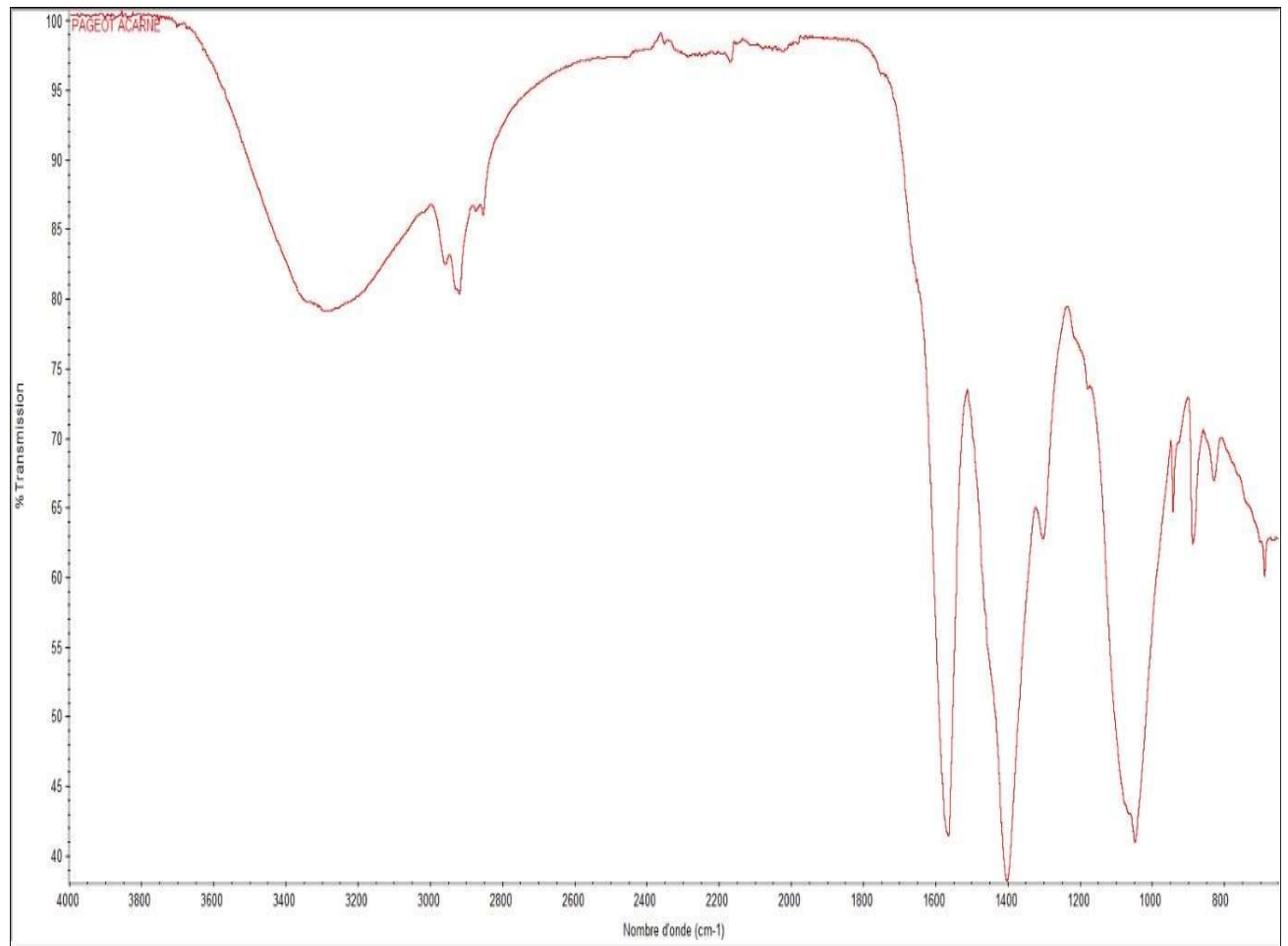


Figure 9. Spectre FTIR de l'échantillon biologique de *Pagelus acarne*

IV.2 Discussion

IV.2.1 Détection optique de microplastiques

L'observation visuelle des tubes digestifs des poissons échantillonnés nous a permis de détecter de fragments contaminants dans les parties gastro-intestinales de toutes les espèces de poissons étudiées. Néanmoins, cette approche reste relativement limitée et ne peut pas confirmer la nature chimique des fragments observés dans les tubes digestifs des poissons et aurait ainsi besoin pour cela d'être couplée à l'analyse chimique des tubes digestifs de poissons digérés (Miller *et al.*, 2017).

En fait, dans l'étude de (Lenz *et al.*, 2015), ayant pour but de comparer l'identification visuelle des MP à celle réalisée par des méthodes d'analyse chimique. Les particules identifiées visuellement comme des MP ne sont en réalité des plastiques que dans 68% des cas. De plus, l'identification visuelle est possible avec des particules de plus grosse taille, de l'ordre du millimètre. Le succès de l'identification visuelle dépend essentiellement de la couleur des particules : les particules noires ou transparentes sont souvent peu identifiées par les méthodes d'analyse chimique comme étant du plastique. De plus, les pigments ajoutés comme additifs dans les plastiques peuvent masquer le signal du polymère (Imhof *et al.*, 2016; Obmann *et al.*, 2018). Dans l'étude de Lenz *et al.* (2015), il a aussi été montré que les additifs (dont les pigments) et le relief de la surface du plastique peuvent avoir une incidence sur l'identification des familles de plastiques pouvant aller jusqu'à une mauvaise identification. D'autres études ont eu pour but d'automatiser la détection puis l'identification des MP en utilisant des méthodes d'analyse chimique comme la spectroscopie Raman ou la spectroscopie FTIR (Frère *et al.*, 2016).

IV.2.2 Caractérisation de microplastiques par l'analyse chimique

Lorsque nous avons couplé l'analyse par spectroscopie FTIR avec la technique de détection optique pour confirmer ou non la nature plastique des fragments observés au stéréomicroscope dans les tubes digestifs des six espèces de poissons, **la spectroscopie infrarouge à transformée de fourier** nous confirment que les microplastiques (ou plastiques de polychlorure de vinyle) sont réellement présents chez trois espèces de poissons : *Sardinella aurita*, *Mullus surmuletus*, et *Pagelus acarne*.

Ces observations s'ajoutent à celles faites sur de nombreuses espèces marines méditerranéennes chez qui de potentiels microplastiques étaient effectivement identifiés dans leurs parties digestives notamment.

Chapitre IV. Résultats et discussion

Effectivement, les espèces méditerranéennes de bivalves filtreurs comme *Mytilus edulis* ou *Mytilus galloprovincialis*, du fait de leur mode d'alimentation, ingèrent des MP présents dans l'environnement. Il a été montré que les moules ingèrent de 0,05 à 0,37 MP/g de chair humide le long des côtes européennes Ouest de la Méditerranée (**Van Cauwenberghe & Janssen, 2014; Van Cauwenberghe et al., 2015; Vandermeersch et al., 2015 ; Phuong et al., 2018**). Néanmoins, le long des côtes Est de la Méditerranée, l'ingestion de MP varie de 0,9 à 4,6 MP/g de chair humide, soit 1,5 à 7,6 MP/individu, ce qui est bien supérieur au niveau de contamination dans le Nord-Est de la Méditerranée (**Li et al., 2016 ; Li et al., 2018**). De plus, **Li et al. (2016)** ont mis en évidence une présence de MP significativement plus importante pour les moules sauvages (4,6 MP/individu – 2,7 MP/g de chair humide) en comparaison aux moules d'aquaculture (3,3 MP/individu – 1,6 MP/g de chair humide) ainsi qu'une ingestion de MP plus importante en zones méditerranéenne anthropisées (3,3 MP/g de chair humide) (**Li et al., 2016**). Le même type de résultats a été trouvé concernant la contamination en MP plus importante pour des moules d'aquaculture (**Mathalon & Hill, 2014**). Néanmoins, l'étude de **Mathalon et Hill (2014)** présente quelques biais analytiques et une potentielle contamination des échantillons avec des fibres provenant de l'environnement du laboratoire.

Une étude sur les crevettes grises le long des côtes européennes en Méditerranée met en évidence un taux de contamination de 63% des crevettes échantillonnées (**Devriese et al., 2015**). Concernant les langoustines, sur 120 individus échantillonnés, 83% contenaient des MP (**Murray & Cowie, 2011**) alors qu'une autre étude révélait un niveau de contamination de 67% sur 1450 langoustines échantillonnées (**Welden & Cowie, 2016**).

À ce jour, vingt études sur vingt espèces méditerranéennes différentes d'invertébrés marins ont été réalisées afin de caractériser la présence de MP dans ces espèces. L'effort d'échantillonnage varie de 5 individus échantillonnés par site (**Vandermeersch et al., 2015**) à 1450 (**Welden & Cowie, 2016**) et la contamination varie de 0,05 MP/g de chair humide pour des moules (*M. galloprovincialis*) échantillonnées en Italie (**Vandermeersch et al., 2015**) à 10,5 MP/g de chair humide pour des bivalves échantillonnés sur les côtes françaises (**Li et al., 2015**).

Chez les poissons, la présence de plastiques dans les tractus gastro-intestinaux (TGI) chez les poissons, comprenant les actinoptérygiens et les chondrichthyens, a été montrée dans les côtes Nord de la Méditerranée. En 1972, **Carpenter et al. (1972)** a mis en évidence pour la première fois l'ingestion de MP chez des poissons pêchés aux larges l'Italie. Dans les

années 70, d'autres études ont démontré l'ingestion des MP chez des poissons aux larges de la France (**Kartar et al., 1973; Kartar et al., 1976**).

Tous les types de poissons, pélagiques, démersaux et benthiques, sont contaminés. Des études montrent l'ingestion de MP par des espèces de poissons méso-pélagiques en Espagne (**Boerger et al., 2010; Davison et Asch, 2011 ; Choy & Drazen, 2013**) ainsi qu'en Grèce (**Lusher et al., 2015**). De plus, chez des espèces de poissons méso-pélagiques en France, **Lusher et al. (2015)** n'ont pas mis en évidence de différence d'ingestion de plastique en fonction de l'espèce étudiée, du comportement de migration verticale : absence ou présence de migration et de l'heure de capture : en journée ou la nuit.

Par ailleurs, une étude comparative sur sept espèces (*Gadus morhua*, *Merlangius merlangus*, *Melanogrammus aeglefinus*, *Clupea harengus*, *Trachurus trachurus*, *Eutrigla gurnardus* et *Scomber scombrus*) des côtes Est et Ouest de l'Italie, a montré une différence d'ingestion entre ces deux zones géographiques (**Foekema et al., 2013**). Les poissons dans l'Est de l'Italie ingèrent en moyenne plus de MP (5,4%) que les poissons dans l'Ouest de l'Italie (1,2%) (**Foekema et al., 2013**). Une autre étude concernant dix espèces de poissons en France montre une ingestion de MP pour 37% des 504 poissons échantillonnés (**Lusher et al., 2013**). Aucune différence d'ingestion de MP n'a été mise en évidence entre les espèces pélagiques (*M. merlangus*, *Micromeditius poutassou*, *T. trachurus*, *Trisoperus minutus* et *Zeus faber*) et benthiques (*Aspitrigla cuculus*, *Callionymus lyra*, *Cepola macrophthalma*, *Buglossisium luteum* et *Microchirus variegates*) (**Lusher et al., 2013**). Dans les eaux maltaises, l'ingestion de macro- et microplastiques a été observée chez cinq espèces de poissons (*Pleuronectes platessa*, *Platichthys flesus*, *Limanda limanda*, *Lepidorhombus whiffiagonis* et *Argentina silus*) (**Murphy et al., 2017**). Dans cette étude, il a été démontré que les espèces vivantes en zones côtières ainsi que les espèces démersales ingèrent significativement plus de débris de plastique que les espèces du large et pélagiques (**Murphy et al., 2017**).

Conclusion

Conclusion

La Mer Méditerranée connaît ces dernières décades des baisses importantes de ses stocks de poissons. Ces diminutions seraient éventuellement causées par le non respect de repos biologique de poissons, la surpêche, le réchauffement climatique, et la pollution marine.

Quoique la pollution est quelquefois ignorée, elle pourrait néanmoins influencer fortement la dynamique actuelle des stocks de poissons en Méditerranée.

Face à une pollution par de microplastiques notablement oubliée dans notre contexte sud-méditerranéen, nous avons tenté d'obtenir les premières preuves de contamination de poissons vivant au large de nos côtes méditerranéennes par de microplastiques présents dans l'environnement.

Éventuellement, dans cette étude nous avons cherché à caractériser de microplastiques contaminants dans les tubes digestifs de poissons capturés à Bejaia dans le Sud de la Méditerranée. Le couplage de méthodes de détection optique et d'identification chimique de microplastiques nous est permis d'identifier effectivement des microplastiques dans les tubes digestifs des poissons.

Ces résultats seraient les premières preuves empiriques de contamination de poissons par de microplastiques en Algérie et par ailleurs dans le Sud de la Méditerranée. Ces contaminations pourraient de fait expliquer en partie le déclin actuel des stocks de poissons en Méditerranée.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- **Andrady, A. L. (2011).** Microplastics in the marine environment. *Marine pollution bulletin*, 62(8), 1596-1605.
- **Baitalow, F., Baumann, J., Wolf, G., Jaenicke-Röbber, K., & Leitner, G. (2002).** Thermal decomposition of B–N–H compounds investigated by using combined thermoanalytical methods. *Thermochimica Acta*, 391(1-2), 159-168.
- **Boerger, C. M., Lattin, G. L., Moore, S. L., & Moore, C. J. (2010).** Plastic ingestion by planktivorous fishes in the North Pacific Central Gyre. *Marine pollution bulletin*, 60(12), 2275-2278.
- **Carpenter, E. J., Anderson, S. J., Harvey, G. R., Miklas, H. P., & Peck, B. B. (1972).** *Polystyrene spherules in coastal waters. Science*, 178(4062), 749-750.
- **Choy, C. A., & Drazen, J. C. (2013).** Plastic for dinner? Observations of frequent debris ingestion by pelagic predatory fishes from the central North Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 485, 155-163.
- **Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011).** Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine pollution bulletin*, 62(12), 2588-2597.
- **Davison, P., & Asch, R. G. (2011).** Plastic ingestion by mesopelagic fishes in the North Pacific Subtropical Gyre. *Marine Ecology Progress Series*, 432, 173-180.
- **Desforges, J. P. W., Galbraith, M., & Ross, P. S. (2015).** Ingestion of microplastics by zooplankton in the Northeast Pacific Ocean. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 69(3), 320-330.
- **Ding, L., Mao, R., Ma, S., Guo, X., & Zhu, L. (2020).** High temperature depended on the ageing mechanism of microplastics under different environmental conditions and its effect on the distribution of organic pollutants. *Water research*, 174, 115634.
- **Enders, K., Lenz, R., Beer, S., & Stedmon, C. A. (2017).** Extraction of microplastic from biota: recommended acidic digestion destroys common plastic polymers. *ICES Journal of Marine Science*, 74(1), 326-331.
- **Fendall, L. S., & Sewell, M. A. (2009).** Contributing to marine pollution by washing your face: microplastics in facial cleansers. *Marine pollution bulletin*, 58(8), 1225-1228.
- **Filella, M. (2015).** Questions of size and numbers in environmental research on microplastics: methodological and conceptual aspects. *Environmental Chemistry*, 12(5), 527-538.
- **Frère, L., Paul-Pont, I., Moreau, J., Soudant, P., Lambert, C., Huvet, A., & Rinnert, E. (2016).** A semi-automated Raman micro-spectroscopy method for morphological and chemical characterizations of microplastic litter. *Marine Pollution Bulletin*, 113(1-2), 461-468.

Références bibliographiques

- Fries, E., Dekiff, J. H., Willmeyer, J., Nuelle, M. T., Ebert, M., & Remy, D. (2013). Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy. *Environmental science: processes & impacts*, 15(10), 1949-1956.
- Frias, J. P., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine pollution bulletin*, 138, 145-147.
- Foekema, E. M., De Gruijter, C., Mergia, M. T., van Franeker, J. A., Murk, A. J., & Koelmans, A. A. (2013). Plastic in north sea fish. *Environmental science & technology*, 47(15), 8818-8824.
- Galgani, F., Bruzaud, S., Duflos, G., Fabre, P., Gastaldi, E., Ghiglione, J., ... & Ter Halle, A. (2020). Pollution des océans par les plastiques et les microplastiques. Techniques de l'Ingenieur.
- Gedde, U. L. F. (1995). *Polymer physics*. Springer Science & Business Media.
- Hale, R. C., Seeley, M. E., La Guardia, M. J., Mai, L., & Zeng, E. Y. (2020). A global perspective on microplastics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(1), e2018JC014719.
- Hecke, M., & Schomburg, W. K. (2003). Review on micro molding of thermoplastic polymers. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14(3), R1.
- Hsissou, R., Seghiri, R., Benzekri, Z., Hilali, M., Rafik, M., & Elharfi, A. (2021). Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite structures*, 262, 113640.
- Imhof, H. K., Laforsch, C., Wiesheu, A. C., Schmid, J., Anger, P. M., Niessner, R., & Ivleva, N. P. (2016). Pigments and plastic in limnetic ecosystems: A qualitative and quantitative study on microparticles of different size classes. *Water research*, 98, 64-74.
- Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., ... & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771.
- Kariduraganavar, M. Y., Kittur, A. A., & Kamble, R. R. (2014). Polymer synthesis and processing. *In Natural and synthetic biomedical polymers* (pp. 1-31). Elsevier.
- Lambert, S., Sinclair, C., & Boxall, A. (2014). Occurrence, degradation, and effect of polymer-based materials in the environment. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, Volume 227, 1-53.
- Lenz, R., Enders, K., Stedmon, C. A., Mackenzie, D. M., & Nielsen, T. G. (2015). A critical assessment of visual identification of marine microplastic using Raman spectroscopy for analysis improvement. *Marine Pollution Bulletin*, 100(1), 82-91.
- Lewis, I. R., & Edwards, H. (2001). *Handbook of Raman spectroscopy: from the research laboratory to the process line*. CRC press.
- Li, K., Fang, L., & He, L. (2019). How population and energy price affect China's environmental pollution?. *Energy policy*, 129, 386-396.

Références bibliographiques

- **Li, W., Chen, X., Li, M., Cai, Z., Gong, H., & Yan, M. (2022).** Microplastics as an aquatic pollutant affect gut microbiota within aquatic animals. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127094.
- **Lin, J., Xu, X. P., Yue, B. Y., Li, Y., Zhou, Q. Z., Xu, X. M., ... & Wang, J. H. (2021).** A novel thermoanalytical method for quantifying microplastics in marine sediments. *Science of the Total Environment*, 760, 144316.
- **Longhitano, N. (2021).** *Élaboration de matériaux polymères thermodurcissables à partir de lignines modifiées* (Doctoral dissertation, Bordeaux).
- **Lusher, A. L., Tirelli, V., O'Connor, I., & Officer, R. (2015).** Microplastics in Arctic polar waters: the first reported values of particles in surface and sub-surface samples. *Scientific reports*, 5(1), 1-9.
- **Lusher, A. L., Mchugh, M., & Thompson, R. C. (2013).** Occurrence of microplastics in the gastrointestinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel. *Marine pollution bulletin*, 67(1-2), 94-99.
- **Mathalon, A., & Hill, P. (2014).** Microplastic fibers in the intertidal ecosystem surrounding Halifax Harbor, Nova Scotia. *Marine pollution bulletin*, 81(1), 69-79.
- **Miller, M. E., Kroon, F. J., & Motti, C. A. (2017).** Recovering microplastics from marine samples: a review of current practices. *Marine Pollution Bulletin*, 123(1-2), 6-18.
- **Morét-Ferguson, S., Law, K. L., Proskurowski, G., Murphy, E. K., Peacock, E. E., & Reddy, C. M. (2010).** The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean. *Marine pollution bulletin*, 60(10), 1873-1878.
- **Movasaghi, Z., Rehman, S., & ur Rehman, D. I. (2008).** Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of biological tissues. *Applied Spectroscopy Reviews*, 43(2), 134-179.
- **Murphy, F., Russell, M., Ewins, C., & Quinn, B. (2017).** The uptake of macroplastic & microplastic by demersal & pelagic fish in the Northeast Atlantic around Scotland. *Marine Pollution Bulletin*, 122(1-2), 353-359.
- **Murray, F., & Cowie, P. R. (2011).** Plastic contamination in the decapod crustacean *Nephrops norvegicus* (Linnaeus, 1758). *Marine pollution bulletin*, 62(6), 1207-1217.
- **Welden, N. A., & Cowie, P. R. (2016).** Long-term microplastic retention causes reduced body condition in the langoustine, *Nephrops norvegicus*. *Environmental pollution*, 218, 895-900.
- **Oßmann, B. E., Sarau, G., Holtmannspötter, H., Pischetsrieder, M., Christiansen, S. H., & Dicke, W. (2018).** Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. *Water research*, 141, 307-316.

Références bibliographiques

- **Ory, N., Chagnon, C., Felix, F., Fernández, C., Ferreira, J. L., Gallardo, C., ... & Thiel, M. (2018).** Low prevalence of microplastic contamination in planktivorous fish species from the southeast Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 127, 211-216.
- **Phillips, M. B., & Bonner, T. H. (2015).** Occurrence and amount of microplastic ingested by fishes in watersheds of the Gulf of Mexico. *Marine pollution bulletin*, 100(1), 264-269.
- **Phuong, N. N., Poirier, L., Pham, Q. T., Lagarde, F., & Zalouk-Vergnoux, A. (2018).** Factors influencing the microplastic contamination of bivalves from the French Atlantic coast: location, season and/or mode of life?. *Marine Pollution Bulletin*, 129(2), 664-674.
- **Regourd, M., & Hornain, H. (1975).** Applications de la microscopie électronique à balayage. *Revue des matériaux de construction*, (693).
- **Renner, G., Schmidt, T. C., & Schram, J. (2018).** Analytical methodologies for monitoring micro (nano) plastics: which are fit for purpose?. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 55-61.
- **Romeo, T., Pietro, B., Pedà, C., Consoli, P., Andaloro, F., & Fossi, M. C. (2015).** First evidence of presence of plastic debris in stomach of large pelagic fish in the Mediterranean Sea. *Marine pollution bulletin*, 95(1), 358-361.
- **Sahajwalla, V., & Gaikwad, V. (2018).** The present and future of e-waste plastics recycling. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 102-107.
- **Sahajwalla, V., & Gaikwad, V. (2018).** The present and future of e-waste plastics recycling. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 102-107.
- **Smith, E., & Dent, G. (2019).** *Modern Raman spectroscopy: a practical approach*. John Wiley & Sons.
- **Sridhar, A., Kannan, D., Kapoor, A., & Prabhakar, S. (2022).** Extraction and detection methods of microplastics in food and marine systems: a critical review. *Chemosphere*, 286, 131653.
- **Trestrail, C., Nugegoda, D., & Shimeta, J. (2020).** Invertebrate responses to microplastic ingestion: Reviewing the role of the antioxidant system. *Science of The Total Environment*, 734, 138559.
- **Van Cauwenberghe, L., & Janssen, C. R. (2014).** Microplastics in bivalves cultured for human consumption. *Environmental pollution*, 193, 65-70.
- **Van Cauwenberghe, L., Devriese, L., Galgani, F., Robbens, J., & Janssen, C. R. (2015).** Microplastics in sediments: a review of techniques, occurrence and effects. *Marine environmental research*, 111, 5-17.
- **Vandermeersch, G., Van Cauwenberghe, L., Janssen, C. R., Marques, A., Granby, K., Fait, G., ... & Devriese, L. (2015).** A critical view on microplastic quantification in aquatic organisms. *Environmental Research*, 143, 46-55.

Références bibliographiques

- **Vasilakopoulos, P., Maravelias, C. D., & Tserpes, G. (2014).** The alarming decline of Mediterranean fish stocks. *Current Biology*, 24(14), 1643-1648.
- **Verney, V., Koumba, G. B., Jestin, F. D., Zdybal, D., Askanian, H., Peiry, J. L., ... & Liboiron, M. (2018, January).** Macro et Micro (plastiques) Présents dans les Environnements de Rivières Françaises. In *Polymères et Océans*.
- **Vijayakumar, A., & Sebastian, J. (2018, August).** Pyrolysis process to produce fuel from different types of plastic—a review. In IOP conference series: *Materials Science and Engineering* (Vol. 396, No.1, p. 012062). IOP Publishing.
- **Welden, N. A., & Cowie, P. R. (2016).** Environment and gut morphology influence microplastic retention in langoustine, *Nephrops norvegicus*. *Environmental Pollution*, 214, 859-865.
- **Wright, S. L., Thompson, R. C., & Galloway, T. S. (2013).** The physical impacts of microplastics on marine organisms: a review. *Environmental pollution*, 178, 483-492.
- **Xu, E. G., Cheong, R. S., Liu, L., Hernandez, L. M., Azimzada, A., Bayen, S., & Tufenkji, N. (2020).** Primary and secondary plastic particles exhibit limited acute toxicity but chronic effects on *Daphnia magna*. *Environmental Science & Technology*, 54(11), 6859-6868.
- **Zhang, D., Cui, Y., Zhou, H., Jin, C., Yu, X., Xu, Y., ... & Zhang, C. (2020).** Microplastic pollution in water, sediment, and fish from artificial reefs around the Ma'an Archipelago, Shengsi, China. *Science of the Total Environment*, 703, 134768.

Résumé

La contamination des faunes marines par de microplastiques serait des moins documentée dans notre contexte sud-méditerranéen. Réellement, le passage des microplastiques dans les organismes marins est d'autant plus évident qu'ils sont présents dans l'environnement. Dans cette étude, nous avons tenté d'apporter les premières preuves empiriques de l'interaction potentielle de microplastiques dans la Mer avec des poissons marins capturés à Bejaia dans le Sud de la Méditerranée. L'examen des tubes digestifs des poissons capturés par l'observation visuelle et l'analyse chimique à la recherche de potentiels microplastiques montre une contamination par les plastiques de polychlorure de vinyle chez trois espèces de poissons (*Sardinella aurita*, *Mullus surmuletus*, *Pagelus acarne*). Ces résultats sont des preuves pratiques sur une pollution insidieuse à l'évidence très négative pour les faunes marines en Méditerranée, mais qui est restée irrationnellement ignorée dans notre contexte.

Mots clés: Microplastiques, Pollution marine, Pollution en Méditerranée, Stocks de poissons, Caractérisation par FTIR

Abstract

The contamination of marine fauna by microplastics would be the least documented in our South Mediterranean context. Indeed, the passage of microplastics in marine organisms is more obvious the more they are diffuse in the environment. In this study, we attempted to provide the first empirical evidence of the potential interaction of microplastics in the sea with fish captured in coastal and offshore waters in Bejaia in mediterranean. Examination of the digestive tracts of captured fish by optical observation and chemical characterization looking for contaminant microplastics shows contamination by polyvinyl chloride plastics in three fish species (*Sardinella aurita*, *Mullus surmuletus*, *Pagelus acarne*). These findings are practical evidence of an insidious pollution that is very negative for marine fauna in the Mediterranean, but irrationally has remained ignored in our context.

Keywords: Microplastics, marine pollution, Mediterranean pollution, fish stocks, FTIR characterization