



HAL
open science

Pollution des océans par les plastiques et les microplastiques Pollution of oceans by plastics and microplastics

Galgani Francois, Bruzaud Stéphane, Duflos Guillaume, Pascale Fabre, Casdaldi Emmanuelle, Ghiglione Jeff, Grimaud Régis, George Matthieu, Huvet Arnaud, Fabienne Lagarde, et al.

► **To cite this version:**

Galgani Francois, Bruzaud Stéphane, Duflos Guillaume, Pascale Fabre, Casdaldi Emmanuelle, et al.. Pollution des océans par les plastiques et les microplastiques Pollution of oceans by plastics and microplastics. Techniques de l'Ingénieur, 2020. hal-03048415v1

HAL Id: hal-03048415

<https://hal.science/hal-03048415v1>

Submitted on 15 Dec 2020 (v1), last revised 27 Nov 2021 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Pollution des océans par les plastiques et les microplastiques

Pollution of oceans by plastics and microplastics

Galgani Francois ¹, Bruzaud Stéphane ², Duflos Guillaume ³, Fabre Pascale ⁴, Casdaldi Emmanuelle ⁵, Ghiglione Jeff ⁶, Grimaud Régis ⁷, George Matthieu ⁸, Huvet Arnaud ⁹, Lagarde Fabienne ¹⁰, Paul-Pont Ika ¹¹, Ter Halle Alexandra ¹²

¹ IFREMER/ LER/PAC (Bastia), France

² Université de Bretagne-Sud, IRDL, UMR CNRS 6027 (Lorient), France

³ Laboratoire de sécurité des aliments, ANSES (Boulogne-sur-Mer), France

⁴ Laboratoire Charles Coulomb (L2C), UMR 5221 du CNRS-Université de Montpellier (Montpellier), France

⁵ Université de Montpellier/UMR 1208 IATE (Montpellier), France

⁶ Laboratoire LOMIC, UMR 7621 (Banyuls-sur-Mer), France

⁷ UMR5254 – UPPA/CNRS (Pau), France

⁸ Laboratoire Charles Coulomb (L2C), UMR 5221 du CNRS-Université de Montpellier (Montpellier), France

⁹ IFREMER LEMAR UMR CNRS 6539 (Brest), France

¹⁰ Le Mans Université, IMMM UMR 6283 (Le Mans), France

¹¹ CNRS, Université de Brest, IRD, IFREMER LEMAR (Plouzané), France

¹² IMRCP, CNRS UMR 5623 (Toulouse), France

Abstract :

Human behavior and the intensive use of plastic, combined with poor performance of management systems have led to a massive accumulation of plastic debris in the marine environment, accounting for 50 to 80 % of all marine litter. Their distribution, their fate, their degradation and their impacts stem directly from their composition and use properties. This article reviews knowledge and describes the main scientific, environmental and socio-economic issues, as well as the possible solutions needed to manage an environmental problem that has become global.

Résumé :

Les comportements humains et l'utilisation intensive du plastique associés à une faible performance des systèmes de gestion ont engendré une accumulation massive de déchets plastiques dans le milieu marin où ils représentent 50 à 80 % de l'ensemble des déchets. Leur distribution, leurs comportements en mer, leur dégradation et leurs impacts découlent directement de leur composition et propriétés d'usage. Le présent article fait un bilan des connaissances et décrit les principaux enjeux scientifiques, environnementaux et socio-économiques, ainsi que les possibles solutions nécessaires à la gestion d'un problème environnemental devenu global.

Table des matières

1	<i>Importance du plastique en mer</i>	1
2.	<i>Devenir du plastique en mer</i>	3
3.	<i>Dégradation du plastique en mer</i>	5
4.	<i>Impacts des plastiques</i>	10
5.	<i>Quelles solutions</i>	16
6.	<i>Conclusion</i>	21
	<i>Glossaire</i>	22

Introduction

Les plastiques sont des matériaux obtenus par l'association de polymères synthétiques ou naturels, généralement chimiquement modifiés, et de divers additifs. Le développement des matières plastiques dans des secteurs aussi diversifiés que l'emballage, la construction, l'automobile, l'électronique ou le médical, est lié à la palette considérable de propriétés d'usage qu'ils permettent d'obtenir en modulant notamment la chimie et l'organisation microscopique des polymères qui les constituent.

Pourtant, leur exploitation intensive associée à une faible performance des systèmes de gestion des déchets, incluant leur collecte et captation en fin de vie, ont engendré une accumulation massive de déchets plastiques dans l'environnement et notamment dans le milieu marin où ils représentent 50 à 80 % de l'ensemble des déchets et parfois même 100% dans les cas des débris flottants. Leur distribution, leurs comportements en mer et leurs impacts découlent directement de leur composition et propriétés d'usage.

Ce phénomène d'accumulation des déchets plastiques est majoritairement lié à la croissance exponentielle de la population mondiale dont le développement économique récent s'est traduit par une explosion de la consommation globale, et notamment un recours massif à des matériaux plastiques dont la durée d'utilisation est largement inférieure aux temps nécessaires pour leur biodégradation. Depuis leur essor dans les années 1950s, la production mondiale de plastiques continue toujours d'augmenter tandis que les premiers travaux révélant leur présence en mer remontent aux années 60 et 70s.

Le présent article fait un bilan des connaissances et décrit les principaux enjeux scientifiques, environnementaux et socio-économiques, ainsi que les possibles solutions nécessaires à la gestion d'un problème environnemental devenu global.

1 Importance du plastique en mer

1.1 Les sources

Il est évident que les plastiques et microplastiques arrivent dans l'environnement à toutes les étapes du cycle de vie des polymères. En mer, ils sont principalement issus d'apports continentaux [1] qui incluent les fleuves et rivières (Figure 1), les effluents de traitement des eaux et leurs surverses, des activités littorales de loisir, des décharges illégales littorales ou proches des fleuves, et le ruissèlement (figure 1). Chaque année, 8 à 15 millions de tonnes de plastiques issus de ces continents arrivent

à la mer [2] et on estime à 5250 milliards le nombre de particules flottant à la surface des océans [3]. Pour les seuls fleuves, entre 1.1 et 2.4 millions de tonnes de plastique débouchent dans les océans, dont environ 65 % sont issus des 20 principaux fleuves [4].

En mer, l'origine des déchets est liée au trafic maritime, notamment les pertes volontaires ou accidentelles (conteneurs, ballasts, cargaisons), à l'exploration et l'exploitation pétrolière et minière, et aux secteurs professionnels de la pêche et de l'aquaculture. Dans certaines zones, 100% des déchets sont issus de la pêche [5], incluant les pertes d'engins de capture (cordages, filets, casiers, etc.), avec des estimations pouvant aller jusqu'à plus de 600 000 tonnes par an [6], certains auteurs estimant leur part à 70% des déchets flottants [3].

Les apports d'évènements extrêmes comme les crues ou les catastrophes naturelles (inondations, tsunamis, cyclones) peuvent également augmenter considérablement les flux de plastiques vers la mer. Dans les cas du Tsunami au Japon en 2011, les quantités apportées étaient d'environ 5 millions de tonnes [7] et l'ensemble des apports issus de ces évènements pourrait être, certaines années et de manière accidentelle, au-dessus des apports par les voies les plus classiques, sinon du même ordre de grandeur.



Les microplastiques primaires (conçus pour être de petite taille) représentent une fraction significative des microplastiques, jusqu'à 10% des fragments ingérés par les oiseaux de la mer du Nord, mais la grande majorité de ceux-ci, dit secondaires, sont issus de la fragmentation et de la dégradation de débris plus gros. Les travaux les plus récents ont montré l'importance de certaines sources comme les plastiques à usage unique (emballages, pailles, capsules, bouteilles, etc.), les textiles, via des cycles de lavage dans les machines ou émission de fibres dans l'atmosphère, les pneus, issus du frottement ou sur les goudrons, ou des fragments issus des peintures de bateaux.

Pour les seuls flux de microparticules de plastiques dans les eaux issues des stations d'épuration en Europe, les concentrations peuvent atteindre jusqu'à 10 millions de particules / m³ [8].

1.2 Les quantités

Les plastiques sont présents dans tous les habitats marins, sur les plages et les côtes, à la surface des océans et sur les fonds. Ils sont présents dans les zones les plus urbanisées jusqu'aux plus éloignées de la planète. Les densités varient avec des influences marquées liées aux activités humaines mais également des mécanismes de transport et des facteurs géomorphologiques comme la conformation des fonds et

des baies. Les quantités sont également influencées par la nature des polymères, les plus lourds comme les poly-chloro-vinyles étant systématiquement sur les fonds et les plus légers pouvant persister en surface pendant de nombreuses années. En raison de la diversité des mécanismes régissant leur distribution, les évaluations des quantités présentes sont limitées et souvent restreintes aux plages et à la surface. Sur les plages, les densités peuvent atteindre plusieurs milliers d'objets par kilomètre selon les sources adjacentes et les courants provoquant leur accumulation. Environ 270 000 tonnes de plastique flottent à la surface des océans, avec une répartition très inégale [3]. Les microplastiques (taille < 5mm) représenteraient, en nombre, 90 % des plastiques flottants pour environ 10% en poids. Les densités moyennes varient de quelques centaines de particules par km² à 64 millions de particules, concentrations mesurées dans le bassin Levantin (oriental) de la Méditerranée [9]. Ce bassin Méditerranéen, ainsi que le golfe du Bengale, sont les zones les plus affectées, avec des densités régulièrement au-dessus du million de particules par km² et des valeurs moyennes au-delà de celles des zones de convergence océanique, généralement au niveau de quelques centaines de milliers de particules par km².

1.3 Nature des plastiques en mer

La composition des microplastiques accumulés dans le milieu aquatique varie en fonction de la situation géographique (proche ou loin des côtes) et de la position dans la colonne d'eau (surface de la mer, dans la colonne d'eau ou les sédiments). En milieu côtier, à la surface des mers, les microplastiques sont constitués en majorité de polyéthylène, de polypropylène et de polystyrène expansé. Mais à ces trois types de résines s'ajoutent une douzaine d'autres polymères en moindres proportions [9]. Ce sont tous des polymères moins denses que l'eau de mer qui peuvent donc rester en surface. En milieu hauturier, toujours en surface, on retrouve encore essentiellement du polyéthylène (90%) et du polypropylène (10%), polymères les plus produits dans l'industrie et probablement les plus persistants en pleine mer [10]. La colonne d'eau a été bien moins explorée que la surface de la mer. Il semblerait qu'à partir de quelques mètres de profondeur, dans la colonne d'eau, les microplastiques se distribuent différemment. Ce sont surtout des petits microplastiques et des fibres synthétiques, qui ne font que quelques centaines voire dizaines de micromètres alors qu'à la surface de la mer, les particules détectées mesurent plusieurs centaines de micromètres à quelques millimètres. Dans les sédiments, on retrouve des polymères plus denses comme les polyester ou les polyacriliques (77% en moyenne) mais de façon surprenante, on retrouve également des fragments de polymères moins denses que l'eau de mer [11] qui ont donc subi un transport vertical de la surface vers le fond via une colonisation par des microorganismes ou une intégration à des neiges marines. Sur les fonds marins enfin, l'accumulation des microplastiques est encore très peu documentée même si l'on sait que de nombreux macrodéchets y sont stockés à l'abri de la lumière et donc avec des cinétiques de dégradation extrêmement lentes.

2. Devenir du plastique en mer

2.1 Le transport

La circulation océanique générale est connue de longue date et soumise à un certain nombre de forces (force de Coriolis, circulation atmosphérique, régime météorologique, etc.). Ces forces régissent les déplacements des masses d'eau avec des courants océaniques de grande amplitude et de faible vitesse, les courants géostrophiques, qui influencent la distribution de ces petites particules flottantes qui vont ainsi être transportées sur de très longues distances.

Par exemple, en Atlantique Nord Est, les déchets du golfe de Gascogne d'Espagne et du Portugal sont repris par la circulation générale et déplacés vers le Sud-Ouest où ils sont repris par la circulation équatoriale, les transportant vers l'ouest où ils s'accumulent dans le gyre nord atlantique.

Dans les mers régionales, les mécanismes d'accumulation sont plus complexes, souvent en raison de l'interférence de plusieurs courants, y compris des eaux fluviales. Les schémas de circulation et les modèles permettent de comprendre les phénomènes locaux ou régionaux d'accumulation et d'identifier les sources. En Manche et en Mer du Nord par exemple, une grande partie des déchets plastiques sont transportés le long de la Norvège vers les eaux arctiques et une partie entre dans la mer Baltique.

Dans le bassin Nord-Ouest de la Méditerranée, la circulation est à l'inverse des aiguilles d'une montre avec un transport transfrontalier marqué entre les différents pays riverains. L'exemple de la circulation hivernale en mer tyrrhénienne (Figure 2) démontre clairement l'influence des fleuves côtiers, qui se mêlent à la circulation générale résiduelle.

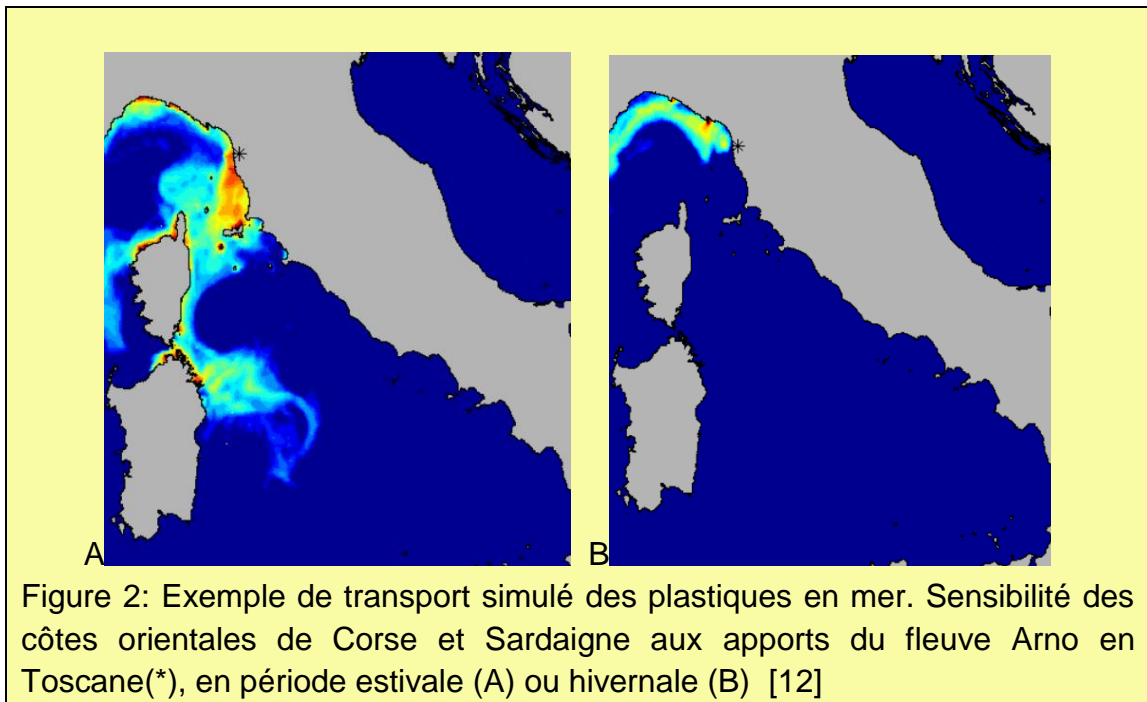


Figure 2: Exemple de transport simulé des plastiques en mer. Sensibilité des côtes orientales de Corse et Sardaigne aux apports du fleuve Arno en Toscane(*), en période estivale (A) ou hivernale (B) [12]

2.2 Des zones d'accumulation

A la côte, l'existence de zones de très fortes concentrations en plastiques est fréquente et liée à la fréquentation des sites, localement, et à des facteurs hydrodynamiques favorisant l'accumulation. Ainsi, certaines régions d'Europe, comme le pays Basque ou la Sicile sont particulièrement exposées, impliquant des mesures de gestion appropriées pour préserver la valeur patrimoniale des sites.

Liées directement aux courants océaniques, de larges zones de concentration de déchets, ont été identifiées à la surface des mers et océans, dénommées parfois à tort « îles flottantes » ou « continents de déchets » dont le plus connu a été nommé « 7ème continent ». Il s'agit en réalité de zones de plus fortes densités de plastiques, situées dans les régions centrales océaniques, où les courants sont plus faibles et convergents. En réalité, Il y a au moins une zone de convergence pour chacun des cinq bassins océaniques que sont l'Atlantique Nord et Sud, le Pacifique Nord et Sud et l'océan Indien. Les concentrations y atteignent des moyennes de plusieurs centaines de milliers de particules mais restent en deçà des concentrations extrêmes trouvées dans certaines zones côtières comme en Méditerranée [3]. En Méditerranée quelques zones d'accumulation temporaire en surface (Est Baléares, Sud-Adriatique,

Nord Tyrrhénienne, Sud est Egée par exemple) sont connues et les modèles montrent des échouages préférentiels dans la partie orientale du bassin [13]. Très localement, les zones d'accumulation sont soumises à des facteurs locaux comme le vent, la houle, les courants locaux et les activités humaines.

Sur les fonds, des zones d'accumulation ou de fortes densités ont été identifiées dans tous les océans du monde [14], à l'exception des eaux antarctiques et parfois à de très grandes profondeurs, y compris au-delà du cercle polaire Arctique [9]. Là, leur dégradation est ralentie à cause de l'absence de lumière et de faibles concentrations en oxygène et leurs effets, largement décrits pour les espèces de surface, sont totalement méconnus.

En zone côtière, les plastiques les plus lourds sont canalisés par les canyons vers les plus grandes profondeurs où ils peuvent s'accumuler en raison de plus faibles turbulences et de courants plus faibles.

3. Dégradation du plastique en mer

Les matières plastiques sont connues pour leur stabilité et leur durabilité, en particulier les plastiques dit « conventionnels » (par opposition à biodégradables), produits en très grandes quantités depuis les années 50. Lorsqu'ils se retrouvent en tant que déchets dans l'environnement, ils vont y persister pendant de très nombreuses années. Ces matériaux seront toutefois lentement transformés et dégradés, selon des processus qui dépendent des conditions environnementales, des milieux dans lesquels ils vont séjourner (sol, rivière, plage, différents compartiments océaniques). Quelle que soit la nature des processus impliqués, la dégradation va se manifester à 3 échelles différentes (Figure 3) :

- Echelle macroscopique : Altération des propriétés (essentiellement mécaniques et optiques) sans perte de l'intégrité du matériau,
- Echelle microscopique : Fragmentation en microplastiques liée à de la propagation de fissures dans le matériau,
- Echelle moléculaire : Relargage de nano-particules et de molécules de tailles et natures diverses (macromolécules, oligomères, additifs, charges, etc.) en lien avec les phénomènes agissant à l'échelle moléculaire (rupture de liaisons, diffusion, désenchevêtrement, désorption).

Pour une dégradation complète, une étape supplémentaire est nécessaire : l'assimilation des produits de dégradation générés. En présence de micro-organismes (bactéries, champignons, algues, etc.), les oligomères générés par la dégradation du matériau peuvent être suffisamment petits pour être assimilés et convertis en gaz (CO₂ et éventuellement méthane en anaérobiose), eau et biomasse. On parle alors de biodégradation du matériau. Quand ils ne sont pas assimilés, le devenir des oligomères relargués en milieu aquatique est conditionné par leur solubilité en lien avec leur nature chimique (caractère hydrophile notamment) : ils peuvent être ainsi, soit dispersés dans le milieu liquide, soit agglomérés sous forme de nanoparticules.

On considère généralement que les 3 étapes de dégradation décrites ci-dessus sont successives, mais la réalité peut être plus complexe car les processus agissant aux différentes échelles sont généralement concomitants et leurs cinétiques en milieu aquatique sont encore mal connues [15]. Dans l'environnement, l'eau, l'oxygène, les UV et les enzymes (via les microorganismes) sont les principaux agents initiant la dégradation par des réactions d'hydrolyse, d'oxydation, ou via le gonflement du matériau. Les processus à l'œuvre à l'échelle moléculaire (coupures de chaînes, modification de groupements chimiques, désenchevêtrements, formation de nouvelles liaisons,...) ont, aux échelles méso- et macroscopiques, des conséquences très diverses en fonction i) du matériau : structure chimique, nature des atomes constitutifs,

masse molaire du polymère, état physique du polymère (état vitreux vs état caoutchoutique), distribution des morphologies amorphes ou cristallines), etc.), ii) des conditions environnementales : cinétiques relatives des mécanismes dans les conditions où le matériau se trouve (température, pH, taux d'oxygène, exposition à la lumière) et niveau de contraintes subies.

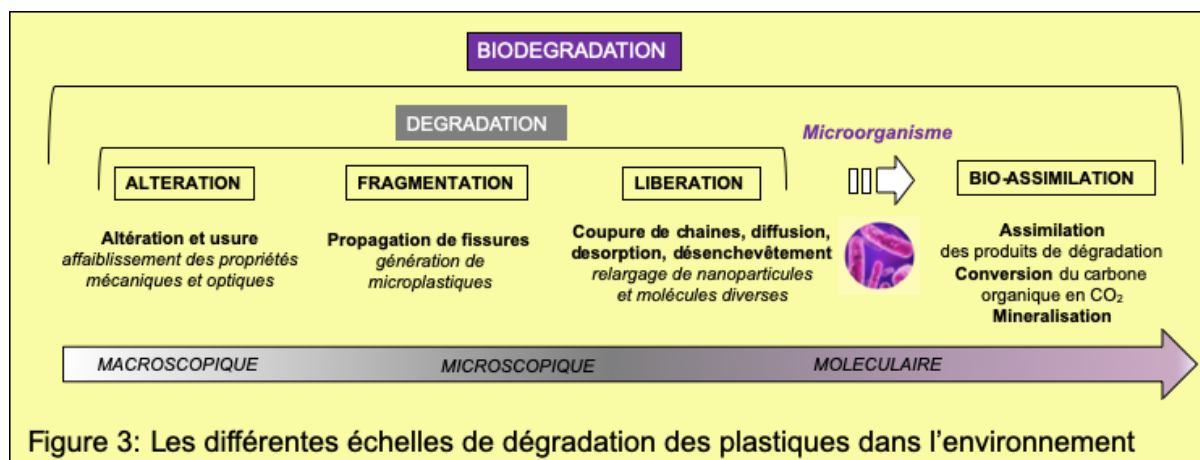


Figure 3: Les différentes échelles de dégradation des plastiques dans l'environnement

Deux exemples de scénarios de dégradation, illustrent ci-dessous la complexité et la variabilité des phénomènes mis en jeu dans deux cas représentatifs : ils concernent le polyéthylène (PE) ou le polypropylène (PP), qui sont les plastiques les plus abondants en mer, et le polybutylène-adipate-co-téréphtalate (PBAT), matériau biodégradable dans l'environnement.

Pour un plastique conventionnel tel que le PE ou le PP en pleine exposition solaire (comme c'est le cas sur la plage), on sait que la vitesse de photodégradation est au moins d'un ordre de grandeur supérieure à celle de tous les autres mécanismes [15]. La photodégradation consiste en un ensemble de réactions de photo-oxydation sous l'action combinée de l'oxygène et des photons UV conduisant à des scissions aléatoires de chaînes dans le polymère. Dans des polymères semi-cristallins comme le sont les PE et PP, ces scissions se produisent principalement dans la phase amorphe (dans laquelle la diffusion de l'oxygène est facilitée) et conduisent très rapidement (alors que seulement 1% des chaînes ont subi une scission) à des phénomènes de recristallisation suffisant pour changer significativement les propriétés mécaniques du matériau. Cela entraîne principalement une fragilisation du polymère. Pour un déchet plastique, l'évolution au cours du temps de la profondeur de la couche de matériau altérée dépend notamment des conditions d'exposition aux rayons solaires et du taux d'oxygène [16]. En fonction de l'épaisseur du déchet, la photodégradation conduit ainsi soit à la fragilisation complète du déchet, soit à la formation d'une couche fragile en surface. Des contraintes mécaniques internes (liées à la mise en forme du produit ou à son altération) ou externes (exercées notamment par l'action combinée du vent, des vagues et du sable) entraînent facilement la fragmentation d'un film mince ou la délamination couche par couche d'un matériau plus épais. Cette fragmentation est généralement considérée comme la source majeure de microplastiques secondaires retrouvés en milieu marin [15].

Si on considère maintenant le cas du PBAT (polybutylène adipate-co-téréphtalate) qui est le polymère constitutif majoritaire de la plupart des plastiques biodégradables actuellement disponibles sur le marché, plusieurs mécanismes de dégradation interviennent de façon concomitante. Exposé aux rayonnements solaires, le déchet plastique subit tout d'abord une photodégradation au même titre que les matériaux conventionnels. Ceci est d'autant plus marqué que les liaisons ester présentes dans la plupart des polymères constitutifs des plastiques biodégradables favorisent

l'absorption des radiations UV. Ces réactions de dégradation photochimique conduisent à des phénomènes de réticulation qui engendrent une perte de ductilité et fragilisent le matériau en le rendant très cassant en quelques mois ou semaines selon le niveau d'ensoleillement de la zone géographique considérée. En parallèle de la photodégradation et dans les mêmes échelles de temps, les plastiques biodégradables sont également le siège de réactions chimiques (oxydation, hydrolyse) qui peuvent être catalysées par les enzymes conduisant à la coupure des chaînes macromoléculaires. Les réactions d'hydrolyse sont favorisées par la nature relativement polaire de ces plastiques, qui les rend sensibles à l'eau (gonflement). De plus, ces plastiques sont constitués de polymères contenant des groupements et liaisons chimiques hydrolysables sous l'action de la plupart des enzymes sécrétées par les microorganismes présents dans l'environnement (bactéries, champignons, micro-algues, etc.). C'est cette propriété qui leur confère un caractère biodégradable. Une fois jeté dans l'environnement, le déchet plastique est ainsi colonisé par des microorganismes et un biofilm peut s'y développer en surface. L'action des enzymes conduit d'une part à un phénomène d'érosion progressive et hétérogène de la surface du plastique, comme par exemple illustré sur les figures 4 et 5 obtenues à partir de films de PHBV et PLA. Les zones amorphes du polymère sont généralement plus rapidement hydrolysées que les zones cristallines parce que le volume libre est plus important dans les phases amorphes, rendant ces zones plus accessibles. Toutefois, ce contraste a tendance à s'atténuer avec l'avancement du processus de dégradation et l'avancée du front d'érosion [17, 18]. En parallèle, lorsque les chaînes sont devenues suffisamment courtes sous l'effet de l'attaque enzymatique, les microorganismes situés à proximité vont pouvoir les assimiler. Cette assimilation complète le cycle de biodégradation par la production de biomasse bactérienne et la conversion du carbone organique en CO₂ dans le milieu (minéralisation). Ainsi, dans les cas les plus favorables où la cinétique de biodégradation est suffisamment rapide, les mécanismes de dégradation photochimiques, hydrolytiques et biotiques agissent de concert et on aboutit alors à la dégradation complète du déchet plastique.

Dans la plupart des cas, le scénario de dégradation est beaucoup moins bien défini. Une fois que le déchet plastique se retrouve dans le milieu marin, tous les mécanismes ralentissent de façon significative (température plus basse, microorganismes plus dilués, pénétration limitée des UV, salinité élevée, etc.) et les cinétiques relatives des différents mécanismes en jeu sont encore mal connues. De plus, en fonction de leur densité initiale, les déchets plastiques se déplacent continuellement d'un compartiment marin à l'autre où vont régner des conditions très contrastées. Pour ces différentes raisons, on ne sait, à l'heure actuelle, déterminer ni l'évolution, ni le temps de vie d'un débris plastique qui finit en mer.

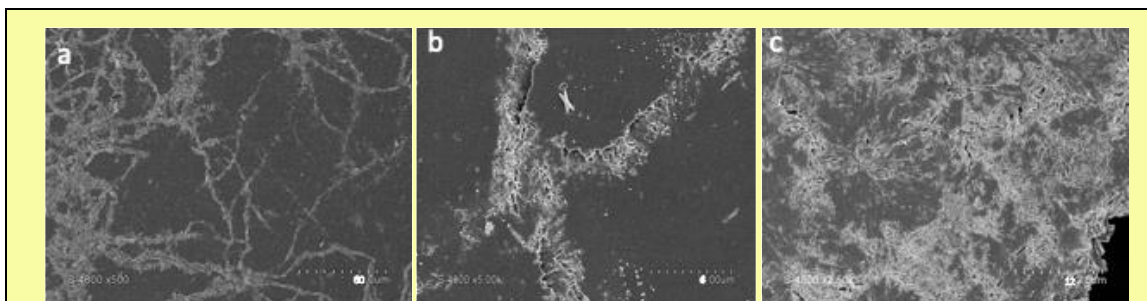


Figure 4: Observation en Microscopie à Balayage de l'érosion de surface d'un film de PHBV colonisé par des microorganismes (grossissement x 500 a ; x 5000, b; x 2500, c) [18]

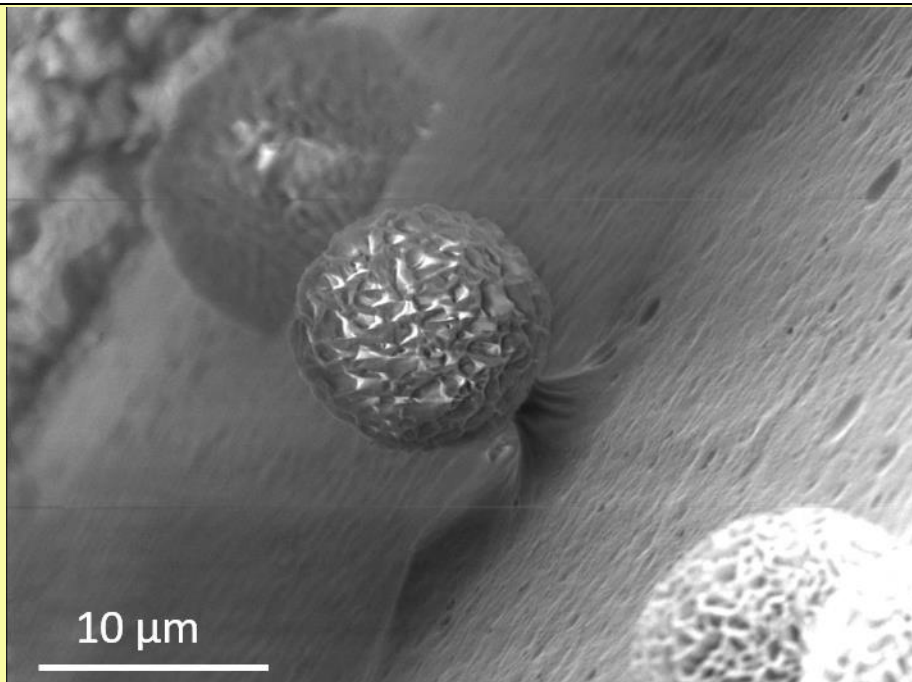


Figure 5: Observation en Microscopie électronique à balayage (MEB) de l'érosion de surface d'un film de PLA immergé dans une solution enzymatique. L'hétérogénéité de l'érosion conduit, dans ce cas, au relargage de sphérulites de taille typique la dizaine de microns [17].

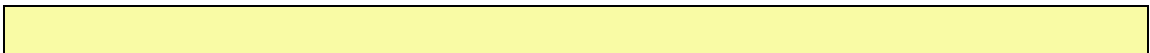
Les études en laboratoire visent à préciser ces mécanismes et leurs cinétiques, afin de donner des scénarios d'évolution crédibles. Elles ont porté sur le vieillissement (photochimique, thermique, mécanique, etc.) des matériaux polymères [19], notamment pour en évaluer la durabilité, mais elles ne suffisent pas à appréhender la complexité des phénomènes mis en jeu en environnement réel. Pour ces travaux, de nombreux outils sont nécessaires pour mesurer les altérations du matériau, que ce soit au niveau chimique (état d'oxydation par spectroscopies, masse molaire par méthodes chromatographiques, cristallinité et mobilité des chaînes (T_g) par calorimétrie,...), au niveau physique (perte de masse, état de surface par microscopies, propriétés de surface par la mesure des angles de contact, propriétés mécaniques, caractérisation des fragments générés, etc.) ou au niveau biologique (dosage de la production d'adénosine triphosphate (ATP), de la consommation d'oxygène et/ou de la production de CO_2 par techniques respirométriques). L'utilisation couplée de plusieurs de ces outils est ainsi une stratégie nécessaire et adoptée par de nombreuses équipes de recherche pour avancer sur la question du devenir des plastiques en mer. Par ailleurs, compte tenu des longues durées nécessaires pour que les matériaux plastiques se dégradent en milieu naturel, la plupart des études sont réalisées en laboratoire dans des conditions de vieillissement accélérées. Il est indispensable de corrélérer ces expériences en conditions contrôlées avec des échantillons dégradés en milieu réel afin d'évaluer si les tests modèles sont représentatifs des conditions marines.

Quelques-uns des principaux verrous et débats scientifiques actuels s'articulent autour des mécanismes prédominants de fragmentation des polymères et de l'évolution des fragments générés ainsi que de la question de la possibilité réelle de biodégradation en milieu marin. L'analyse des fragments obtenus au cours du vieillissement accéléré de PE et de PP par irradiation sous spectre solaire montre une dépendance forte à la morphologie du matériau et à son environnement et un passage assez rapide des tailles macroscopiques aux microplastiques dans le cas de films mais la cinétique de formation des fragments de tailles inférieures semble ralentie. Cependant, des nano-

plastiques ont récemment été collectés dans des échantillons naturels d'eau de mer [20]. Les analyses chimiques montrent qu'il s'agit de nano-plastiques secondaires provenant de plastiques conventionnels mais les mécanismes de formation de ces fragments sont encore mal compris. A ce jour, une seule publication [21] a pu montrer la génération de nano-plastiques issus de la fragmentation de microplastiques prélevés en mer sous irradiation UV contrôlée sans que les quantités produites n'aient pu être quantifiées.

La question de la biodégradabilité des polymères en milieu marin reste également ouverte. Comme toute surface solide immergée en mer, les plastiques sont rapidement colonisés par des bactéries qui vont progressivement former un biofilm à leur surface allant (Figure 6), jusqu'à constituer une "plastisphère", habitat pour une grande variété d'organismes aquatiques [22]. Dès les premières minutes après immersion, avant même la colonisation microbienne, les plastiques se recouvrent d'un « film conditionnant » de quelques nm à quelques dizaines de nm d'épaisseur de substances organiques et inorganiques, nommé « eco-corona ». La présence de ce film pourrait constituer une source de nutriments pour un grand nombre d'espèces bactériennes et/ou favoriser l'adhésion de populations capables de le biodégrader. Il a par ailleurs été montré, en utilisant des approches génétiques, biochimiques et de biologie moléculaire couplées aux outils de la génomique, que l'évolution des colonies bactériennes à la surface d'un plastique en mer était influencée par la nature chimique du polymère [23]. Il reste à déterminer si les bactéries sélectionnées par un matériau donné sont de fait capables de le biodégrader. D'autre part, s'il a été montré que des bactéries isolées de l'environnement (terrestre ou aquatique), du genre *Pseudomonas* [24], étaient capables de dégrader et métaboliser des plastiques synthétiques (PE, PP, PVC, PS, PET) 'in vitro', le plus souvent avec le polymère comme seule source de carbone et avec des degrés divers d'efficacité, il n'existe toujours pas actuellement de preuves directes de la biodégradation des plastiques en milieu marin.

De nombreuses études attestent de la fragmentation et/ou la dégradation d'un matériau, mais ne démontrent pas sa bio-assimilation, qui est la preuve ultime nécessaire pour confirmer la conversion du polymère en biomasse. Évaluer et démontrer la biodégradation de façon fiable et sans équivoque dans le milieu aquatique est de fait complexe et demande de lever un verrou technique spécifique, qui est de pouvoir travailler en milieu fermé sur une échelle de temps relativement longue compte tenu de la lenteur des mécanismes dans ce milieu. Les méthodes éprouvées en conditions standardisées (en sol et compost par exemple) pour attester de la biodégradabilité d'un matériau (respirométrie par dosage chimique ou par marquage du polymère par des isotopes radioactifs) ne sont pas directement applicables pour l'océan et doivent donc être associées à des outils méthodologiques complémentaires.



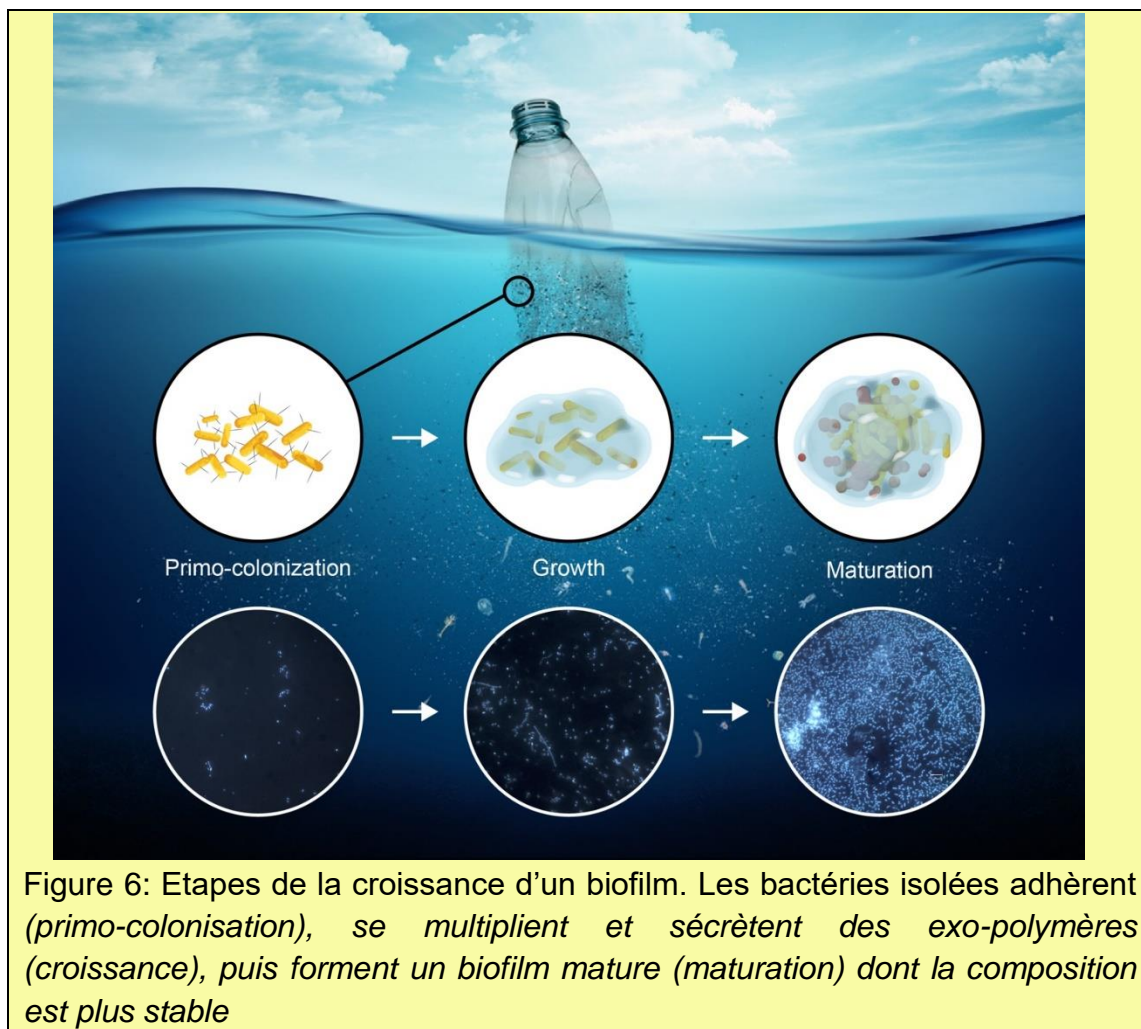


Figure 6: Etapes de la croissance d'un biofilm. Les bactéries isolées adhèrent (*primo-colonisation*), se multiplient et sécrètent des *exo-polymères* (*croissance*), puis forment un *biofilm mature* (*maturation*) dont la composition est plus stable

4. Impacts des plastiques

4.1 Les impacts socioéconomiques

Malgré les difficultés concernant l'évaluation des impacts socio-économiques (Tableau 1), la première évidence concerne les conséquences liées à la pollution des zones littorales et notamment des plages et estrans par le plastique. La valeur patrimoniale des sites y est largement affectée, et les enjeux économiques liés au tourisme peuvent être fortement touchés (fermetures récentes de plages très touristiques par exemple). Ces impacts sont souvent d'ordre esthétique et sont traduits et quantifiés par les coûts induits du nettoyage. Le long du littoral, les activités aquacoles peuvent être la cause d'apports conséquents de plastiques au milieu marin, notamment dans les zones de production conchylicoles (huitres, moules et autres coquillages) et ce en raison des pertes de matériels, involontaires ou non. Les impacts socio-économiques concernent également les interventions sous-marines sur le fond des ports ou le long du littoral ainsi que les programmes de sensibilisation et d'éducation à l'environnement.

En mer, le plastique constitue une pression économique sur la navigation notamment la plaisance en raison des accidents fréquents (rencontre d'obstacles, prises de filets ou feuilles plastiques dans les hélices de bateau ou dans les circuits de refroidissement). Ces impacts sont conséquents également pour les navires de pêche, avec, pour ces derniers, des coûts additionnels de nettoyages et de réparations des filets ou lignes [25], avec en plus des coûts indirects liés à l'altération des stocks de poissons lors des captures involontaires des filets perdus ou abandonnés. Cette question des filets fantômes, est particulièrement critique dans certaines régions

d'Europe (Sud Bretagne, Nord Adriatique, Golfe du Lion) où les pertes des stocks peuvent atteindre 2 à 3% de l'ensemble d'une population de certaines espèces [26]. Plus globalement, les impacts socio-économiques sont extrêmement divers (liste en tableau 1) et les coûts associés encore mal connus avec des coûts estimés à près de 260 millions d'euros pour les déchets marins des seules eaux européennes [26]. Pour l'ensemble des océans du globe, on estime le préjudice financier à environ 12 milliards d'euros par an.

Tableau 1: Principales conséquences socio-économiques liées au plastique en mer

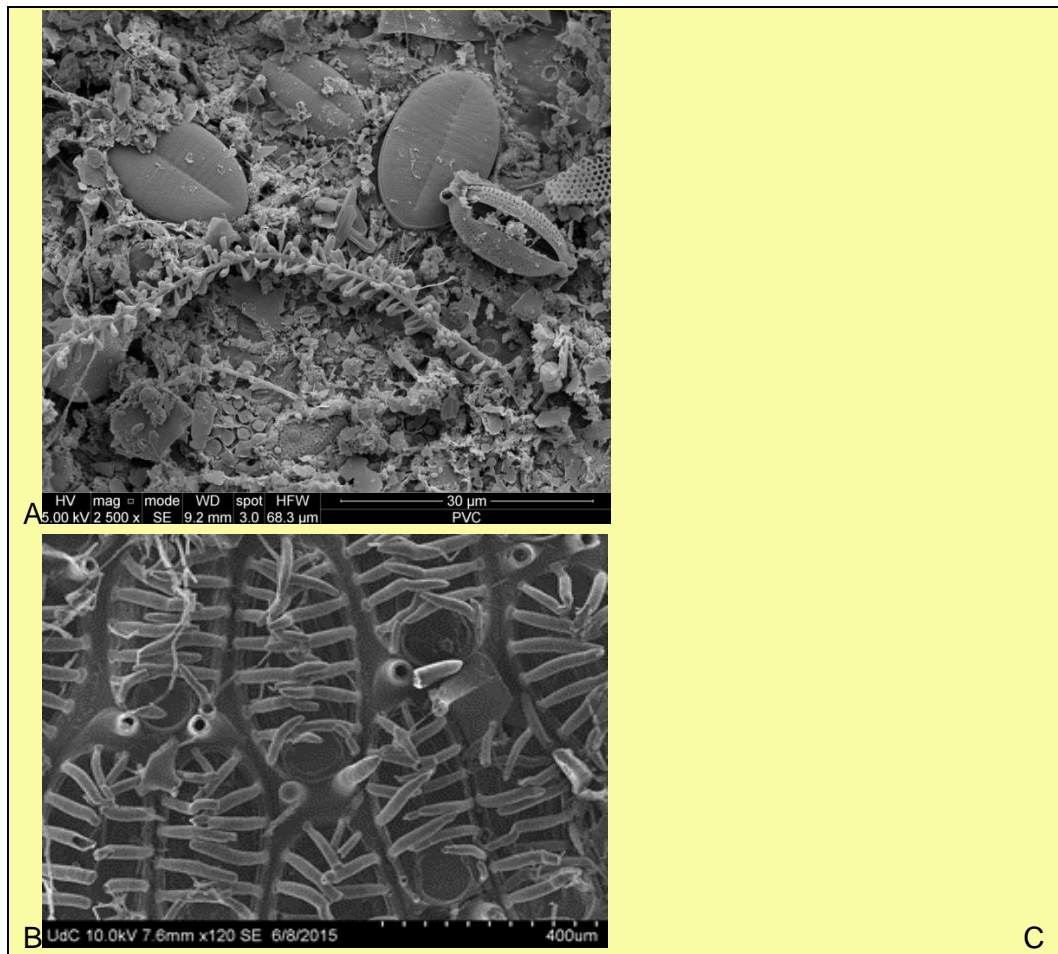
SECTEUR ECONOMIQUE	TYPES D'IMPACTS	COUTS SIGNIFICATIFS
Gestionnaires (municipalités, pouvoirs locaux)	blessures sur les plages, impact esthétique, publicité négative, labélisation	Nettoyage et traitement
Tourisme	impact esthétique, publicité négative, baisse de revenus, perte d'agrément	Baisse de revenus
Associations	Bénévolat, coûts opérationnels, gestion	Temps de bénévolat
Industrie	maintenance, élimination des déchets, dommage aux équipements	coûts minimes
Navigation	Dommage aux navires, opération des secours, réparation, dragage des ports, obligations légales	Dommages aux navires/réparation
Pêche	Dommage aux engins de pêche, réparation/remplacements, temps de pêche, nettoyage, altération des stocks	Nettoyage, réparation des engins
Aquaculture	Nettoyage des filets, maintenance	coûts minimes
services écosystémiques	biodiversité, coûts de la dégradation	Coûts mal évalués

4.2 Les impacts sur l'environnement, les écosystèmes et les organismes

Les impacts des plastiques en mer peuvent être présentés selon deux grands types : les impacts globaux à l'échelle des écosystèmes principalement liés au transport d'espèces et les impacts à l'échelle des organismes et populations.

Au niveau des écosystèmes, les plastiques constituent en mer un nouvel habitat pour de nombreuses espèces (Figure 7), notamment des macro-organismes benthiques comme des arthropodes, mollusques, hydriques, bryozoaires, et de nombreux micro-organismes, bactéries, virus, champignons, microalgues du genre dinoflagellés et diatomées [26]. Ces espèces vont coloniser rapidement les déchets plastiques en mer, en s'y fixant voire en s'y développant, et vont constituer la Plastisphère [22]. Puisque les plastiques sont des matériaux persistants et très mobiles, ils vont avoir la capacité de transporter ces espèces sur de grandes échelles d'espace et de temps, on parle

ainsi d'effet « radeau ». Par exemple suite au tsunami de 2011, près de 300 espèces ont été transportées des côtes japonaises aux côtes ouest américaines sur des débris majoritairement plastiques [27]. Ces espèces peuvent alors s'installer voire devenir invasives au détriment des espèces endémiques conduisant à un bouleversement des communautés marines et donc de l'écosystème. De plus, certaines espèces identifiées à la surface des déchets plastiques en mer sont nuisibles, toxiques ou potentiellement pathogènes comme le suggère la détection de grandes familles bactériennes dont certaines souches (*Campylobacteraceae*, *Flavobacteriaceae*, *Aeromonadaceae*) sont responsables de maladies chez l'Homme, certains poissons ou coquillages [23]. La question est alors de savoir si ces espèces disséminées à la surface des plastiques peuvent transmettre des maladies, ce qui constitue un sujet de recherche actuel de la communauté scientifique. Enfin, les temps de contact prolongés entre espèces notamment bactériennes sur ce nouveau support pourraient favoriser des échanges de matériel génétique et contribuer à la propagation de résistances multiples aux antibiotiques à travers les genres bactériens [28].



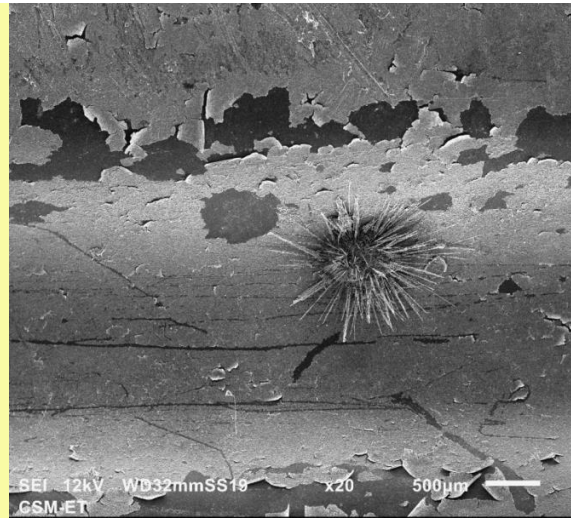


Figure 7: Diversité des espèces se fixant sur les polymères en mer : Diatomées benthiques fixées sur un morceau de PVC (A, crédit I Paul-Pont) ; colonie de Bryozoaires fixée sur un fragment de polyéthylène (Crédit F.Quilichini) et radiolaire sur une bouteille (PET) prélevée en grande profondeur (Crédit E Tambuté)

Au niveau des organismes individuels, les impacts générés par les déchets plastiques en mer, sont particulièrement visibles sur les grands animaux marins, notamment les oiseaux marins, mammifères ou tortues piégés dans des gros déchets plastiques comme les filets fantômes. Mais ce n'est que la partie visible de l'iceberg. En effet, comparés aux macroplastiques, les microplastiques sont bien plus nombreux et touchent plus largement l'ensemble de la chaîne alimentaire marine. Du fait de leur petite taille ils sont en effet facilement ingérés par un très grand nombre d'espèces. Une fois ingérés, ces microplastiques peuvent soit obstruer le système digestif, soit simplement y transiter et c'est la voix primordiale observée en laboratoire (Figure 8) [29]. Cependant, les plus petites particules comme les nanoplastiques, vont en plus, pouvoir passer à travers les membranes digestives et migrer dans le système circulatoire voire dans d'autres organes comme cela a été observé en laboratoire dans le cerveau de poisson avec pour effets, des modifications de leur comportement de nage. Dans tous les cas, même un simple transit de microplastiques dans le tube digestif induit de grandes modifications sur la biologie de l'animal qui les a ingérés : modifications de la digestion qui perturbent l'entrée d'énergie via l'alimentation [30], source directe de stress cellulaire, avec des perturbations sur les grandes fonctions physiologiques que sont la croissance, les défenses immunitaires [31], et la reproduction [30]. De plus, les additifs contenus dans les plastiques peuvent aussi être relargués dans les conditions particulières du tube digestif au cours du transit et provoquer une perturbation chimique [32], avec par exemple une perturbation endocrinienne associée.

L'ensemble du cycle de vie d'un organisme peut ainsi être touché avec des répercussions transgénérationelles. Par exemple, en exposant des huîtres à des micro- ou nanoplastiques en laboratoire, une réduction de la moitié du nombre de gamètes produits et un retard de croissance de 20% de la descendance ont été observés [30] ainsi qu'une diminution de la fécondation et du développement des embryons et des larves en lien avec l'apparition de nombreuses malformations [33]. L'alimentation des bivalves n'est pas épargnée puisque le cycle de vie de diatomées (microalgues phytoplanctoniques ayant un rôle majeur dans la production primaire marine) est apparu perturbé lors d'exposition à des nanobilles de polystyrène en laboratoire [34] montrant l'importance de comprendre les effets des plastiques à

l'échelle complexe des écosystèmes . Très peu d'études ont initié ce questionnement. Parmi elles, Green [35] a montré qu'un récif naturel façonné par l'huître plate, une espèce ingénieure de l'écosystème qui construit un habitat riche de biodiversité, était modifié une fois exposé à des microplastiques. Les modifications de la filtration des huîtres entraînaient des effets sur la diversité des communautés de microorganismes associées, de la microfaune aux cyanobactéries, induisant ainsi potentiellement des modifications des cycles biogéochimiques dans les sédiments. Ce type d'étude d'impact, chronique et réaliste, à l'échelle de communautés diverses et interconnectées nécessite d'approcher la diversité de l'écosystème mais aussi la diversité des déchets plastiques (forte variabilité de taille, forme, aspérité, type de polymères et additifs associés [1] car cela influe très fortement sur leur devenir et comportement en mer et donc sur leur toxicité. C'est une priorité de recherche qui sera un support essentiel à l'aide à la décision, mais qui nécessite de rassembler la diversité des communautés scientifiques travaillant sur les déchets plastiques en milieu aquatique en promouvant des approches pluri- et transdisciplinaires.

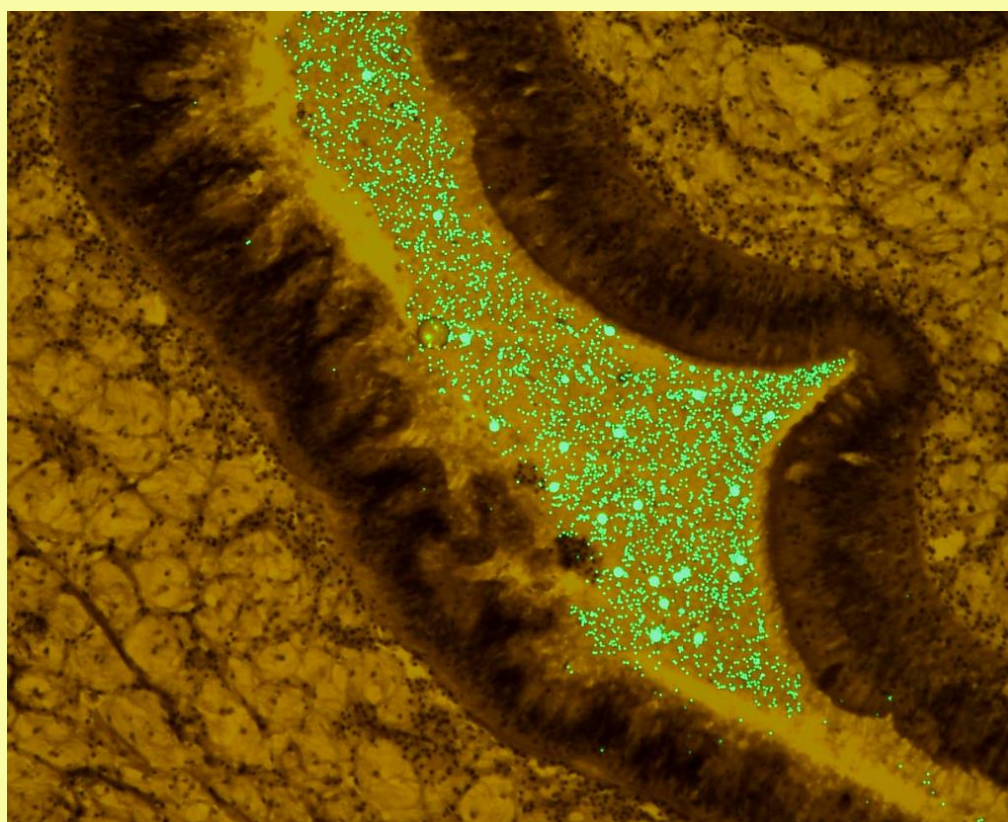


Figure 8 : Coupe cryo-histologique du tube digestif de moules (*Mytilus edulis*) pour l'étude de la durée du transit intestinal de microplastiques fluorescents (Crédit I Paul-Pont)

4.3 Les impacts sur la santé

Il est aujourd'hui avéré que les microplastiques sont présents dans tous les compartiments de notre environnement et qu'ils ont ainsi pénétré notre alimentation. Leur présence a notamment été montrée dans des produits de la mer de consommation courante comme les moules avec des quantités variables selon la localisation géographique comme par exemple en Europe avec 0,05 à 0,37 MP/g de

chair humide ou en Chine avec 0,9 à 4,6 MP/g de chair humide [36]. Des microplastiques ont été également retrouvés dans d'autres coquillages comme l'huitre et la palourde ainsi que dans des crustacés, langoustines, crevettes, crabes et araignées de mer. Ils sont présents également dans de nombreuses espèces de poissons, principalement dans leur système digestif et de manière très exceptionnelle dans le muscle. Il faut souligner la présence de quantités significatives de microplastiques dans le sel de table provenant de la mer pouvant aller dans des cas extrêmes mais rares jusqu'à 19800 MP/kg [37]. Par ailleurs, de nombreux autres aliments ont révélé la présence de microplastiques : bière, sucre, miel, eaux et pour la première fois, des plastiques ont été identifiés dans les selles humaines.

De plus, l'exposition de l'Homme aux microplastiques ne se limite pas à la voie alimentaire, il peut être aussi exposé par inhalation de microplastiques et fibres aéroportées. Cette voie d'entrée peut même être plus importante que l'alimentation mais elle est très variable en fonction de l'environnement et souvent associée à certains environnements de travail, induisant potentiellement des réactions inflammatoires respiratoires.

Concernant l'impact sur la santé des consommateurs de produits contenant des microplastiques, il y a encore assez peu de connaissances et plusieurs questions se posent actuellement :

- sur la composition des microplastiques, polymères et additifs. En effet, certains monomères présentent à eux seuls un danger comme par exemple ceux constituant le polyuréthane ou le PVC [38]. Il est important de prendre en compte également les additifs qui peuvent représenter une quantité non négligeable de la composition des plastiques parce qu'ils peuvent être libérés par lixiviation. Ils pourraient également provoquer des effets cocktail par association. On retrouve dans l'environnement principalement des phtalates, le bisphenol A, des retardateurs de flamme bromés et des nonylphénols et on sait que ces substances présentent une toxicité.
- Sur le portage de contaminants chimiques et biologiques grâce aux propriétés d'adsorption des microplastiques. En effet, au gré des déplacements et de la flottabilité des microplastiques, des polluants organiques persistants peuvent se fixer à leur surface grâce à leurs propriétés hydrophobes. On peut retrouver notamment des PCB (polychlorobiphényles) ou des HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques comme anthracène, phénanthrène, pyrène...) [39]. Des études ont montré également la présence de métaux lourds (Hg, Cd, Pb...) [40] et de pesticides à la surface des microplastiques. Cependant, même si l'accumulation de polluants organiques persistants a pu être mise en évidence chez certains organismes (moule, poisson, arénicole), les microplastiques ne sont apparemment pas les principaux vecteurs par rapport à d'autres particules en suspension dans les mers et océans mais ils ont un effet sur la bioaccumulation dans les organismes marins qui ne semble pas prépondérante dans l'alimentation humaine [41]. Il reste les contaminants biologiques, les microplastiques pouvant être colonisés par des bactéries et notamment des bactéries pathogènes pour l'Homme comme celle du genre *Vibrio* [42].
- Sur les possibilités de translocation en fonction de la taille des particules retrouvées, notamment concernant les nanoplastiques qui pourraient entrer dans tous les organes. En ce qui concerne les microplastiques, il semble qu'il n'y ait pas d'absorption possible dans aucun compartiment pour des tailles de microplastiques supérieures à environ 150 µm [40]. Au-delà de la taille, la

translocation pourrait être dépendante notamment de l'hydrophobicité et des charges de la particule [43].

- Sur les interactions des plastiques dans le système digestif.
En effet, les particules lors du transit pourraient mécaniquement par abrasion engendrer des réactions inflammatoires localisées mais aussi avoir des impacts sur le microbiote et aller jusqu'à créer une dysbiose [44]. Au niveau du système digestif, différents mécanismes peuvent intervenir grâce aux plaques de Peyer et aux possibilités de persorption de l'épithélium intestinal. D'après les connaissances actuelles, on peut souligner que les particules arrivant dans l'organisme peuvent aussi déclencher des réponses immunologiques comme relevées pour le PET ou le PE.

Plus globalement, pour connaître les impacts à long terme des microplastiques sur la santé humaine, de nombreuses recherches doivent encore être menées, en prenant en compte la diversité de compositions, de tailles, de formes, d'aspérité et en considérant les microplastiques par l'étude spécifique de congénères incluant leurs caractéristiques morphologiques importantes pour un contaminant particulaire, et non comme une famille homogène de contaminants.

5. Quelles solutions

5.1 Limiter les apports

5.1.1 Le Principe de l'économie circulaire et la règle des 3Rs

Limiter les apports de déchets plastiques dans l'environnement constitue la première solution visant à améliorer l'état de nos mers et de nos océans. La règle des 3R (Figure 9) basée sur la Réduction, la Réutilisation et le Recyclage doit être développée et suivie par tous les acteurs de la société (industriels, grands distributeurs, collectivités, citoyens, etc.). Dans cette perspective, il s'agit de réduire considérablement les pertes de plastiques, ce qui nécessite la mise en place d'efforts communs dans l'amélioration des infrastructures de collecte et de traitement dans les pays où les pertes sont importantes ; l'augmentation de l'attractivité économique et des performances des matériaux maintenus dans le système et enfin, la réduction de l'impact négatif des emballages plastiques qui échappent aux systèmes de collecte et de traitement.

La conférence de Berlin [45] et plus récemment un rapport «Pour une nouvelle économie des plastiques» [46] ont dressé des bilans complets sur les questions relatives aux apports et sur les solutions envisageables visant, en particulier, à la protection de l'environnement marin.

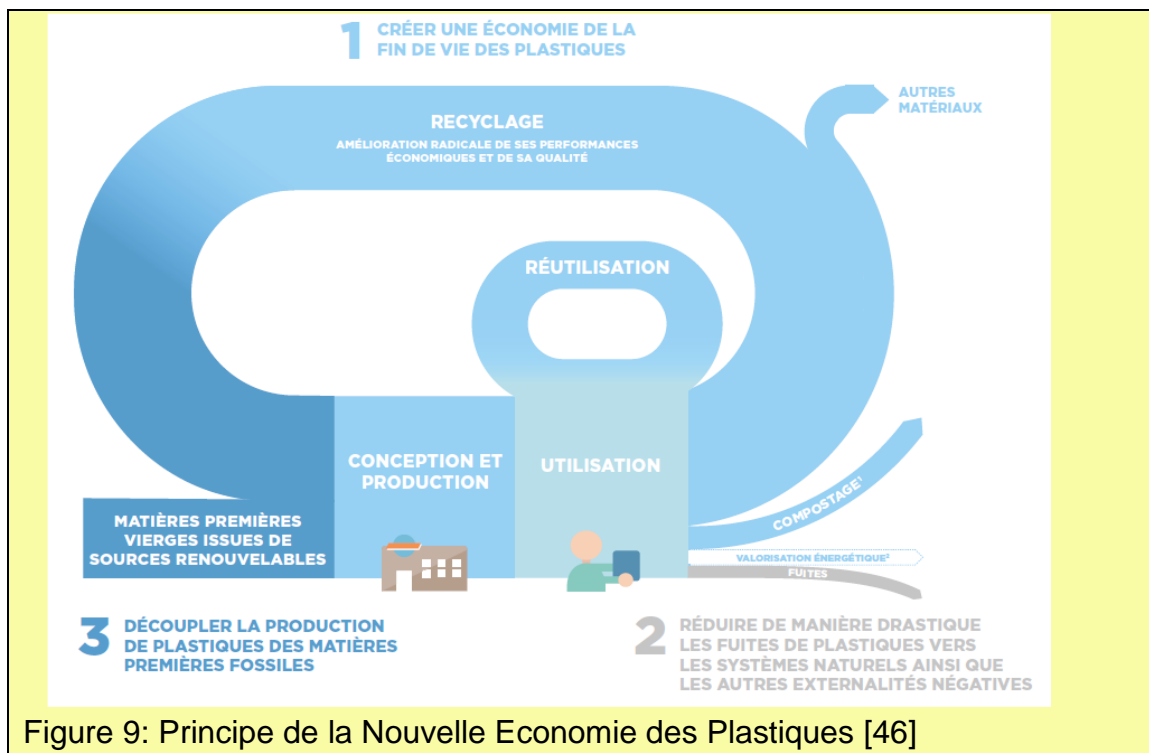


Figure 9: Principe de la Nouvelle Economie des Plastiques [46]

La Nouvelle Économie des Plastiques repose sur les principes de l'économie circulaire, c'est-à-dire sur un principe de production industrielle de restauration et de régénération des produits plastiques. Outre la réduction, cette approche favorise le recyclage et la réutilisation et tend à percevoir les produits en fin de vie comme une ressource destinée à être réinjecté dans un nouveau cycle industriel.

5.1.2 Le traitement des eaux

Les stations d'épuration sont pour les collectivités du littoral et d'une manière générale dans les zones urbaines, un équipement stratégique dans leur lutte contre les polluants marins. Elles constituent un rempart contre les pollutions physiques, chimiques et biologiques les plus importantes utilisant des technologies variées permettant l'élimination des polluants de manière plus ou moins efficace. Outre l'élimination des macrodéchets dans les systèmes d'épuration, le plus souvent par dégrillage, les systèmes d'épuration doivent prendre en compte les microparticules qui constituent depuis peu une pollution conséquente. Ces particules ont des sources très variées incluant celles issues de la dégradation des plastiques à usage unique mais également des fibres de matières textiles ou des produits cosmétiques pouvant provenir d'usages domestiques. Les stations de traitement des eaux usées ne sont pas spécifiquement conçues pour les retenir. Des études récentes [47] ont montré qu'elles pouvaient cependant jouer un rôle important dans la limitation des apports de microplastiques au milieu marin. Les concentrations variables, la nature des rejets, les différents matériaux, les formes et les tailles variables rendent cependant difficile la mise en œuvre de procédés homogènes. En raison de leur petite taille et de leur nature chimique variée, les petites particules peuvent également infiltrer et altérer les différents systèmes de traitement. Les capacités d'épuration dépendent du degré d'élaboration mais nécessitent des modules spécifiques. L'efficacité du traitement se mesure en capacité d'abattement, peuvent atteindre quasiment 100% dans les systèmes les plus élaborés mais dans la majeure partie des cas, les microplastiques ne sont pas retenus et pénètrent dans les eaux traitées. Par ailleurs, l'abattement ne signifie pas la disparition des particules mais leur piégeage, le plus souvent dans des

boues d'épuration. Dès lors, la revalorisation des boues et leur utilisation, notamment en agriculture, pose le problème d'un retour dans le milieu naturel, aucun « post-traitement » actuel ne permettant leur élimination totale. In fine, la démarche actuelle reste surtout utile à l'assainissement de l'eau, pour une réutilisation par l'homme, y compris pour la consommation courante, plutôt qu'une réelle solution en vue de prévenir la pollution du milieu naturel.

Les enjeux actuels vont de la connaissance des microplastiques sous l'angle des procédés d'extraction et de récupération dans des flux d'eau à faible concentration, à la mise en œuvre de procédés reposant sur des opérations unitaires appropriées, à l'élimination, voire la valorisation des résidus et la caractérisation fine des eaux issues de technologies efficaces de rétention des microplastiques.

5.1.3 Les nouveaux matériaux

Depuis plusieurs années, les recherches se focalisent sur le développement de polymères biosourcés durables, c'est-à-dire des polymères obtenus à partir de ressources renouvelables, tout en étant à la fois persistants et donc difficilement dégradables [48]. On peut également citer les développements menés sur le polyéthylène, les polyamides et les polyuréthanes biosourcés, voire le poly (éthylène téréphtalate) très partiellement biosourcé [49]. Ainsi, substituer le carbone d'origine fossile par du carbone biosourcé, dit renouvelable ou de « cycle court », peut être considéré comme une stratégie pertinente pour limiter les émissions de Gaz à Effet de Serre dont les répercussions sur le changement climatique sont aujourd'hui réelles. Néanmoins, l'obtention de matériaux biosourcés durables est loin d'être neutre d'un point de vue environnemental, justifiant les nombreuses réserves émises quant à la disponibilité des ressources agricoles, la concurrence d'usage des ressources ainsi que les risques de déforestation et d'épuisement des ressources en eau qu'ils pourraient engendrer. En outre, la substitution des plastiques issus de la pétrochimie par leurs homologues biosourcés ne résout pas les problèmes de pollution et d'accumulation des plastiques dans l'environnement terrestre et aquatique.

Devant l'ampleur des phénomènes cumulatifs engendrés, il apparaît indispensable aujourd'hui de parvenir à concilier ces 2 aspects, en se préoccupant aussi de la fin de vie de ces matériaux et privilégiant des scénarii de fin de vie plus vertueux [50]. De nombreuses études ont été initiées dans le monde de la recherche académique et industrielle pour faire émerger et mettre au point de nouveaux polymères dont le temps de résistance à la biodégradation serait équivalent au temps d'utilisation. Les déchets plastiques issus de ces matériaux dits « biodégradables » auraient ainsi l'avantage de pouvoir se biodégrader *in situ* (eau, sol, compost), ce qui apparaît comme une stratégie particulièrement pertinente dans le cas des déchets plastiques qui sortent des filières de captation pour devenir des déchets sauvages à l'origine de la contamination de tous les écosystèmes, et de l'environnement marin en particulier. Enfin, pour pouvoir concurrencer et remplacer les plastiques conventionnels, ces nouveaux matériaux, biodégradables et biosourcés (au moins en partie), devront répondre à certaines exigences en termes de propriétés fonctionnelles et d'usage (ductilité, stabilité thermique, propriétés mécaniques équilibrées, perméabilité réduite, cristallisation lente, aptitude à la mise en forme par extrusion et/ou injection, etc.). Parmi les polymères qui satisfont cette double exigence, on trouvera les polyesters de la famille des polyhydroxyalcanoates obtenus par fermentation microbienne mais aussi une partie des polyesters d'origine pétrochimique [51].

Toutes les études aujourd'hui tendent à développer des modèles pour aider à la conception de polymères « (bio) dégradables sur mesure » dont la (bio) dégradation pourrait être contrôlée en jouant sur les facteurs physiques et chimiques préalablement identifiés et intrinsèques au polymère. Parmi ces polymères, certains sont déjà étudiés et se sont révélés particulièrement biodégradables en milieu marin tels que les polyhydroxyalcanoates [52]. D'autres tels que le polylactide (PLA) ont en revanche démontré une biodégradabilité très modérée, voire inexistante, dans ces milieux, ce qui peut être facilement expliqué par la température de transition vitreuse du PLA trop élevée (55°C environ) et bloquant ainsi tout phénomène de diffusion d'eau à travers la matrice aux températures inférieures à 55°C. Ceci nécessite d'élargir le spectre des polymères potentiellement biodégradables en eau de mer à d'autres matériaux tels que d'autres polyesters aliphatiques, poly(propylène carbonate), celluloses et amidons plus ou moins modifiés pour lesquels les études sont encore rares. Concevoir un matériau rapidement biodégradable dans un milieu aussi complexe et contraignant que le milieu marin implique cependant de pouvoir évaluer et démontrer cette propriété de façon répétable, fiable et sans équivoque à partir d'un ensemble de méthodes et de conditions d'analyses standardisées.

Enfin, pour mieux répondre aux besoins et attentes des consommateurs en termes de propriétés d'usage et de vitesse de (bio) dégradation, ces polymères peuvent être mélangés physiquement en générant des niveaux d'interactions chimiques différents en fonction de leur degré de miscibilité et de compatibilité. Les nouveaux matériaux qui vont résulter de ces mélanges pourront couvrir une large gamme de performances selon les applications visées.

5.1 Nettoyer les océans

Nettoyer les mers ou les océans ne peut se justifier que lorsque les déchets ont de la valeur. Cette valeur peut être directe, comme des filets de pêche perdus qui pourraient être réparés ou recyclés, ou être indirecte, comme dans le cas du nettoyage du littoral ou le plastique récupéré en lui-même n'a que peu de valeur mais son absence entretient la valeur patrimoniale d'un site. C'est cette raison et l'aspect économique rattaché à certains lieux comme les plages qui justifient les dépenses importantes de nettoyage. D'autres initiatives ont été proposées comme la fabrication d'objets à partir de plastiques collectés en mer ou le nettoyage des océans par des systèmes de collecte passifs mais ces initiatives ne sont pas durables mais opportunistes. Dans le cas d'un nettoyage organisé à grande échelle notamment dans les zones de convergence océaniques, les coûts de mise en œuvre liés à la distance de ces zones, les risques de défaillance des systèmes opérés et les coûts de réparation associés, les captures accidentelles d'organismes marins ayant un comportement passif comme les plastiques flottants (plancton, jeunes tortues, petits poissons) et l'hétérogénéité et la non recyclabilité des plastiques ayant séjourné longtemps en mer, démontrent le caractère hypothétique de cette démarche pourtant supportée par le public. De la même manière, il est inconcevable d'imaginer la collecte des déchets sur les fonds marins en raison des coûts engendrés. Ainsi donc et d'une manière générale, outre des objets de valeur, le nettoyage en mer n'apportera pas de solutions nécessaires au règlement du problème. Il ne se justifie que localement, dans les zones touristiques ou urbaines, sur la base d'initiatives citoyennes ou localement pour des raisons économiques

5.3 Les apports de la recherche

La gestion de la pollution des plastiques en mer est exceptionnellement complexe et nécessite une approche intégrée englobant les aspects scientifiques, législatifs, économiques et sociaux.

De nouvelles approches techniques, utilisant des outils tels que des capteurs automatisés, des systèmes distants, ou des nouveaux indicateurs, devraient pouvoir soutenir l'acquisition de nouvelles connaissances. En termes de compréhension des effets des plastiques sur la faune et sur l'environnement, l'évaluation des risques, notamment l'évaluation de l'étendue spatiale des interactions entre les espèces animales et les plastiques apparaît très prometteuse.

Pour les scientifiques et les gestionnaires, les principales lacunes en matière de connaissances concernent également le comptage précis à l'aide de méthodes normalisées, la dégradation du plastique dans les divers compartiments de l'environnement marin et la mesure des plus petites particules et de leurs effets. Davantage d'études sont par ailleurs nécessaires pour déterminer le transfert de contaminants aux organismes, notamment celui des additifs, de même que le rôle des débris de plastique en tant que vecteur de transport des agents pathogènes, ou plus généralement d'espèces à risque. Plus globalement, le besoin d'une meilleure compréhension des liens entre les flux de déchets marins et leurs coûts en vue de mesures ciblées est très important pour proposer des moyens de lutte plus adaptés et ciblés.

Ceux-ci incluent la généralisation de modes de production et de consommation plus durables, ainsi que des conditions propices à la mise à l'échelle de produits alternatifs plus respectueux de l'environnement.

Les infrastructures et les politiques en matière de recyclage, de gestion des eaux usées et des déchets solides sont insuffisantes dans de nombreux pays. Il existe cependant un agrément général et de nombreuses initiatives de la part de toutes les parties pour mettre en œuvre une économie plus raisonnée. Tel est le sens de la directive européenne mise en place en 2019 afin de limiter les plastiques à usage unique et de promouvoir une économie circulaire. La récente déclaration des nations unies pour l'environnement [53] soutient largement ces initiatives avec des résolutions à une échelle plus globale. Avec des plans d'action régionaux plus élaborés, tels que ceux des conventions sur les mers régionales, ou les plans d'action nationaux, nous pouvons nous attendre à davantage de progrès dans les connaissances et le renforcement des capacités dans un avenir proche, devant conduire à une probable réduction de la pollution par les déchets marins.

D'autres voies plus récentes, montrent l'importance de la recherche, notamment pour résoudre les problèmes liés à la recyclabilité des matériaux. La communauté scientifique a proposé il y a peu des solutions techniques plus durables, permettant notamment une recyclabilité permanente et totale des plastiques [54], libérant une voie donnant de la valeur aux polymères en fin de vie.

Dans le champ des sciences sociales, les recherches sont encore peu nombreuses, les connaissances sur le lien entre les activités économiques et sociales et la présence de plastiques dans les océans restant pour le moment essentiellement construites par des acteurs engagés dans la lutte contre les déchets, le plus souvent localement.

Le devenir des plastiques en mer reste donc aujourd'hui un sujet de recherche émergent qui suscite de nombreuses questions pour la communauté scientifique. Ces questions peuvent actuellement se répartir en trois grands domaines que sont i) l'état

réel de la contamination, ii) les impacts à long terme de telles quantités de plastiques sur les organismes et sur le fonctionnement des écosystèmes et les risques pour les sociétés humaines et finalement iii) les solutions à privilégier pour le futur.

En France, la communauté scientifique s'est emparée de ce sujet assez récemment. Cette communauté est caractérisée par une grande pluridisciplinarité, une dispersion sur tout le territoire, et une appartenance à différents organismes de recherche. Elle s'est fédérée en 2019 dans un Groupement de Recherche nommé « Polymères et Océans », qui rassemble de nombreux chercheurs affiliés à une cinquantaine de laboratoires français. Au-delà de la recherche fondamentale qui se fait en lien avec la communauté internationale et l'industrie, cette plateforme permet de nombreux échanges scientifiques, en particulier au travers d'une rencontre nationale annuelle et dans le cadre d'action de transfert des connaissances vers les associations, le public et les politiques pour les aider à trouver les meilleures solutions.

6. Conclusion

Il est aujourd'hui avéré que de grandes quantités de plastiques entrent chaque année dans nos océans, où ils se transforment et s'accumulent pour y rester des temps non encore définis. Leur cycle est encore mal connu (Figure 10). Ceux qui restent en surface sont les plus dégradés car on les retrouve essentiellement sous forme de microplastiques. Toutefois, la masse totale de ces petits débris ne constitue qu'un faible pourcentage du plastique présent dans les océans et il est très probable que des stocks immenses recouvrent les fonds océaniques, y compris dans les zones les plus éloignées de toute vie humaine. Ces plastiques voyagent vite et loin, emmenant avec eux polluants et microorganismes divers, pathogènes pour certains, pour contaminer tous les compartiments de l'environnement aquatique.

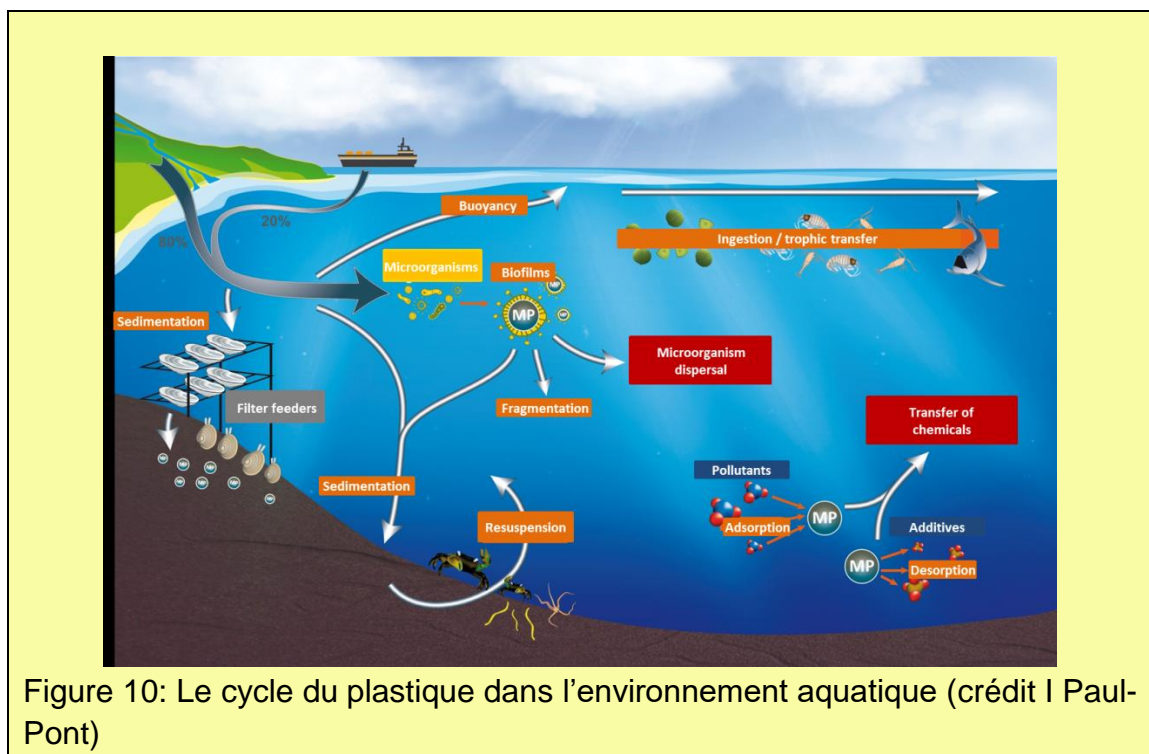


Figure 10: Le cycle du plastique dans l'environnement aquatique (crédit I Paul-Pont)

Toutes les espèces de l'environnement aquatique, quelles que soient leur taille ou leur lieu de vie, rencontrent ces plastiques et s'y enchevêtrent ou les ingèrent. Et nous commençons seulement à savoir mesurer les impacts de ces nouveaux contaminants sur les organismes et les écosystèmes et à savoir chiffrer les dommages sur notre patrimoine et les coûts associés à cette contamination pour nos sociétés.

De nombreuses questions restent néanmoins posées à ce jour. Comment et quand disparaîtront ces plastiques ? Comment évolueront leurs concentrations dans les prochaines années et les prochaines décennies ? Quels sont les impacts à long terme de notre exposition quotidienne et permanente à ces matériaux ? Mais surtout, il semblerait que tous les acteurs de la société n'aient pas encore pleinement conscience de l'urgence de la situation et des efforts à fournir pour sortir de cette ère appelée Anthropocène que nous venons d'ouvrir, ère marquée par le « tout plastique » avec ses déchets qui sont en passe de devenir notre marqueur principal et unique dans les temps géologiques. Industriels, politiques, ONGs, scientifiques doivent s'unir pour faire progresser l'état des connaissances et favoriser leur dissémination vis-à-vis du grand public pour sensibiliser l'ensemble de la société à cette problématique. De nombreuses initiatives vont dans ce sens aujourd'hui mais trop de freins sont encore présents pour espérer une amélioration notable de la situation dans les prochaines années. Toutes les études montrent que la production de plastiques continue encore et toujours d'augmenter et que nos sociétés génèrent toujours plus de déchets.

Les avancées de la recherche sur tous ces sujets liés à la pollution des océans par les plastiques seront déterminantes pour influencer les décisions des instances politiques ayant le pouvoir de légiférer mais aussi celles du monde industriel (fabricants de plastiques et grands distributeurs) pour lequel la question économique reste cruciale. Chaque acteur de la société doit s'interroger sur la manière dont il conçoit la fabrication, l'utilisation et la fin de vie des plastiques, ce qui constitue un changement de paradigme majeur au regard de ce qui a pu être développé depuis plus de 50 ans.

Remerciements

Les auteurs, membres du conseil scientifique du GDR 'Polymères et Océans', remercient le CNRS pour la création du GDR qui a donné l'opportunité, entre autres, d'écrire cet article collectif. Nous remercions également les autres organismes qui ont soutenus ce GDR : l'IFREMER et l'ANSES.

Glossaire

Déchets marins, *Marine litter*

Les déchets marins sont constitués de tout objet solide persistant, fabriqué ou transformé, éliminé ou abandonné dans le milieu marin et côtier "

Plastiques, *Plastics*

Les plastiques sont essentiellement constitués de polymères synthétiques, conçus à partir d'hydrocarbures ou de biomasse, auxquels viennent s'ajouter quelques pourcents de charges et d'additifs. Pour le milieu marin, cette définition englobe les élastomères, les fibres, les polymères semi-synthétiques (nitrate de cellulose, rayonne, etc.), les lignes mono-filaments, les revêtements et les cordages.

Les plastiques peuvent être divisés en deux catégories principales, les thermoplastiques, déformables par chauffage (polyéthylène, polypropylène, polystyrène, etc.), et les thermodurcissables qui ne sont pas déformables à chaud (polymères réticulés tels que des polyuréthanes, des résines époxy,, etc.). De

nombreux plastiques sont issus de mélange de différents polymères auxquels sont ajoutés divers additifs comme des plastifiants, des colorants, ou des stabilisants.

Microplastiques, *microplastics*

Bien que formellement définis par des tailles comprises entre 1µm et 1mm, les microplastiques sont, pour des raisons principalement pratiques, communément définis par les particules de taille comprises en 1µm et 5mm. Ils peuvent être **primaires**, c'est à dire fabriqués pour être de taille inférieure à 5mm (Granulés industriels, abrasifs des produits cosmétiques) ou **secondaires**, c'est-à-dire issus de la fragmentation des objets en plastiques de plus grande taille.

Plastiques, microplastiques et océans

Plastics, microplastics and oceans

par

Francois GALGANI, Responsable de projet, IFREMER/ LER/PAC (Bastia)
Stéphane BRUZAUD Professeur, Université de Bretagne-Sud, IRDL, UMR CNRS 6027 (Lorient)
Guillaume DUFLOS Responsable d'unité, Laboratoire de sécurité des aliments, ANSES (Boulogne sur mer)
Pascale FABRE Directrice de recherche, Laboratoire Charles Coulomb, UMR 5221 (Montpellier)
Emmanuelle GASTALDI, Maitre de conférences, Université de Montpellier/ UMR 1208 IATE (Montpellier)
Jeff GHIGLIONE Directeur de recherche, Laboratoire LOMIC, UMR7621 (Banyuls sur mer),
Régis GRIMAUD Professeur, PREM UMR5254 - UPPA/CNRS (Pau)
Matthieu GEORGE Maitre de conférences, Laboratoire Charles Coulomb, UMR 5221 (Montpellier)
Arnaud HUVET Chargé de recherche, IFREMER LEMAR UMR CNRS 6539 (Brest)
Fabienne LAGARDE Maitre de conférences, Le Mans Université, IMMM UMR 6283 (Le Mans)
Ika PAUL-PONT Chargée de recherche, LEMAR UMR 6539 CNRS/UBO/IRD/Ifremer (Brest)
Alexandra TER HALLE Chargée de recherche, IMRCP, CNRS UMR 5623 (Toulouse)

Sources bibliographiques

- [1] GESAMP - *Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment* (Kershaw, P.J., and Rochman, C.M., eds). Rep. Stud. GESAMP No. 93, 220 p (2016)
- [2] JAMBECKE (J.) *et al.* - *Plastic waste inputs from land into the ocean*. *Science*, 347,-6223, 768-771 (2015)
- [3] ERIKSEN (M.) *et al.* - *Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea*. *PLoS one*, 9(12), e111913 (2014).
- [4] LEBRETON (L.) *et al.* - *River plastic emissions to the world's oceans*. *Nature Communications* volume 8, 15611 (2017)
- [5] PHAM (C.) *et al.* - *Marine Litter Distribution and Density in European Seas, from the Shelves to Deep Basins*. *Plos One*, 9(4), e95839
- [6] MACFAYDEN (G.) *et al.* - *Abandoned, lost or otherwise discarded fishing gear*. *UNEP Regional Seas Reports and Studies* No.185; *FAO Technical Paper*, No. 523. Rome, 115p. (2009).
- [7] MINISTRY OF ENVIRONMENT , GVT OF JAPAN - *Estimated Total Amount of Debris Washed out by the Great East Japan Earthquake*, http://www.kantei.go.jp/jp/singi/kaiyou/hyouryuu/pdf/souryou_eng.pdf (2012).
- [8] SAPEA - *A Scientific Perspective on Microplastics in Nature and Society*, SAPEA publishers, 180 pages. <https://DOI.org/10.26356/microplastics>, (2019)
- [9] GESAMP - *Guidelines or the monitoring and assessment of plastic litter and microplastics in the ocean* (Kershaw P., Turra A. & Galgani F. editors), Rep. Stud. GESAMP No. 99, 130p. (2019)

- [10] TER HALLE (A.) *et al.* - Understanding the Fragmentation Pattern of Marine Plastic Debris. *Environ Sci Technol*, 50 (11), 5668-5675 (2016)
- [11] ERNI- CASSOLA (G.) *et al.*- *Distribution of plastic polymer types in the marine environment; A meta-analysis.* . *Journal of hazardous materials*, 369, 691-698 (2019).
- [12] GALGANI (F.) *et al.* - *Monitoring and Assessment guidelines for Marine Litter in Mediterranean MPAs.* AMARE project, 57 p., <https://doi.org/10.13155/59840> (2019)
- [13] LIUBARTSEVA (S.) *et al.* - *Tracking plastics in the Mediterranean: 2D Lagrangian model*, *Mar. Pollut. Bull.*,129, 151-162 (2018).
- [14] CHIBA (S.) *et al.* - *Human footprint in the abyss: 30 year records of deep-sea plastic debris.* *Marine Policy*, 96, 204-212 (2018).
- [15] ANDRADY (A.) - *The plastic in Microplastics.* , *Mar. Pollut. Bull.*, 119,1, 12-22 (2017).
- [16] AUDOIN (L.) *et al.* - *Role of oxygen diffusion in polymer ageing: kinetic and mechanical aspects.* *Journal of Materials Science* 29, 569-583 (1994).
- [17] GAILLARD (F.) *et al.* - *Experimental and theoretical study of the erosion of semi-crystalline polymers and the subsequent generation of microparticles.* *Soft Matter*. 2019 Sep 24. doi: 10.1039/c9sm01482a (2019)
- [18] SALOMEZ (M.) *et al.* - *A comparative study of degradation mechanisms of PHBV and PBSA under laboratory-scale composting conditions.* *Polymer Degradation and Stability* 167 102-113 (2019).
- [19] FAYOLLE (B.) *et al.* - *Degradation-induced embrittlement in semi-crystalline polymers having their amorphous phase in rubbery state.* *J. Mater. Sci.*, 4, 6999–7012(2008).
- [20] TER HALLE (A.) *et al.* - *To what extent are microplastics from the open ocean weathered?* *Environ. Pollut.*, 227,167-174 (2017)
- [21] GIGAULT (J.) *et al.* - *Current opinion: what is a nanoplastic?* *Environ. Pollut.* 235, 1030-1034 (2018).
- [22] ZETTLER (E.) *et al.* - *Life in the "plastisphere": microbial communities on plastic marine debris.* *Environ. Sci.Technol.* 47, 7137-7146 (2013).
- [23] DUSSUD (C.) *et al.* - *Colonization of non-biodegradable and biodegradable plastics by marine microorganisms.* *Frontiers. Microbiol.*, 9, 1571 (2018)
- [24] WILKES (A.), ARISTILDE (L.) - *Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by Pseudomonas sp.: capabilities and challenges.* *J. of Appl. Microbiol.*, 123, 582-593 (2017).
- [25] MOUAT (J.) *et al.* - *Economic Impacts of Marine Litter: Assessment and priorities for response.* Report of the OSPAR Commission, ISBN 978-1-906840-26-6, 117 p. (2010).

- [25] UNEP MAP - *Marine Litter Assessment in the Mediterranean*. UNEP MAP publication, ISBN No: 978-92-807-3564-2, 88P (2015).
- [26] REISSER (J.) et al. - *Millimeter-sized marine plastics: a new pelagic habitat for microorganisms and invertebrates*. PLoS One 9, e100289, (2014).
- [27] CARLTON (J.T.) et al. - *Tsunami-driven rafting: transoceanic species dispersal and implications for marine biogeography*. Science, 357, 1402-1406 (2017).
- [28] LAGANA (P.) et al. - *Do plastics serve as a possible vector for the spread of antibiotic resistance?* Intern. J. of Hyg. & Env. Health, 222(1), 89-100 (2019).
- [29] MAZURAS (D.) et al. - *Evaluation of the impact of polyethylene microbeads ingestion in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) larvae*. Mar. Environ. Res. 112, 78–85 (2015).
- [30] SUSSARELLU () et al. - *Oyster reproduction is affected by exposure to polystyrene microplastics*. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 113, 2430–2435 (2016).
- [31] PAUL-PONT (I.) et al. – *Microplastics modulate depuration and toxicity of fluoranthene in mussels *Mytilus* spp.* Environ. Pollut., 216, 724-737 (2016).
- [32] KOELMANS 5B.° et al. - *Microplastic as a vector for chemicals in the aquatic Environment: critical review and model-supported reinterpretation of empirical studies*. Envir. Sci. Technol. 50, 3315–3326 (2016).
- [33] TALLEC (K.) et al. - *Nanoplastics impaired oyster free living stages, gametes and embryos*. Environ Pollut., 242, 1226-1235 (2018).
- [34] GONZALEZ-FERNANDEZ (C.) et al. - *Do transparent exopolymeric particles (TEP) affect the toxicity of nanoplastics on *Chaetoceros neogracile*?* Environ. Pollut., 250, 873-882 (2019).
- [35] GREEN (D.) - *Effects of microplastics on European flat oysters, *Ostrea edulis* and their associated benthic communities*. Environ Pollut., 216, 95-103 (2016).
- [36] HERMABESSIERE (L.) et al. - *Microplastic contamination and pollutant levels in mussels and cockles collected along the Channel coasts*. Environ. Pollut., 250, 807-819 (2019).
- [37] PEIXOTO (D.) et al.- *Microplastic pollution in commercial salt for human consumption: A review*. Estuar., Coast.& Shelf Sc., 219, 161-168 (2019).
- [38] LITNER (D.) et al. - *Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition*. Sc. of the Tot. Environ., 409, 3309-3324 (2011).
- [39] GAUQUIE (J.) et al. - *A qualitative screening and quantitative measurement of organic contaminants on different types of marine plastic debris*. Chemosphere 138, 348-356 (2015).

- [40] TURNER (A.) - *Heavy metals, metalloids and other hazardous elements in marine plastic litter*. Mar Pollut Bull 111, 136-142 (2016).
- [41] BARBOZA (L.) - *Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health*. Mar Pollut Bull, 133, 336-348 (2018).
- [42] KESWANI (A.) *et al.* - *Microbial hitchhikers on marine plastic debris: Human exposure risks at bathing waters and beach environments*. Mar Environ Res 118, 10-19 (2016).
- [43] FACKELMAN (G.) *et SOMMER (S.)* - *Microplastics and the gut microbiome: How chronically exposed species may suffer from gut dysbiosis*. Mar. Pollut. Bull., 2019. 143: p. 193-203
- [44] WRIGHT (S.), KELLY (F.) - *Plastic and Human Health: A Micro Issue?* Environ Sci Technol 51, 6634-6647 (2017).
- [45] THE BERLIN CONFERENCE - <https://marine-litter-conference-berlin.info> , (2013)
- [46] MC ARTHUR FOUNDATION - *Pour une nouvelle économie des plastiques*. <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>, (2017).
- [47] SUN (J.) *et al.* - *Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal*. Wat. Res. 152, 21-37 (2019).
- [48] GANDINI (A.), LACERDA (T.) - *From monomers to polymers from renewable resources: Recent advances*, Prog. Polym. Sci., 48, 1-39 (2015).
- [49] MULHAUPT (M.R.) - *Green polymer chemistry and bio-based plastics: Dreams and reality*. Macromol. Chem. Phys., 214, 159-174 (2013)
- [50] BADIA (J.) *et al.* - *Long-term properties and end-of-life of polymers from renewable resources*, Polym. Degrad. Stab., 137, 35-57 (2017).
- [51] MUTHURAJ (R.) *et al.* - *Biodegradable compatibilized polymer blends for packaging applications: A literature review*. J. Appl. Polym. Sci., 135, 45726-45761 (2017).
- [52] DEROINE (M.) - *Natural degradation and biodegradation of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) in liquid and solid marine environments*. J. Polym. Env., 23, 493-505 (2015).
- [53] UNEA 4 - *Resolutions and decisions adopted by the Committee of the Whole of the United Nations Environment Assembly*. Ministerial Declaration, Resolutions and Decisions for UNEA 4, <http://web.unep.org/environmentassembly/ministerial-declaration-resolutions-and-decisions-unea-4> (2019)
- [54] CHRISTENSEN (P) *Closed-loop recycling of plastics enabled by dynamic covalent diketoenamine bonds*. Nature Chemistry, 11,442–448 (2019).

Sites Internet

GDR Polymères et Océans (<https://www.gdr-polymereseoceans.fr>) (site des membres du comité scientifique du GDR polymères et Océans, auteurs de l'article)

Synthèse des données cartographiques concernant les plastiques et déchets en mer. Site des nations unies pour l'environnement (<http://www.grida.no/publications/60>)