

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبو بكر بلقايد- تلمسان
Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCCEN
كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم الأرض والكون
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et Sciences de la Terre et de
l'Univers
Département Biologie
Laboratoire LAMAABE



MÉMOIRE

Présenté par

MezouarFouzi

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Microbiologie et contrôle de qualité

Thème

Biodégradation du plastique par les microorganismes dans les océans

Soutenu le 16/06/2022 devant le jury composé de :

Président	M ^{me} Tabti Nassima	MCA	Université Tlemcen
Encadrant	M ^{me} Brahimi KholkhalWahiba	MCB	Université Tlemcen
Examineur	M ^{me} Mkedder Ilham	MCA	Université Tlemcen

Année universitaire 2021/2022

Remerciements

Avant toute chose, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de M^{me} Brahimi KhokhalWahiba Conférences Classe B au département de Biologie, Université Abou bekrBelkaid-Tlemcen, je la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant ma préparation de ce mémoire.

Je tiens à remercier M^{me} Tabti Nassima Maitre de conférences Classe A au département de Biologie, université Abou bekrBelkaid -Tlemcen pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury, Qu'elle trouve ici notre sincères impressions de gratitude et de respect.

Mes remerciements vont aussi à M^{me} Mkedder IlhamMaitre de Conférences Classe B à l'Université Abou-bekrBelkaid -Tlemcen, d'avoir ménagé son temps pour juger et critiquer ce travail, qu'elle trouve ici toutes mes expressions respectueuses.

Enfin, j'adresse mes remerciements particuliers à tous les enseignants du département de biologie et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

*Après Allah, je veux dédier ce projet de fin d'études
à mes chers parents, qui m'ont toujours poussé et motivé dans
mes études. Sans leur patience, leur sacrifice*

et leur confiance en moi, je n'aurais pas atteint ce jour.

*Ce projet de fin d'études est l'aboutissement du soutien et des
encouragements qu'ils m'ont apportés tout au long de mes études.*

Qu'ils soient remerciés pour ce très humble dévouement.

Il me fait grand plaisir de dédier ce travail à ma sœur : samia

et à toutes mes tantes et mes cousines.

En signe d'appréciation, de gratitude et d'amour pour le dévouement

et le sacrifice qu'ils m'ont toujours donnés.

Mezouar fouzi

ملخص

البلاستيك هو مصطلح عام يستخدم لمجموعة واسعة من البوليمرات العضوية عالية الوزن الجزيئي التي يتم الحصول عليها بشكل رئيسي من المشتقات المختلفة للهيدروكربونات والبتترول. هناك اتجاه متزايد في إنتاج واستهلاك البلاستيك بسبب العديد من التطبيقات الصناعية والمنزلية.

توفر المحيطات موارد مهمة وقيمة مثل الغذاء والطاقة والمياه. هم أيضا عامل الاستقرار الرئيسي للمناخ. لذلك، يمكن أن يكون للتغيرات في النظام البيئي البحري الناتجة عن التأثيرات البشرية مثل التلوث البلاستيكي تأثير كبير على النطاق العالمي. تشكل البوليمرات حياة الإنسان، ولكن تم تحديدها أيضًا على أنها ملوثات في المحيطات بسبب عمرها الطويل وقابليتها المنخفضة للتحلل. في الآونة الأخيرة، درس العديد من الباحثين تأثير اللدائن الدقيقة على الحياة البحرية والتنوع البيولوجي والسمية المحتملة.

ركزت الأدبيات المتزايدة على الحياة الميكروبية التي تتطور على سطح هذه الملوثات المسماة "الكرة الأرضية"، لكن المفاهيم العامة للسمية البيئية الميكروبية نادرًا ما تم دمجها.

يمكن للمجتمعات الميكروبية المعرضة للمواقع الملوثة بالبلاستيك أن تتكيف وتشكل أغشية حيوية كثيفة على سطح البلاستيك وتنتج إنزيمات تحفيزية نشطة. قد تكون هذه الإنزيمات قادرة على تحلل البوليمرات الاصطناعية.

ومع ذلك، فقد ثبت أن معظم المواد البلاستيكية شيوغًا شديدة المقاومة حتى في ظل الظروف المعروفة بتعزيز التحلل الميكروبي. المعرفة حول التدهور البيئي أكثر ندرة.

في ظل وجود استراتيجيات مناسبة لإدارة النفايات إلى جانب مرافق التحلل البيولوجي الخاضعة للرقابة الصناعية، فإن استخدام البلاستيك القابل للتحلل الحيوي لتطبيقات معينة مثل التعبئة والتغليف أو صناعة الرعاية الصحية يعد خيارًا واعدًا وجذابًا للفوائد الاقتصادية والبيئية والصحية.

الكلمات المفتاحية: البلاستيك، التلوث، النظم البيئية، البيغ، البلاستيك الدقيق، التحلل البيولوجي، محيط

Résumé

Le plastique est un terme général utilisé pour une large gamme de polymères organiques de haut poids moléculaire obtenus principalement à partir des divers dérivés d'hydrocarbures et de pétrole. Il y a une tendance croissante à la production et à la consommation de plastiques en raison de leurs nombreuses applications industrielles et domestiques.

Les océans fournissent des ressources importantes et précieuses telles que la nourriture, l'énergie et l'eau. Ils sont aussi le principal stabilisateur du climat. Par conséquent, les changements dans l'écosystème marin causés par des influences anthropiques telles que la pollution plastique peuvent avoir un impact dramatique à l'échelle mondiale. Les polymères façonnent la vie humaine, mais ils ont également été identifiés comme des polluants dans les océans en raison de leur longue durée de vie et de leur faible dégradabilité. Récemment, divers chercheurs ont étudié l'impact des microplastiques sur la vie marine, la biodiversité et la toxicité potentielle.

Une littérature croissante s'est intéressée à la vie microbienne se développant à la surface de ces polluants appelés la « plastisphère », mais les concepts généraux d'écotoxicologie microbienne n'ont que rarement été intégrés.

Les communautés microbiennes exposées à des sites contaminés par du plastique peuvent s'adapter et former des biofilms denses sur la surface du plastique et produire des enzymes catalytiques actives. Ces enzymes peuvent dégrader les polymères synthétiques.

Cependant, la plupart des plastiques courants se sont avérés hautement récalcitrants même dans des conditions connues pour favoriser la dégradation microbienne. Les connaissances sur la dégradation de l'environnement sont encore plus rares.

En présence de stratégies de gestion des déchets appropriées couplées à des installations de biodégradation contrôlées industriellement, l'utilisation de plastiques biodégradables pour certaines applications telles que l'emballage ou l'industrie de la santé est une option prometteuse et attrayante pour les avantages économiques, environnementaux et sanitaires.

Mots clés : plastique, pollution, les écosystèmes, environnement, microplastique, biodégradation, océan

Abstract

Plastic is a general term used for a wide range of high molecular weight organic polymers obtained mainly from the various derivatives of hydrocarbons and petroleum. There is a growing trend in the production and consumption of plastics due to their many industrial and domestic applications.

The oceans provide important and valuable resources such as food, energy and water. They are also the main stabilizer of the climate. Therefore, changes in the marine ecosystem caused by anthropogenic influences such as plastic pollution can have a dramatic impact on a global scale. Polymers shape human life, but they have also been identified as pollutants in the oceans due to their long lifespan and low degradability. Recently, various researchers have studied the impact of microplastics on marine life, biodiversity, and potential toxicity.

A growing literature has focused on the microbial life developing on the surface of these pollutants called the "plastisphere", but the general concepts of microbial ecotoxicology have only rarely been integrated.

Microbial communities exposed to plastic-contaminated sites can adapt and form dense biofilms on the plastic surface and produce active catalytic enzymes. These enzymes may be able to degrade synthetic polymers.

However, most common plastics have proven to be highly recalcitrant even under conditions known to promote microbial degradation. Knowledge about environmental degradation is even rarer.

In the presence of appropriate waste management strategies coupled with industrially controlled biodegradation facilities, the use of biodegradable plastics for certain applications such as packaging or the healthcare industry is a promising and attractive option for economic benefits, environmental and health.

Keywords: plastic, pollution, ecosystems, environment, microplastic, biodegradation, ocean

Table des matières

Introduction	1
Partie bibliographique	4
Chapitre I Plastique	4
I. Définition	4
II. Classification des plastiques basée sur la biodégradabilité	5
II.1. Plastiques non biodégradables	7
II.1.1. Thermoplastiques	7
II.1.2. Plastiques thermodurcissables	8
II.2. Plastiques biodégradables	8
II.2.1. Plastiques biodégradables d'origine biologique	9
II.2.2. Plastiques biodégradables d'origine fossile	11
II.2.3. Autres polymères dégradables	12
Chapitre II Pollution des océans par le plastique	14
I. Introduction	13
II. Origine de pollution des océans par le plastique	15
III. Types de pollution par le plastique	16
III.1. Pollution par les microplastiques	16
III.2. Pollution par les nanoplastiques	17
IV. Impact environnementaux, sanitaires et esthétiques associés avec la pollution plastique ..	17
V. Les effets de la pollution par le plastique sur la population microbienne	20
Chapitre III Dégradation du plastique	22
I. Dégradation du plastique	23
I.1. Définition	23
I.2. Types de dégradation du plastique	23
I.2.1. Dégradation abiotique	23
I.2.2. Biodégradation	25
I.2.3. Dégradation enzymatique	26
II. Facteurs affectant la biodégradation du plastique	27
II.1. Caractéristiques du polymère	28
II.1.1. Masse moléculaire	28
II.1.2. Forme et taille	28

II.1.3. Biosurfactants	28
II.2. Conditions d'exposition	29
II.2.1. Humidité	29
II.2.2. PH et température	29
II.3. Caractéristiques enzymatiques	29
II.Mécanisme de biodégradation du plastique par les microorganismes.....	29
IV. Biodégradation du plastique dans les océans	32
IV.1. Caractéristiques environnementales du milieu océanique	33
IV.2. Facteurs influençant la dégradation des polyesters par l'eau océanique	34
IV.3. Biodégradation des types de plastiques en milieu océanique	37
IV.4. Voies métaboliques de biodégradation des polymères	38
IV.5. Voie métabolique de la biodégradation du polyéthylène (PE).....	39
IV.6. Evaluation de la biodégradation du plastique	39
V. Moyen d'élimination de la pollution plastique dans les océans	40
V.1. Ingénierie protéique des enzymes	40
V. 2. Plastiques biodégradables.....	40
V.3. Mélanges dégradables à l'eau de mer contenant des promoteurs de dégradation	41
VI.Potentiel de biodégradation d'une biodiversité jusqu'ici inexplorée	42
Conclusion	44
Références Bibliographiques	45

Listed figures

Figure 1: Structures des plastiques pétrochimiques conventionnels. Polyéthylène (PE), polychlorure de vinyle (PVC), polypropylène (PP), polystyrène (PS), polyéthylène téréphtalate (PET), polyuréthane (PU).....	5
Figure 2: Structures et sources de polymères biodégradables commerciaux (biosourcés et fossiles).....	13
Figure 3: Interactions potentielles entre les microorganismes marins et les microplastiques dans un environnement marin.	20
Figure 5: Les facteurs affectant le taux de biodégradation des plastiques.	28
Figure 6: Illustration schématique de la biodégradation du plastique par les micro-organismes.	31
Figure 7: Mécanismes de biodégradation du plastique dans des conditions aérobies et anaérobies.	32
Figure 8: Les facteurs affectent la dégradation des polyesters dans différents environnements.	36

Liste des tableaux

Tableau 1: Certains polymères non biodégradables et biodégradables, leurs structures chimiques, leurs applications et les micro-organismes impliqués dans des études de biodégradation spécifiques	6
Tableau 2: Effets toxiques des microplastiques et nano plastiques sur les organismes marins	18
Tableau 3: Liste des souches microbiennes dégradant le plastique de l'écosystème marin....	38

Liste des abréviations

PP : polypropylène

PS : polystyrène

PVC : chlorure de polyvinyle

PUR : polyuréthane

PET : poly (éthylène téréphtalate)

PBT : poly (butylène téréphtalate)

PE : Polyéthylène

PHA : Polyhydroxyalcanoates

PLA : acide polylactique

PES : succinate de polyéthylène

PCL : polycaprolactone

EVOH : Alcool d'éthylène vinylique

MW : un poids moléculaire élevé

MMT : millions de tonnes métriques

mPVC : Micro Chlorure de polyvinyle

OH⁻ : hydroxyde

C-H : la probabilité d'oxydation

DOM : la matière organique dissoute

POM : la matière organique particulaire

LLDPE : polyéthylène à faible densité linéaire

PVA : l'alcool polyvinylique

TCA : l'acide tricarboxylique

CO₂ : dioxyde de carbone

Introduction

Les plastiques sont des molécules polymères à longue chaîne fabriquées par l'homme **(Scott, 1999)**. Il y a plus d'un demi-siècle, les polymères synthétiques ont commencé à remplacer les matériaux naturels dans presque tous les domaines et de nos jours, les plastiques sont devenus un élément indispensable de notre vie **(Shah et al., 2008)**.

Bien que les plastiques soient utilisés dans la vie quotidienne depuis 100 ans, le début de la production à grande échelle remonte à 1950 **(Geyer et al., 2017)**.

La principale limite de plastiques conventionnels à base de pétrole est le fait qu'ils fragmenté sous des facteurs abiotiques (rayonnement UV, température, stress physique) depuis longtemps, et ils ne peuvent pas être complètement décomposé et assimilé par les micro-organismes **(Urbanek et al., 2018)**.

L'accumulation de déchets plastiques se produit principalement dans le milieu marin, où il est difficile pour trouver n'importe quelle zone qui n'est pas affectée par l'influence humaine **(Halpern et al., 2008)**.

En raison de sa flottabilité, les débris de plastique sont largement dispersés en haute mer ; cependant, le forçage physique conduit à une accumulation dans des zones convergentes résultants en des régions de fortes concentrations près des centres des tourbillons océaniques subtropicaux **(Pichel et al., 2007 ; IPRC, 2008 ; Law et al., 2010)**.

Plusieurs recherches ont été mis en place pour évaluer ce danger et estimer la quantité de plastique qui se trouvent dans les océans de tout le monde et plusieurs chercheurs essaient de trouver une solution pour assurer la dégradation rapide de ces polymères de manière biologique « biodégradation » pour éviter l'impact de ces derniers sur l'écosystème marine ou même d'autres écosystèmes.

En 2018, le Programme des Nations Unies pour l'environnement a publié le thème de la Journée mondiale de l'environnement, "Combattre la pollution plastique", appelant tous les pays du monde à travailler ensemble pour lutter contre le problème de la pollution plastique. Les mesures existantes se concentrent sur la réduction, la réutilisation et le recyclage des plastiques.

La communauté scientifique et l'industrie ont proposé et adopté des matériaux biodégradables comme stratégie pour remplacer les polymères traditionnels. Ces matériaux sont supposés pouvoir être décomposés en CO₂ et en eau ou en CH₄ au moyen d'organismes

vivants dans un laps de temps comparable aux périodes moyennes de désintégration des substances biologiques (**Albertsson et Hakkarainen, 2017**).

De nombreuses études ont rapporté la frappante capacité de certains micro-organismes, y compris les bactéries et les champignons dans la dégradation rapide des polymères biodégradables à la fois biosourcés et fossiles dans des conditions de stress (**Mohanty et al., 2000 ; Sharma et al., 2003, Gosh et al., 2013**).

Wang et al., (2020), dans leur article essayent de répondre aux questions suivantes : Les plastiques biodégradables existants peuvent-ils remplacer les plastiques de base pour résoudre le problème de pollution plastique dans l'océan ? Si non, que devrions-nous faire ensuite pour un matériel marin sûr et disponible ?

Ce travail est pour l'objectif de comprendre la biodégradation des plastiques polluant les océans après l'analyse de dix articles qui ont traité le sujet.

- **Ahmed T, Shahid M, Azeem F, Rasul I, Shah AA, Noman M, Hameed A, Manzoor N, Manzoor I, Muhammad S.** (2018) Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety *Environmental Science and Pollution Research* 25:7287–7298.
- **Wang GX, Dan Huang, Jun-Hui Ji, Carolin Völker, Frederik R. Wurm.** (2020) Seawater-Degradable Polymers—Fighting the Marine Plastic Pollution. *Adv. Sci.* 2001121.
- **Jacquin J, Cheng J, Odobel C, Conan P, Pujo-Pay M, Meistertzheim A, Jean-francois G.** (2018) Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the 'plastisphere': *Front. Microbiol.* 10 :865.
- **Ganesh Kumar A, Anjana K, Hinduja M, Sujitha K, Dharani G.** (2020) Review on plastic wastes in marine environment – Biodegradation and biotechnological solutions : *Marine Pollution Bulletin* 150 :110733.
- **Krueger MC, Harms H, Schlosser D.** (2015) Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics *Appl Microbiol Biotechnol* 99:8857–8874.
- **Urbanek AK, Rymowicz W, Mironczuk AM.** (2018) Degradation of plastics and plastic degrading bacteria in cold marine habitats *Applied*

Microbiology and Biotechnology 102 (18): 7669–7678.

- **Min K, Cuiffi JD, Mathers RT.** (2020) Ranking environmental degradation trends of plastic marine debris based on physical properties and molecular structure Nat. Commun.11, 727.
- **Shah AA, Hasan F, HameedA, Ahmed S.** (2008) Biological degradation of plastics: A comprehensive review Biotechnology Advances 26 246–265.
- **Morét-Ferguson S, Law KL, Proskurowski G, Murphy EK, Peacock EE, Reddy CM.** (2010).The size, mass, and composition of plastic debris in the western North Atlantic Ocean: Mar. Pollut. Bull.60, 1873–1878.
- **Viera JS.C, Marques MR.C, Nazareth MC, Jimenez PC, Sanz-L´azaroc C, Castro I.IB.** (2021)Are biodegradable plastics an environmental rip off ? Journal of Hazardous Materials 416125957.

Ce manuscrit sera divisé en trois chapitres en plus du résumé et l'introduction, dont le premier présente une synthèse résumant la définition du plastique et leurs différents types ; le deuxième sera consacré à la pollution de plastique, leur type, et leur effet et enfin le troisième donne l'essentiel sur la dégradation du plastique et leurs types.

On termine notre travail par une conclusion et les références bibliographiques.

Partie bibliographique
Chapitre I
Plastique

I. Définition

Les plastiques sont des produits polymères constitués d'une large gamme de composés organiques et inorganiques synthétiques ou semi-synthétiques (**Saminathan et al., 2014**). Ils sont fabriqués essentiellement à partir de matériaux pétrochimiques extraits du charbon, du pétrole et du gaz naturel (**Muhamad et al., 2015 ; Yoshida et al., 2016**).

Il y a plus d'un demi-siècle, les polymères synthétiques ont commencé à remplacer les matériaux naturels dans presque tous les domaines et de nos jours, les plastiques sont devenus un élément indispensable de notre vie. Avec le temps, la stabilité et la durabilité des plastiques ont été continuellement améliorées, et par conséquent ce groupe de matériaux est maintenant considéré comme synonyme de matériaux résistants à de nombreuses influences environnementales. Le mot plastique vient du mot grec "plastikos", qui signifie "capable d'être moulé en différentes formes" (**Joel, 1995**).

Les plastiques que nous utilisons aujourd'hui sont fabriqués à partir de matières premières inorganiques et organiques, telles que le carbone, le silicium, l'hydrogène, l'azote, l'oxygène et le chlorure. Les matériaux de base utilisés pour la fabrication des plastiques sont extraits du pétrole, du charbon et du gaz naturel (**Seymour, 1989**).

Les plastiques sont résistants aux attaques microbiennes, car pendant leur courte période de présence dans la nature, l'évolution n'a pas pu concevoir de nouvelles structures enzymatiques capables de dégrader les polymères synthétiques (**Mueller, 2006**).

De nos jours, une grande variété de polymères synthétiques à base de pétrole sont produits dans le monde à hauteur d'environ 140 millions de tonnes par an et des quantités remarquables de ces polymères sont introduites dans l'écosystème en tant que déchets industriels (**Shimao, 2001**).

Les plastiques synthétiques sont largement utilisés dans l'emballage de produits tels que les aliments, les produits pharmaceutiques, les cosmétiques, les détergents et les produits chimiques. Environ 30 % des plastiques sont utilisés dans le monde pour des applications d'emballage. Cette utilisation continue d'augmenter à un taux élevé de 12 % par an (**Sabir, 2004**).

Ils ont remplacé le papier et d'autres produits à base de cellulose pour les emballages en raison de leurs meilleures propriétés physiques et chimiques, telles que leur résistance, leur légèreté, leur résistance à l'eau et à la plupart des micro-organismes présents dans l'eau. (Rivard et al., 1995).

Les plastiques les plus utilisés dans les emballages sont le polyéthylène (LDPE, MDPE, HDPE et LLDPE), polypropylène (PP), polystyrène (PS), chlorure de polyvinyle (PVC), polyuréthane (PUR), poly (éthylène téréphtalate) (PET), poly (butylène téréphtalate) (PBT), nylons (Figure 1 et Tableau I). Les applications répandues des plastiques ne sont pas seulement dues à leurs propriétés mécaniques et thermiques favorables, mais aussi principalement en raison de la stabilité et de la durabilité (Rivard et al., 1995).

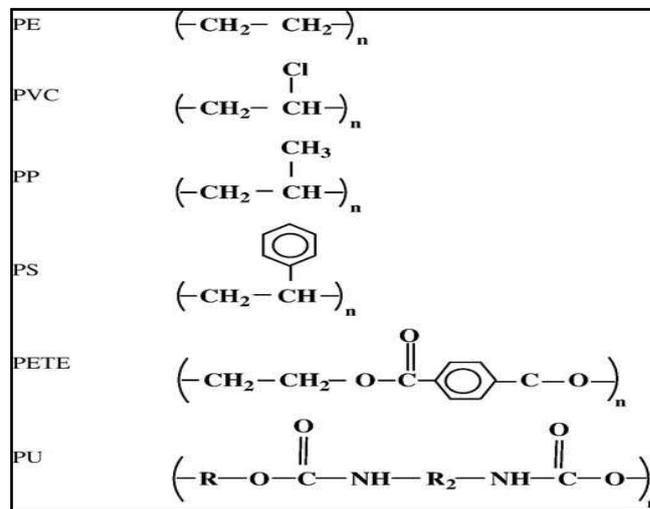


Figure 1. Structures des plastiques pétrochimiques conventionnels (adapté de Pavia et al., 1988). Polyéthylène (PE), polychlorure de vinyle (PVC), polypropylène (PP), polystyrène (PS), polyéthylène téréphtalate (PET), polyuréthane (PU).

II. Classification des plastiques basée sur la biodégradabilité

Il existe deux groupes de plastiques sur la base de la biodégradabilité, à savoir les plastiques non biodégradables et les plastiques biodégradables. Les structures chimiques de certains polymères plastiques (biodégradables et non biodégradables) et les mécanismes de leur dégradation dans des études spécifiques sont présentés dans le tableau 1 (Temoor et al., 2018).

Tableau 1: Certains polymères non biodégradables et biodégradables, leurs structures chimiques, leurs applications et les micro-organismes impliqués dans des études de biodégradation spécifiques (**Temoor et al., 2018**).

Plastiques	Microorganisme	Application	Référence
Polymères biosourcés			
Polyhydroxyalcanoates	<i>Pseudomonas stutzeri</i>	Emballage Matériaux, Les couches jetables, Vaisselle alimentaire, Médical unique Appareils, Peintures	(Muhamad et al., 2015) (Flieger et al., 2003)
L'acide polylactique	<i>Bacillus brevis</i> , <i>Amycolatopsis sp.</i> , <i>Penicillium roquefortii</i>	Papier d'emballage, Enduits, Les engrais, Films, Sac à compost	(Kasirajan et Ngouajio, 2012)
Polymères fossiles			
Polyéthylène téréphtalate	<i>Ideonellasakaiensis</i>	Les tapis, Chemises, Sacs, Bouteilles en plastique, Colis alimentaires, Récipient,	(Yoshida, Hiraga et al., 2016)
Polyester	<i>Streptomyces sp.</i> <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Fibres, Textiles	(Shah et al., 2008).
Alcool polyvinylique	<i>Pseudomonas O-3</i>	Adhésifs, Revêtements, Céramique, Reprographie, La photographie, Médicament,	(Shimao, 2001).
Polyéthylène	<i>Brevibacillus borstelensis</i> <i>Rhodococcus Rubber</i>	Sacs, Bouteilles d'eau, Emballages alimentaires, Film, Jouets, Tuyaux, L'huile de moteur Bouteilles	(Hadad et al., 2005 ; Sivan et al., 2011).
Nylon	<i>Flavobacterium sp</i> <i>Pseudomonas sp.</i>	Petits roulements, Essuie- glaces, Tuyau d'eau, Football casques	(Tokiwa et al., 2009).
Succinate de polyéthylène	<i>Pseudomonas sp</i>	Industrie des matières plastiques, Sacs à provisions, Films agricoles	(Tribedi et Sil, 2014)
Polycaprolactone	<i>Clostridium botulinum</i> , <i>C. acetobutylicum</i> , <i>Fusarium solani</i>	Films agricoles, Fibres Conteneurs de semis	(Abou-Zeid et al., 2001).
Mélanges de polymères			
Amidon/polyester	<i>Streptomyces Phanerochaete chrysosporium</i>	Présent dans les fibres, Technique Thermoplastiques	(Shah et al., 2008)
Amidon/polyéthylène	<i>Aspergillus niger</i> , <i>Penicillium funiculosm</i> , <i>Phanerochaete chrysosporium</i>	Très sensible aux conditions environnementales	(Shah et al., 2008)
Mélanges amidon/PVA	<i>Alcaligenes feacalis</i>	Agricole applications, Matériaux d'emballage	(Tokiwa, Calabia et al., 2009)

II.1. Plastiques non biodégradables

La plupart des polymères de base utilisés de nos jours sont soit non biodégradables, soit leur taux de dégradation est trop lent pour être complètement désintégrés (**Krueger et al., 2015**).

Les plastiques non biodégradables comprennent à la fois les polymères fossiles et biosourcés. Ceux traditionnellement utilisés sont des polymères synthétiques d'origine fossile, qui sont obtenus à partir de dérivés d'hydrocarbures et de pétrole (pétrochimie). Leur poids moléculaire est élevé en raison de la répétition extensive de petites unités monomères (**Ghosh et al., 2013**).

Ces plastiques sont très stables et n'entrent pas facilement dans les cycles de dégradation de la biosphère (**Vijaya et Reddy, 2008**).

Ils comprennent de nombreux plastiques couramment utilisés comme le PVC, le PP, le PS, le PET, le PUR et le PE. En raison d'une mauvaise gestion des déchets et des détritiques, ils se sont accumulés dans l'environnement en quantités énormes et sont devenus une menace pour la terre (**Krueger et al., 2015**).

Par conséquent, il est nécessaire de promouvoir des systèmes de gestion des déchets de ces polymères non biodégradables (**Shah et al., 2008**). De plus, les propriétés d'inertie et de résistance aux attaques microbiennes de certains de ces polymères sont délibérément amoindries par l'incorporation d'amidon et de pro oxydants pour faciliter la fragmentation (**Vijaya et Reddy, 2008**). Néanmoins, les plastiques oxo-biodégradables sont considérés comme non biodégradables en raison du manque de preuves concluantes de dégradation (**Reddy, 2008**).

II.1.1. Thermoplastiques

Polyéthylène

Les polyéthylènes synthétiques sont des matériaux inertes dont le squelette n'est constitué que de longues chaînes carbonées. La structure caractéristique rend les polyoléfinés insensibles à la dégradation par les microorganismes (**Yamada-Onodera et al., 2001**). Le polyéthylène est l'un des polymères synthétiques de haut niveau hydrophobe et haut poids moléculaire. Sous forme naturelle, il n'est pas biodégradable (**Kwpp et Jewell, 1992**).

Les plastiques dérivés des polyoléfines, comme le PE, sont actuellement utilisés pour la fabrication de films plastiques pour divers articles en plastique tels que les films utilisés pour l'emballage, les sacs de transport et de magasinage et les tasses. En raison de leur longévité et leur stabilité dans l'environnement, les polyoléfines suscitent des inquiétudes en raison du manque de gestion des déchets (**Shah et al., 2008**).

Chlorure de polyvinyle

Le chlorure de polyvinyle (PVC) est un plastique solide qui résiste à l'abrasion et les produits chimiques. Il a une faible absorption d'humidité. Il est principalement utilisé dans les bâtiments pour les tuyaux et les raccords, l'électricité et l'isolation des câbles, revêtements de sol et produits en cuir synthétique. C'est également utilisé pour fabriquer des semelles de chaussures, des tuyaux rigides, des textiles et des tuyaux de jardin (**Braun et Bazdada, 1986 ; Owen, 1984**).

Polystyrène

Le polystyrène (PS) est un plastique synthétique utilisé dans la production de gobelets jetables, matériaux d'emballage, matériel de laboratoire, certaines utilisations électroniques. Le PS est utilisé pour sa légèreté, sa rigidité et une excellente isolation thermique. Lorsqu'il est dégradé par action thermique ou chimique signifie qu'il libère des produits comme ; styrène, benzène, toluène et acroléine (**Tsuchii et al., 1977**).

II.1.2. Plastiques thermodurcissables

➤ Polyuréthane

Le polyuréthane (PUR) est couramment utilisé comme constituant matériaux dans de nombreux produits, y compris les meubles, les revêtements, les matériaux de construction, fibres et peintures. Structuellement, le PUR est le produit de condensation de polyisocyanate et de polyol ayant des propriétés intramoléculaires des liaisons d'uréthane (liaison carbonate ester, $-NHCOO-$) (**Sauders et Frisch, 1964**).

II.2. Plastiques biodégradables

Les polymères biosourcés et fossiles (**Figure 2**) peuvent être inclus dans les plastiques biodégradables en fonction du degré de biodégradabilité et d'assimilation microbienne. La biodégradation des plastiques implique une hydrolyse enzymatique et non enzymatique (**Wackett et Hershberger, 2001**).

Le type d'organisme, la nature du prétraitement et les caractéristiques du polymère sont quelques-uns des facteurs affectant l'efficacité des processus de biodégradation. De plus, la mobilité, la cristallinité, le type de groupes fonctionnels, la tactilité, les composants chimiques, le poids moléculaire et les additifs présents dans les polymères sont quelques-unes des caractéristiques importantes pour la dégradation des plastiques (**Artham et Doble, 2008**).

Au cours de la dégradation, les micro-organismes sécrètent des exoenzymes qui désintègrent les complexes polymères en molécules plus petites comme les dimères et les monomères. Ainsi, les petites molécules sont beaucoup plus petites à passer à travers les membranes semi-perméables d'une cellule bactérienne pour être utilisé comme son énergie ainsi que comme source de carbone (**Gu, 2003 ; Jayasekara et al., 2005**). Les réactions de biodégradation impliquent à la fois des mécanismes aérobie et anaérobie (**Shah et al., 2008**).

II.2.1. Plastiques biodégradables d'origine biologique

Ils sont dérivés de ressources renouvelables. Du point de vue environnemental, ils sont avantageux dans certaines applications industrielles en raison de leur capacité à être complètement dégradés biologiquement (**Kale et al., 2007**).

Les plastiques biodégradables biosourcés tels que la cellulose, l'amidon et les polymères à base d'amidon sont consommés directement par les microorganismes, car leur poids moléculaire est réduit de manière extracellulaire par l'action des enzymes. L'amidon est le polymère biosourcé couramment utilisé pour la production de plastiques biodégradables dont, son utilisation intensive est due à son abondance, sa disponibilité immédiate, son faible coût et sa biodégradabilité dans certaines conditions environnementales (**Chattopadhyay et al., 2011 ; Kyrikou et Briassoulis, 2007 ; Nanda et al., 2010**).

Par ailleurs, il est composé de polymères d'amylopectine et d'amylase, ce qui en fait un substitut viable. Les polymères à base d'amidon sont classés en deux types : (a) polymère chargé d'amidon et (b) polymère à base d'amidon (**Jayasekara et al., 2005**). Les micro-organismes (bactéries, champignons et algues) et différents facteurs environnementaux sont capables de décomposer complètement ces polymères (**Kasirajan et Ngouajio, 2012**).

Divers micro-organismes (*Variovorax paradoxus*, *Comamonas sp.*, *Aspergillus fumigatus*, *Acidovorax faecilis*, et *P.lemoignei*) isolés du sol, dégradent les biopolymères dans des conditions anaérobies et aérobie (**Shah et al., 2008**).

❖ Polyhydroxyalcanoates

C'est un polyester biosourcé biodégradable et produit dans la nature par fermentation bactérienne de sucres et de lipides (**Shimao, 2001**). Les polymères PHA peuvent être utilisés dans les industries de l'emballage, médicales et pharmaceutiques en raison de leur biodégradabilité (**Philipet *al.*, 2007**). Les autres articles fabriqués en PHA couramment utilisés sont les matériaux de restauration rapide, les outils médicaux jetables, les matériaux d'emballage et certaines peintures (**Flieger *et al.*, 2003**).

La biodégradation microbienne du PHA varie selon les différentes conditions de sol et d'environnement. Sous des sources d'énergie et de carbone limitées, les micro-organismes peuvent dégrader le PHA et l'utiliser comme source de carbone et d'énergie (**Chen et Patel, 2011**). Certains genres bactériens comprennent : *Bacillus*, *Burkholderia*, *Nocardiopsis*, et *Cupriavidus* (**Boyandin *et al.*, 2013**). De même, des genres fongiques comme : *Mycobacterium* et *Micromycete* sont également connus pour assimiler les PHA en utilisant à la fois des mécanismes aérobies et anaérobies (**Boyandin *et al.*, 2013**).

❖ Acide polylactique

L'acide polylactique est fabriqué à un niveau commercial par Nature Works aux États-Unis (150 000 tonnes par an). Il est dérivé de ressources renouvelables comme l'amidon de maïs, les racines de tapioca ou la canne à sucre. Il a été largement utilisé en médecine en raison de la capacité du polymère à être incorporé dans les corps humains et animaux (**Ikada et Tsuji, 2000**). Le PLA est le plus important parmi les plastiques biodégradables biosourcés en raison de sa disponibilité, de sa biodégradabilité et de ses bonnes propriétés mécaniques (**Liu *et al.*, 2000**). Il a été rapporté que les produits de la dégradation hydrolytique du PLA peuvent être complètement digérés par les micro-organismes (**Fukushima *et al.*, 2009**). Récemment, *Amycolatopsis sp.* et *B. licheniformis*, isolés du sol, dégradent le PLA (**Anderson et Shive, 2012 ; Fukushima *et al.*, 2009**). Une lipase purifiée à partir d'un champignon, *Cryptococcus sp.* Souche S-2, a montré une homologie à distance avec les protéines de la famille des cutinases et elle a montré une biodégradation efficace du PLA (**Masaki *et al.*, 2005**).

II.2.2. Plastiques biodégradables d'origine fossile

Les plastiques biodégradables d'origine fossile ont été utilisés pour plusieurs perspectives, notamment dans l'industrie de l'emballage. Cependant, la majorité ne sont pas biodégradables et posent un sérieux problème pour leurs déchets contrôle (**Hoshino et al., 2003 ; Vert et al., 2002**).

Leurs rebuts dans l'humus constituent une difficulté primordiale dans le contrôle de la contamination (**Goldstein, 2005**). Ces plastiques sont largement utilisés dans l'emballage de produits pharmaceutiques, de différents produits alimentaires, d'articles de maquillage et de différents produits chimiques. Leur dégradation est un processus extrêmement lent. Différents agents environnementaux, y compris les microbes et leurs enzymes, sont impliqués dans le processus (**Chen et Patel, 2011 ; Shah et al., 2008 ; Chen, 2010 ; Mir et al., 2017**).

✓ Succinate de polyéthylène

Le succinate de polyéthylène (PES) est l'un des polyesters thermoplastiques. Il est fabriqué soit par copolymérisation d'oxyde d'éthylène et d'anhydride succinique, soit par polycondensation d'éthylène glycol et d'acide succinique (**Hoang et al., 2007**).

L'industrie du plastique utilise le PES pour la production de films pour l'agriculture, comme agent de revêtement du papier et pour les sacs à provisions. Ce polymère serait dégradé de manière efficace par une souche bactérienne mésophile nommée *Pseudomonas sp.* AKS2 (**Tribedi et Sil, 2014**). Il existe une distribution limitée de microbes qui dégradent le PES contrairement à la diversité des microbes dégradant le PCL. Une autre souche thermophile dégradant le PES *Bacillus sp.* TT96 a été isolé du sol (**Tokiwa et al., 2009**).

De plus, plusieurs microbes mésophiles, isolés avec une capacité intrinsèque à dégrader le PES, appartiennent phylogénétiquement à *Bacillus* et *Paenibacillus* (**Tezuka et al., 2004 ; Tokiwa et al., 2009**).

✓ Polycaprolactone

La polycaprolactone peut facilement être dégradé par des micro-organismes aérobies et anaérobies. Ce polyester partiellement cristallin est mélangé à d'autres copolymères et utilisé pour fabriquer des matériaux d'emballage ainsi que son utilisation dans les produits biomédicaux, les cathéters et les poches de sang (**Wu, 2005**). Malgré son prix élevé, il a attiré

l'attention en raison de sa flexibilité et sa biodégradabilité (Wu, 2005). La PCL peut être dégradée par les lipases et les estérases microbiennes (Karakus, 2016).

Les bactéries connues pour la dégradation de la PCL sont largement présentes dans l'atmosphère (Shimao, 2001). Une souche fongique *Aspergillus sp.* a été rapporté qu'elle dégrade efficacement la PCL en une large gamme de produits tels que les acides butyrique, succinique, caproïque et valérique (Sanchez et al., 2000).

II.2.3. Autres polymères dégradables

- **Alcool d'éthylène vinylique (EVOH)**

L'EVOH est un autre plastique synthétique soluble dans l'eau. Il est utilisé comme une couche barrière à l'oxygène dans les emballages en film multicouche. Le coût élevé de l'EVOH est un obstacle important à son utilisation généralisée dans d'autres applications de plastiques biodégradables (Shah et al., 2008).

- **Plastiques photo-biodégradables**

Les plastiques photodégradables sont des polymères synthétiques thermoplastiques dans lesquels ont été incorporés des additifs chimiques ou copolymères destinés à affaiblir les liaisons du polymère en présence des radiations UV. Ils sont conçus pour devenir faible et cassant lorsqu'ils sont exposés au soleil pendant une période prolongée. Les photosensibilisateurs utilisés comprennent les dicétones, les dérivés de Ferrocène et les carbonyles. L'efficacité dépend de l'intensité de l'exposition et varient en fonction de facteurs tels que la saison, la géographie et la saleté (Shah et al., 2008).

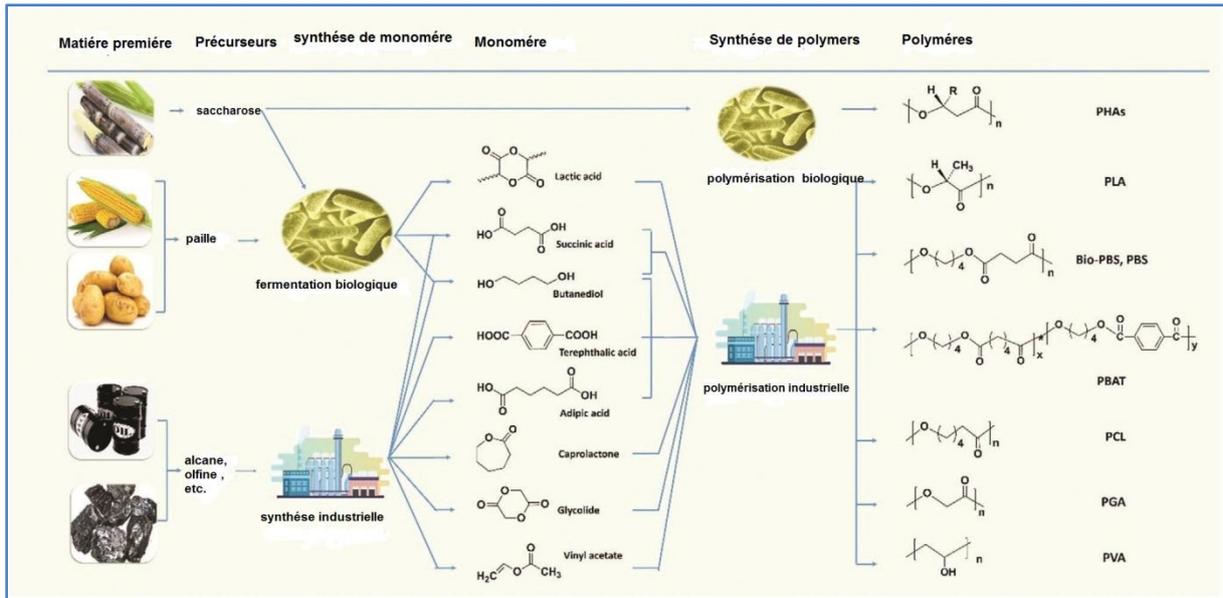


Figure 2. Structures et sources de polymères biodégradables commerciaux (biosourcés et fossiles) (Wang *et al.*, 2020).

Chapitre II

Pollution des océans par le plastique

I. Introduction

Les matières plastiques occupent une place spécifique dans le spectre des produits chimiques anthropiques préoccupants pour l'environnement (**Krueger et al., 2015**).

L'absence de toxicité directe des substances polymériques, en revanche, peut expliquer l'insouciance avec laquelle les polymères synthétiques ont été gaspillés et la sérénité avec laquelle la pollution plastique, par ex. du milieu marin est acceptée depuis des décennies. Cette attitude a changé dans un passé récent, déclenchée par des rapports sur la destruction généralisée de la faune marine par des débris de plastique (**Derraik, 2002**).

Les débris plastiques sont de plus en plus reconnus comme un problème mondial à l'échelle de l'océan en raison de leur omniprésence et de leur récalcitrance, permettant aux particules de persister pendant des années estimées à des millénaires (**Andrady, 2003 ; Barnes et al., 2009**).

La principale limitation des plastiques conventionnels à base de pétrole est le fait qu'ils fragmentent sous l'effet de facteurs abiotiques (rayonnement UV, température, stress physique) pendant une longue période, et ils ne peuvent pas être complètement décomposés et assimilés par des micro-organismes (réaction biotique facteurs) dans un processus de biodégradation. Les caractéristiques cruciales responsables de la résistance des plastiques à la biodégradation comprennent une structure polymère à longue chaîne, un poids moléculaire élevé (MW), l'absence d'un groupe fonctionnel favorable, l'hydrophobicité et la cristallinité (**Wilkes et Aristilde, 2017**).

Un poids moléculaire élevé est un obstacle crucial, car les grands composés ne peuvent pas être transportés à travers la membrane cellulaire des micro-organismes. Ainsi, les polymères à longue chaîne doivent d'abord être dépolymérisés en monomères plus petits avant de pouvoir traverser la membrane cellulaire (**Shah et al., 2008**). Ensuite, les monomères peuvent traverser la membrane cellulaire, puis être assimilés par le métabolisme intracellulaire (**Kolvenbach et al., 2014**).

Thompson et al., (2004) ont demandé « Où est tout le plastique ? » et ont souligné les microplastiques qui avaient auparavant reçu moins d'attention que les gros débris de plastique.

Par ailleurs **Thompson et al., (2005)** a suggéré que tout le plastique à l'exception de celui qui est incinéré pourrait encore être présent.

Cependant, des questions sur les quantités de débris plastiques dans les océans ont surtout été abordées ces dernières années (**Krueger et al., 2015**). Leur présence a considérablement augmenté en raison d'une demande croissante de polymères synthétiques et d'une mauvaise gestion une fois que ces polymères sont devenus des résidus. Des études indiquent que dans la surface de l'eau de la gyre du Pacifique Centre Nord, il y a plus de 334 000 fragments de plastique par kilomètre carré (**Li et al., 2016**), tandis que les estimations indiquent 71,5 à 116 milliards de gros (> 5 mm) débris de plastique au fond de l'océan. Il convient de mentionner que ces valeurs ne tiennent pas compte des microplastiques, qui sont également largement distribués dans les sédiments. De plus, jusqu'à 70 % des déchets plastiques rejetés dans les océans atteignent les profondeurs marines (**Galgani et al., 2015**).

Une étude a estimé un apport annuel de 4,8 à 12,7 millions de tonnes métriques (MMT) de déchets plastiques dans l'océan (**Jambeck et al., 2015**).

Pour l'océan Pacifique oriental, **Law et al., (2014)** ont calculé au moins 21 000 t de microplastiques dans les eaux de surface, sur la base d'un échantillonnage de plancton de 2001 à 2012.

Cozar et al., (2014) ont calculé une quantité de 10 000 à 40 000 t de débris plastiques flottant dans les océans, sur la base des données d'échantillonnage sur 141 sites dans les océans en 2010-2011 et des données de la littérature.

Dans le même temps, **Eriksen et al., (2014)** ont rapporté environ 270 000 t de macro- et microplastiques dans les océans ouverts, indiquant qu'il s'agit d'une estimation prudente.

Cette estimation semble plutôt faible, compte tenu de la production cumulée de plusieurs milliards de tonnes de plastiques au cours des dernières décennies et du fait que seule une faible proportion a été brûlée ou recyclée (**Krueger et al., 2015**).

Cependant **Jambeck et al., (2015)** ont calculé qu'une fourchette de 4,8 à 12,7 MMT de plastiques pénètre dans les océans chaque année, soit près de deux ordres de grandeur au-dessus de l'estimation cumulative d'**Eriksen et al., (2014)**.

Par conséquent, le sort de la grande majorité des apports annuels de plastique dans les océans est actuellement inconnu. Le puits probablement le plus important pour les plastiques manquants est la mer profonde (**Goldberg, 1997**) qui serait en effet jonchée de débris macro et microplastiques (**Van Cauwenberghe et al., 2013 ; Woodall et al., 2014**).

L'accumulation mondiale de plastique sur la surface de l'océan ouvert se trouve fréquemment dans les zones de convergence de chacun des cinq gyres subtropicaux (**Cózar et al., 2014**).

En ce sens, les processus d'encrassement superficiel subis par les plastiques flottants peuvent conduire à l'enfoncement de ces résidus qui atteignent les régions benthiques (**Viera et al., 2021**).

En fait, les quantités de plastique dans le fond marin sont de plusieurs ordres de grandeur plus élevées que dans la colonne d'eau (**Erni-Cassola et al., 2019**).

De plus, des résidus de plastique ont été trouvés au-delà de 1000 km au large des côtes (**Chiba et al., 2018**) et les microplastiques sont abondants dans les sédiments hadaux de la fosse des Mariannes, allant de 200 à 2200 particules par litre (**Peng et al., 2018**).

II. Origine de pollution des océans par le plastique

Environ 80 % des plastiques dans les océans proviennent de sources terrestres. Les plastiques provenant des décharges pénètrent dans l'océan en raison d'une mauvaise gestion et d'une mauvaise élimination des eaux usées et des déchets plastiques, des opérations de décharge côtières et des déchets transportés par les ruisseaux et les rivières. Les 20 % restants sont dus aux déchets générés par les navires/bateaux lors d'activités récréatives, de rejets de déchets, de filets de pêche, etc (**Mattsson et al., 2015**).

Ainsi, les lieux situés loin des sources de pollution sont affectés par les déchets plastiques. Le plastique peut être une source de produits chimiques toxiques tels que les bi-phényles poly chlorés ou les phtalates et le bisphénol A (**Bryant et al., 2016**).

Les océans non seulement accumulent des plastiques à certains endroits mais aussi les transferts vers des régions vierges lointaines comme l'Arctique et l'Antarctique (**Aneta et al., 2018**).

En effet, Les courants océaniques convergent et permettent aux matières plastiques de s'accumuler au fil du temps au centre des principaux tourbillons océaniques formant une énorme masse de champs de débris flottants qui s'accumulent constamment à travers les mers, appelés « plaques de déchets ». Une accumulation relativement élevée de plastique dans l'océan a été identifiée dans la partie orientale du Pacifique Nord Subtropical Gyre (Great Pacific Garbage Patch) (**Lebreton et al., 2018**).

Après sédimentation, le plastique déposé au fond de l'océan peut encore être remis en suspension et dispersé par des processus mécaniques. Selon **Tosin et al., (2012)**, les preuves indiquent que différents types de plastiques circulent dans divers environnements marins et côtiers en raison de processus océanographiques tels que les marées, les courants et l'action du vent. Bon nombre de ces facteurs sont également responsables du transport et de la distribution mondiale des débris de plastique. Ainsi, tout au long de ce cycle, les déchets plastiques sont exposés à une multitude de conditions environnementales qui influencent leurs processus de transformation (**Emadian et al., 2017 ; Beltran Sanahuja et al., 2020**).

La lente dégradation des gros fragments de plastique et la génération de microplastiques sont causées par le rayonnement UV et les forces mécaniques et constituent un facteur facilitant le transfert de plastique sur de longues distances (**Thevenon et al., 2014**). Selon sa densité, le plastique s'accumule dans la colonne d'eau des zones centrales de convergence et flotte à la surface (**Cózar et al., 2014 ; Pauli et al., 2017**) ou coule au fond de la mer après chargement avec des composés dissous biotiques et abiotiques (**Bergmann et Klages, 2012 ; Derraik, 2002**).

En raison de la densité différente des particules et de la possibilité de transport, les déchets plastiques pourraient être collectés à partir de latitudes très peuplées, entraînant une accumulation dans les mers froides et les régions polaires (**Waller et al., 2017**).

III. Types de pollution par le plastique

En raison de la dégradation abiotique du plastique conventionnel causée par rayonnement UV, l'oxygène, la température et le stress physique (**Gewert et al., 2015**), les gros objets en plastique qui se dégradent lentement génèrent des particules microplastiques qui peuvent se propager sur de longues distances par la circulation de la couche de surface océanique entraînée par le vent (**Thevenon et al., 2014**).

III.1. Pollution par les microplastiques

Ils ont une dimension inférieure à 5 mm. Ils pénètrent directement dans l'environnement (par exemple, des nettoyants pour le visage et des cosmétiques) sont décrits comme des microplastiques primaires, tandis que les particules formées à la suite de la fragmentation d'articles plus gros sont appelées des microplastiques secondaires (**Veiga et al., 2016**).

III.2. Pollution par les nanoplastiques

Ils ont une taille de 1 à 100 nm, résultant de la dégradation secondaire du plastique. Le rapport surface/volume élevé avec une réactivité accrue leur permet de s'agréger avec d'autres polluants, des colloïdes naturels et des solides en suspension ; et par conséquent, les nanoplastiques ont été au centre de la recherche environnementale au cours des dernières années (Vered *et al.*, 2019 ; Song *et al.*, 2017).

La propriété hydrophobe et la surface élevée font des micro et nanoplastiques des absorbants efficaces pour les polluants tels que les hydrocarbures polyaromatiques, les biphénylpolychlorés, les polluants organiques persistants, etc. Ces polluants sont facilement rejetés dans les milieux aquatiques (Liu *et al.*, 2016).

IV. Impact environnementaux, sanitaires et esthétiques associés avec la pollution plastique

L'accumulation de plastique dans le milieu marin entraîne des impacts environnementaux importants (Ganesh Kumar *et al.*, 2019).

Les plastiques sont omniprésents dans l'environnement marin qui présentent une source de nourriture majeure pour les animaux marins qui sont attirés par l'odeur, la couleur et par les algues qui poussent sur les plastiques flottants (Ganesh Kumar *et al.*, 2019).

La petite taille des micro et nanoplastiques leur permet de franchir les barrières biologiques, de pénétrer les tissus et de s'accumuler dans les organes, ce qu'on appelle une bioaccumulation (Kashiwada, 2006 ; Von Moos *et al.*, 2012). En conséquence, ces particules sont facilement biodisponibles pour les coraux, les planctons, les crustacés, les mollusques, etc (Browne *et al.*, 2008).

Une fois accumulés, les produits chimiques toxiques présents dans les plastiques causent de graves problèmes aux formes de vie aquatique comme la mortalité ou des effets sublétaux, des dommages physiques et facilitent diverses modulations moléculaires (tableau 2) (Ganesh Kumar *et al.*, 2019).

La toxicité des microplastiques dans le milieu marin dépend probablement de la dose de contamination, de la nature du polymère, de la taille, de la chimie de surface et de l'hydrophobicité. Ces résultats suggèrent qu'une exposition constante à de fortes

concentrations de micro et nanoplastiques pourrait altérer l'ensemble du réseau trophique de l'environnement marin (**Ganesh Kumar et al., 2019**).

Selon les recherches de l'Institut Alfred Wegener, Centre Helmholtz pour la recherche polaire et marine, 1506 espèces sont affectées par les déchets (**Tekman et al., 2017**).

Tableau 2: Effets toxiques des microplastiques et nano plastiques sur les organismes marins (**Ganesh Kumar et al., 2019**).

Source de toxicité	Organismes affectés	Références
Lixiviats microplastiques	Gastéropode intertidal (<i>Littorina littorea</i>) Oursin (<i>Paracentrotuslividus</i>)	Seuront, 2018 Oliviero et al., 2019
Sphères, fragments et fibres de microplastique	Crevette rose (<i>Palaemonetespugio</i>) Dinoflagellé (<i>Kareniamikimotoi</i>)	Gray et Weinstein, 2017 Zhao et al., 2019
Micro Chlorure de polyvinyle (mPVC)	Microalgue marine(<i>Skeletonemacostatum</i>)	Zhang et al., 2016
Microbilles nanométriques	Rotifère marin (<i>Brachionuskoreanus</i>)	Jeong et al., 2018
Nano et microbilles de polystyrène	Copépode marin (<i>Paracyclopina nana</i>)	Jeong et al., 2017
Nano plastiques de polystyrène	Diatomée marine (<i>Phaeodactylumtricornutum</i>)	Sendra et al., 2019
Nanoparticules de polystyrène	Organismes planctoniques (<i>Daphnia magna</i>) Espèces planctoniques marines (<i>Dunaliellatertiolecta</i> et <i>Artemiafranciscana</i>)	Brun et al., 2017 Bergami et al., 2017
Microbilles de polyéthylène	Larves de bar européen (<i>Dicentrarchuslabrax</i>)	Mazurais et al., 2015
Microplastiques polyéthylène	Moules bleues (<i>Mytilusedulis</i>) Krill antarctique (<i>Euphausiasuperba</i>)	Green et al., 2019 Dawson et al., 2018
Microplastiques	Ver polychète marin (<i>Sternaspisscutata</i> , <i>Magelonacincta</i>) et <i>Mollusques bivalves marins</i> (<i>Tellina sp.</i>) Moule bleue (<i>Mytilusedulis</i>)	Naidu et al., 2018 Browne et al., 2008
Litière en plastique	Oiseaux de mer (<i>Pelecanoidesgarnotii</i> , <i>Pelecanoidesurinatrix</i> , <i>Phalacrocoraxbougainvillii</i> , <i>Spheniscushumboldti</i> , <i>Pelecanusthagus</i> et <i>Larusdominicanus</i>)	Thiel et al., 2018

Plusieurs catégories d'effets sur les organismes et les écosystèmes causées par la pollution plastique peuvent être distinguées :

1. Les problèmes esthétiques résultant d'éléments macroscopiques (**Krueger et al., 2015**).
2. L'enchevêtrement d'animaux dans des filets de pêche ou des feuilles de plastique limite leur mobilité, donc peuvent les empêcher de respirer à la surface et conduit à la noyade ou même un étouffement lorsqu'ils obstruent le système respiratoire. Les plastiques ingérés peuvent également rester dans le tube digestif des animaux, réduisant la quantité de nourriture pouvant être absorbée et réduisant ainsi la forme physique des animaux (**Azzarello et Van Vleet, 1987 ; Laist, 1987 ; Derraik, 2002**).
3. L'effet de l'environnement peuvent rendre les polymères synthétiques cassants et conduit à leur fragmentation aux particules petites (**Barnes et al., 2009**). Ces particules ont souvent été trouvées dans le tractus intestinal des oiseaux, poissons et divers invertébrés. Des particules encore plus petites, telles que les abrasifs microscopiques ou les microplastiques peuvent entrer dans la chaîne alimentaire à des stades plus précoces et être transférées à des niveaux trophiques supérieurs (**Setälä et al., 2014**).
4. Des additifs tels que les plastifiants devenant ainsi biodisponibles et exerçant leur toxicité sur les organismes cibles (**Rochman et al., 2014**). De même, de nombreux polymères synthétiques peuvent accumuler, transporter et libérer des produits toxiques qu'elles absorbent vers les organismes récepteurs après avoir été ingéré (**Bakir et al., 2014 ; Chua et al., 2014**).
5. Les matières plastiques ont également été reconnues comme substrat et vecteur de biofilms microbiens (d'agents pathogènes et d'espèces envahissantes) constitués d'assemblages microbiens différents de ceux de l'océan environnant (**McCormick et al., 2014 ; Zettler et al., 2013**).
6. Selon la concentration, les morceaux de microplastique peuvent représenter une menace pour les organismes à des niveaux trophiques inférieurs (**Laist, 1987 ; Thompson et al., 2004 ; Browne et al., 2008 ; Rummel et al., 2017**) comme le zooplancton et les moules (**Caruso, 2015**). Les microplastiques flottants (< 1 mm) peuvent être facilement ingérés par le zooplancton et sont par conséquent évacués avec leurs boulettes fécales. Ces pellets sont une source de nourriture pour les organismes marins, constituant un vecteur de transport vertical plus rapide (**Cole et al., 2016**).

V. Les effets de la pollution par le plastique sur la population microbienne

Généralement, le danger (éco-) toxicologique est lié au produit d'une mesure d'exposition et d'une mesure de ses effets indésirables dont une forte exposition des organismes et des écosystèmes aux matières plastiques est évidente de nos jours (**Krueger et al., 2015**).

Les plastiques libèrent des phtalates par exposition au soleil et par lessivage direct (**Giam et al., 1978 ; Teuten et al., 2009**), ce qui peut perturber le système endocrinien des mammifères (**Li et al., 2004**).

Dans le même temps, il se produit un tassement de la biomasse sur du plastique flottant, appelé biofouling (**Van Sebille et al., 2016**) (**Figure.3**).

L'encrassement biologique (la colonisation de produits artificiels par des facteurs biotiques et abiotiques...) comprend cinq phases principales : l'adsorption, l'immobilisation, la consolidation, le microencrassement et le macroencrassement. Les bactéries sont cruciales pour le biofouling car elles participent à la colonisation primaire des surfaces lors du microfouling primaire (**Selim et al., 2017**).

Le microfouling subit deux étapes, la colonisation primaire (colonisateurs primaires, bactéries et diatomées) et la colonisation secondaire (**Selim et al., 2017**).

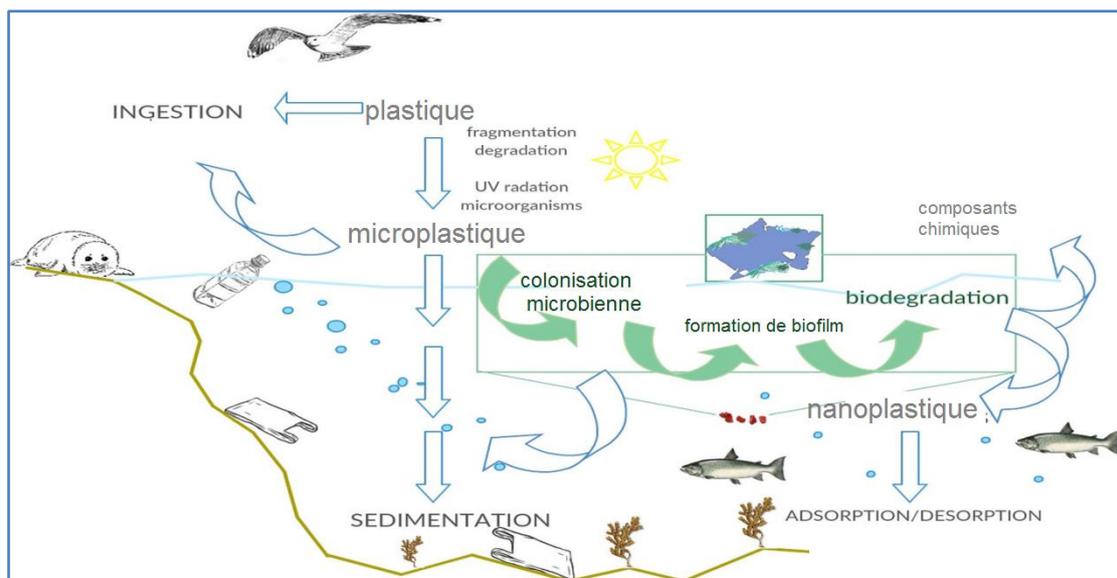


Figure 3. Interactions potentielles entre les microorganismes marins et les microplastiques dans un environnement marin (**Urbanek et al., 2018**).

Les débris plastiques marins comme vecteur d'espèce nuisibles ont été suggérés par **Masó et al., (2003)** qui ont identifié des dinoflagellés potentiellement nocifs tels que *Ostreopsis sp.* et *Coolia sp.* Agents pathogènes putatifs des poissons (*Tenacibaculum sp.*) et d'invertébrés (*Phormidium sp.* et *Leptolyngbya sp.*) se sont avérés plus fréquents sur le plastique que sur l'eau de mer environnante (**Dussud et al., 2018a**). Un agent pathogène putatif pour le corail *Halofolliculina spp.* s'est révélée abondante sur certaines régions de l'Ouest. Certaines espèces eucaryotes toxiques ont également été mentionnées par **Debroas et al., (2017)** à faible abondance (<0,04%), mais pourrait être considéré comme organismes auto-stoppeurs.

Aucune preuve de pathogénicité sur les animaux marins en relation avec la plastisphère n'a jamais été prouvée ce qui nécessite d'autre recherche avant de donner des résultats définitifs. À part ces résultats, les microplastiques colonisés par des agents pathogènes peuvent transporter la contamination des plages et des baignades auxquelles elles sont exposées (**Keswani et al., 2016**).

Les facteurs déterminant la composition de la plastisphère sont principalement spatiaux et saisonnières, mais également influencés par le polymère type, propriétés de surface et taille, Le gradient environnemental. Des communautés bactériennes sont façonnées d'abord par l'eau douce à la mer conditions environnementales et secondairement par le type de plastique (PS et PE) (**Oberbeckmann et al., 2018**).

D'autres études n'ont montré aucun effet d'emplacement géographique ni type de plastique sur la composition communautaire des bactéries. Nombreuses études sur la plastisphère confirment la présence de biofilm sur les plastiques dans les océans, mais leur effet fait toujours l'objet d'un débat permanent (**Jacquin et al., 2018**).

Les propriétés physiques du plastique permettent le transport à longue distance de divers auto-stoppeurs microbiens attachés à sa surface (**Harrison et al., 2011 ; Zettler et al., 2013**).

Les interactions entre micro- et macro-organismes avec leur substrat et leur environnement sont nécessaires pour mieux prédire les conséquences écologiques des microplastiques transportés à travers les océans mondiaux (**Jacquin et al., 2018**).

Chapitre III

Dégradation du plastique

I. Dégradation du plastique

I.1. Définition

Les plastiques ne sont pas facilement dégradables et il faut des années pour une dégradation complète. Ces contaminants prédominants se sont accumulés dans les océans du monde entier (**Ganesh Kumar et al., 2019**).

Toute modification physique ou chimique du polymère résultant de facteurs environnementaux tels que la lumière, la chaleur, l'humidité, les conditions chimiques ou l'activité biologique. Procédés induisant des modifications des propriétés des polymères (détérioration de la fonctionnalité) dues aux réactions chimiques, physiques ou biologiques entraînant une scission de liaison et des transformations chimiques ultérieures (formation d'homogénéités structurales) ont été classées comme dégradation du polymère. La dégradation s'est traduite par des modifications des propriétés des matériaux telles que les caractéristiques mécaniques, optiques ou électriques, par des craquelures, des fissures, une érosion, une décoloration, une séparation de phase ou un délaminage. Les changements comprennent la scission des liaisons, la transformation chimique et la formation de nouveaux groupes fonctionnels (**Pospisil et Nespurek, 1997**).

I.2. Types de dégradation du plastique

L'hydrolyse du polymère peut se produire soit biotique, soit abiotique, dans laquelle l'hydrolyse abiotique est de 8 à 20 ordres de grandeur plus lente que l'hydrolyse enzymatique (**Laycock et al., 2017, Rittie et Perbal, 2008**).

I.2.1. Dégradation abiotique

En raison d'une grande variété de facteurs environnementaux, tels que l'exposition aux rayons UV, au vent, aux vagues, à l'eau de mer, les déchets plastiques subissent des influences simultanées conduisant à la fissuration, à l'érosion de surface, à l'abrasion et à la décomposition en mésoplastique, microplastique et nanoplastiques (**Ter Halle et al., 2016 ; Ter Halle et al., 2017**).

L'altération des propriétés plastiques due à la dégradation abiotique est appelée « vieillissement » et, dans la nature, dépend de plusieurs facteurs tels que la température, la lumière solaire et les produits chimiques qui accélèrent la vitesse de dégradation en oxydant ou en perturbant la longueur de la chaîne polymère (**Jacquin et al., 2018**).

Dans l'océan, l'hydrolyse abiotique de groupes fonctionnels, comme les esters, les carbonates et les amides, coupe les grosses macromolécules qui composent un morceau de plastique et réduit ainsi le poids moléculaire **(Gewert et al., 2015)**.

Ce processus est facilité par l'alcalinité de l'eau (gamme de pH ~ 8–8,3) et la présence d'hydroxyde (c'est-à-dire OH⁻) des ions **(Marion et al., 2011)**.

Sur la base d'études de dégradation à différentes températures et du calcul ultérieur de l'énergie d'activation pour l'hydrolyse abiotique **(Pickett et al., 2013)**.

Généralement, ces processus abiotiques se déroulent lentement et dépendent d'un certain nombre de facteurs, tels que le type de groupe fonctionnel, le poids moléculaire et le rapport surface / volume. Les groupes fonctionnels, comme les esters, les amides, les carbonates et les uréthanes, permettent une érosion de surface beaucoup plus rapide par hydrolyse enzymatique et hydrolyse abiotique que les plastiques sans groupes fonctionnels, tels que le PE et le polystyrène (PS) **(Welden et Cowie, 2017)**.

Aussi, l'exposition aux rayons UV et à l'oxygène provoque une photodégradation **(Rånby, 1989 ; Gewert et al., 2018)**. Ces processus de photodégradation se produisent à une profondeur de 50 à 100 µm et entraînent une réduction du poids moléculaire et une fissuration qui facilitent la formation de microplastiques **(Karlsson et al., 2018)**.

Étant donné que ces processus de photodégradation impliquent un mécanisme radicalaire, la probabilité d'oxydation C–H photo-initiée et la scission de chaîne dépend de la structure du polymère. En conséquence, la plupart des plastiques commerciaux contiennent des additifs tels que des antioxydants et des photostabilisants qui retardent la dégradation **(Rånby, 1993 ; Hahladakis et al., 2018)**.

La partie visible de la lumière solaire (400–760 nm) accélère la dégradation des polymères par chauffage. Le rayonnement infrarouge (760-2500 nm) accélère l'oxydation thermique **(Gugumus, 1990 ; Pospisil et Nespurek, 1997)**.

La dégradation thermique des polymères est une "détérioration moléculaire résultant d'une surchauffe". À des températures élevées, les composants du squelette à longue chaîne du polymère peuvent commencer à se séparer (scission moléculaire) et réagissent les uns avec les autres pour modifier les propriétés du polymère. Les réactions chimiques impliquées dans la dégradation thermique conduisent à des changements de propriétés physiques et

optiques par rapport aux propriétés initialement spécifiées. La dégradation thermique implique généralement des modifications du poids moléculaire (et de la distribution des poids moléculaires) du polymère et les modifications de propriétés typiques comprennent ; ductilité et fragilisation réduites, farinage, changements de couleur, fissuration et réduction générale de la plupart des autres propriétés physiques souhaitables (**Olayan et al., 1996**).

I.2.2. Biodégradation

La biodégradation du plastique est un processus qui aboutit à la conversion totale ou partielle du carbone organique en biogaz et en biomasse associée à l'activité d'une communauté de microorganismes (bactéries, champignons et actinomycètes) capables d'utiliser le plastique comme source de carbone (**Shah et al., 2008**). Selon les conditions respiratoires (aérobie/anaérobie) et les microorganismes impliqués, le biogaz sera différent (CO_2 , CH_4 , H_2S , NH_4 , et H_2) (**Mohee et al., 2008**).

On considère que la biodégradation se produit après ou en même temps que la dégradation abiotique, qui affaiblit la structure des polymères, comme le révèlent la rugosité, les fissures et les changements moléculaires (**Ipekoglu et al., 2007**).

La biodégradation est devenue une catégorie de mécanisme de dégradation largement approuvée en raison de sa nature écologique et de son prix abordable (**Ganesh Kumar et al., 2019**).

La biodégradation peut être résumée en quatre étapes essentielles (**Figure 4**), qui ont été décrites en détail dans une revue de **Dussud et Ghiglione, (2014)** :

- La bio-détérioration concerne le biofilm qui se développe à la surface et à l'intérieur du plastique, ce qui augmente la taille des pores et provoque des fissures qui affaiblissent les propriétés physiques du plastique (détérioration physique) ou libère des composés acides qui modifient le pH à l'intérieur des pores et des résultats dans les modifications de la microstructure de la matrice plastique (détérioration chimique).

- La bio-fragmentation correspond à l'action d'enzymes extracellulaires (oxygénases, lipases, estérases, dépolymérase et autres enzymes pouvant être aussi diverses que le large spectre de types de polymères) libérées par des bactéries colonisant la surface du polymère. Ces enzymes vont réduire le poids moléculaire des polymères et libérer des oligomères puis des monomères assimilables par les cellules.

- L'assimilation permet d'intégrer des oligomères de moins de 600 Daltons à l'intérieur des cellules pour servir de source de carbone, augmentant ainsi la biomasse microbienne.
- La minéralisation est l'étape ultime de la biodégradation d'un polymère plastique et se traduit par l'excrétion de métabolites complètement oxydés (CO₂, N₂, CH₄, et H₂O).

I.2.3. Dégradation enzymatique

La dégradation enzymatique des polymères par hydrolyse est un processus en deux étapes : d'abord, l'enzyme se lie au substrat polymère puis catalyse ensuite un clivage hydrolytique (**Tokiwa et Calabia, 2004**).

Au cours de la dégradation, les enzymes extracellulaires des micro-organismes décomposent les polymères complexes produisant des chaînes courtes ou des molécules plus petites, par exemple des oligomères, des dimères et des monomères, suffisamment petits pour passer les membranes bactériennes externes semi-perméables. Le processus est appelé dépolymérisation. Ces molécules à chaîne courte sont ensuite minéralisées en produits finaux, par exemple le CO₂, H₂O ou CH₄, la dégradation est appelée minéralisation, qui sont utilisées comme source de carbone et d'énergie (**Gu, 2003**).

La majeure partie de notre planète est froide en permanence (< 5 °C) et inhabitée par l'homme. La raison en est que plus de 70% de la Terre est recouverte d'eau de mer, principalement océanique profonde, dont les deux tiers ont une température remarquablement constante d'environ 2 °C (**Russell, 1990**).

Néanmoins, des bactéries peuvent exister dans ces conditions défavorables. Les communautés microbiennes résistantes à de telles conditions peuvent présenter de nombreuses caractéristiques uniques (**Urbanek et al., 2018**).

Parmi un certain nombre de capacités microbiennes dans les zones froides, la capacité à décomposer le plastique est de plus en plus mentionnée. Il a été supposé que la quantité croissante de déchets plastiques s'échappant vers les océans pourrait fournir un nouveau substrat pour les organismes benthiques (**Pauli et al., 2017**).

L'adaptation à de nouvelles sources de carbone peut créer de nouvelles caractéristiques des micro-organismes, en particulier dans la production d'enzymes actives à froid. Les enzymes particulièrement adaptées au froid des micro-organismes polaires offrent de nombreuses opportunités d'exploitation biotechnologique et donnent de nouvelles

perspectives sur un large éventail de problèmes appliqués tels que la pollution plastique (**Rampelotto, 2014**). Actuellement, les enzymes de micro-organismes psychrophiles suscitent de l'intérêt pour de nombreuses applications industrielles en raison des tentatives en cours pour réduire la demande énergétique (**Yadav et al., 2017**).

Une température plus basse nécessaire à la croissance à laquelle l'activité enzymatique est maintenue peut-être un énorme avantage dans le processus de dégradation en raison de la réduction de la consommation d'énergie électrique pour le chauffage. Ainsi, des microorganismes potentiellement issus d'habitats froids pourraient être employés dans des décharges à ciel ouvert (**Urbanek et al., 2018**).

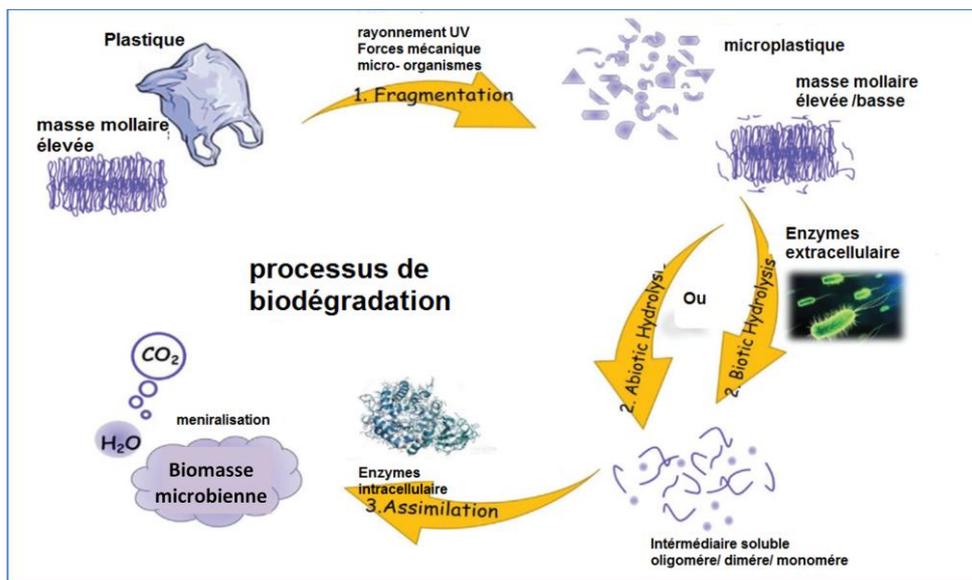


Figure 4. Représentation schématique des différentes étapes impliquées dans la biodégradation (**Wang et al., 2020**).

II. Facteurs affectant la biodégradation du plastique

Plusieurs facteurs affectent le processus de biodégradation, notamment les propriétés du polymère, les conditions d'exposition et les caractéristiques enzymatiques (**Figure 5**). Certains de ces facteurs sont énumérés ci-dessous (**Temoor et al., 2018**).

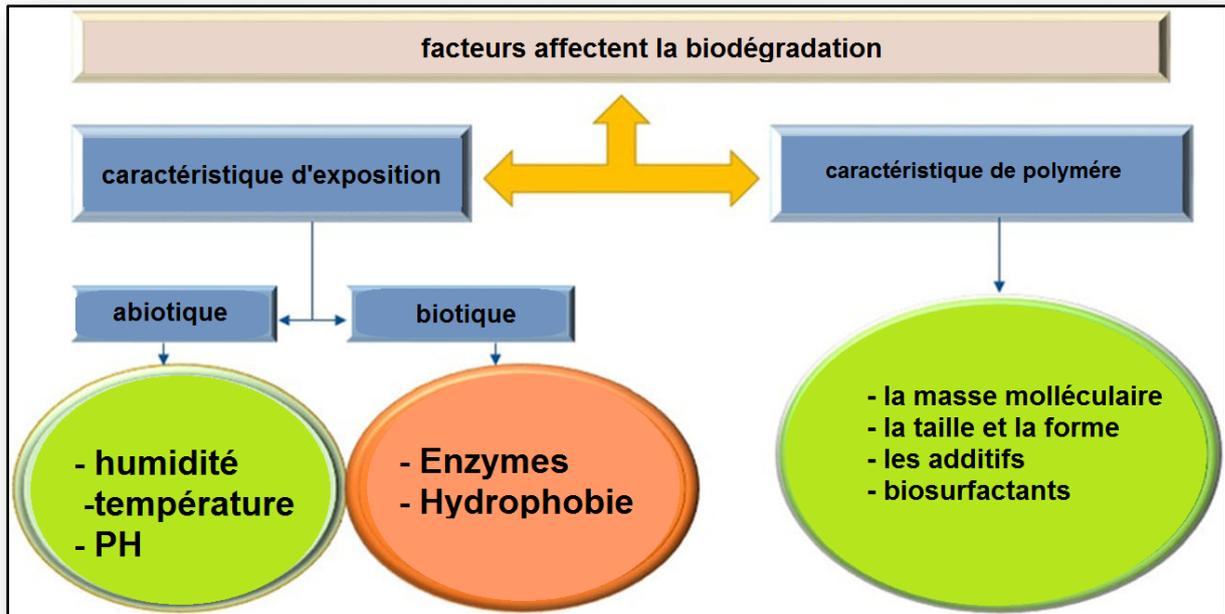


Figure 5. Les facteurs affectant le taux de biodégradation des plastiques (Temoor et al., 2018).

II.1. Caractéristiques du polymère

II.1.1 Masse moléculaire

Du point de vue de la biodégradabilité, le poids moléculaire joue un rôle très critique dans la définition de nombreuses propriétés des polymères. La dégradabilité est réduite avec l'augmentation du poids moléculaire (Tokiwa et al., 2009).

II.1.2 Forme et taille

Les polymères ayant une grande surface peuvent être dégradés rapidement par rapport à ceux ayant une petite surface (Kijchavengkul et Auras, 2008 ; Steven, 2003).

II.1.3. Biosurfactants

Les biosurfactants sont des composés amphiphiles produits principalement sur les surfaces vivantes. La biodégradation des polymères (fossiles et biosourcés) est améliorée par l'ajout d'un biosurfactant en raison de leur faible toxicité et de leur biodégradabilité élevée (Orr et al., 2004). Les biosurfactants facilitent le processus de biodégradation en raison de la

présence de groupes fonctionnels spécifiques et permettent ainsi l'activité dans des conditions extrêmes de température, de pH et de salinité (**Kawai et al. ,2002 ; Kawai et al. ,2004**).

II.2. Conditions d'exposition

II.2.1. Humidité

L'humidité peut influencer la biodégradation des polymères de différentes manières en raison des besoins essentiels en eau pour la croissance et la multiplication des microorganismes (**Ho et al., 1999**). De plus, des conditions riches en humidité favorisent le processus d'hydrolyse en générant d'avantage de réactions de scission de chaîne (**Temoor et al., 2018**).

II.2.2. PH et température

Le pH peut modifier la vitesse des réactions d'hydrolyse en changeant les conditions acides ou basiques (**Auras et al., 2004 ; Henton et al.,2005**). De même, la dégradabilité enzymatique est affectée de manière significative par la température de ramollissement du polymère. Elle diminue avec l'augmentation de la température (**Tokiwa et Calabria, 2004 ; Tokiwa et al., 2009**).

II.3. Caractéristiques enzymatiques

Différentes enzymes possèdent des sites actifs uniques et ont la capacité de biodégrader divers types de polymères (**Kale et al.,2007**).

II. Mécanisme de biodégradation du plastique par les microorganismes

Les bactéries et les champignons agissent pour dégrader ces polymères en CO₂ et H₂O par divers mécanismes métaboliques et enzymatiques. La nature et l'activité catalytique des enzymes varient selon les espèces microbiennes et même au sein des souches. En raison de cette spécificité, différentes enzymes sont connues pour dégrader divers types de polymères (**Sivan, 2011**).

Le principal mécanisme impliqué dans la biodégradation du plastique est l'attachement des microbes avec des polymères suivi d'une colonisation de surface et donc la formation de biofilms microbiens sur la surface plastique (plastisphère). Les biofilms microbiens se développent rapidement sur les plastiques avec une diminution significative de la flottabilité et de l'hydrophobicité du plastique (**Lobelle et Cunliffe, 2011**).

L'hydrolyse enzymatique des plastiques implique deux étapes : premièrement, les enzymes se fixent au substrat polymère, suivies d'une division hydrolytique (**Figure 6**). Les produits de dégradation des polymères tels que les oligomères, les dimères et les monomères ont un poids moléculaire très faible et sont finalement convertis en CO₂ et H₂O par minéralisation (**Tokiwa et al., 2009**).

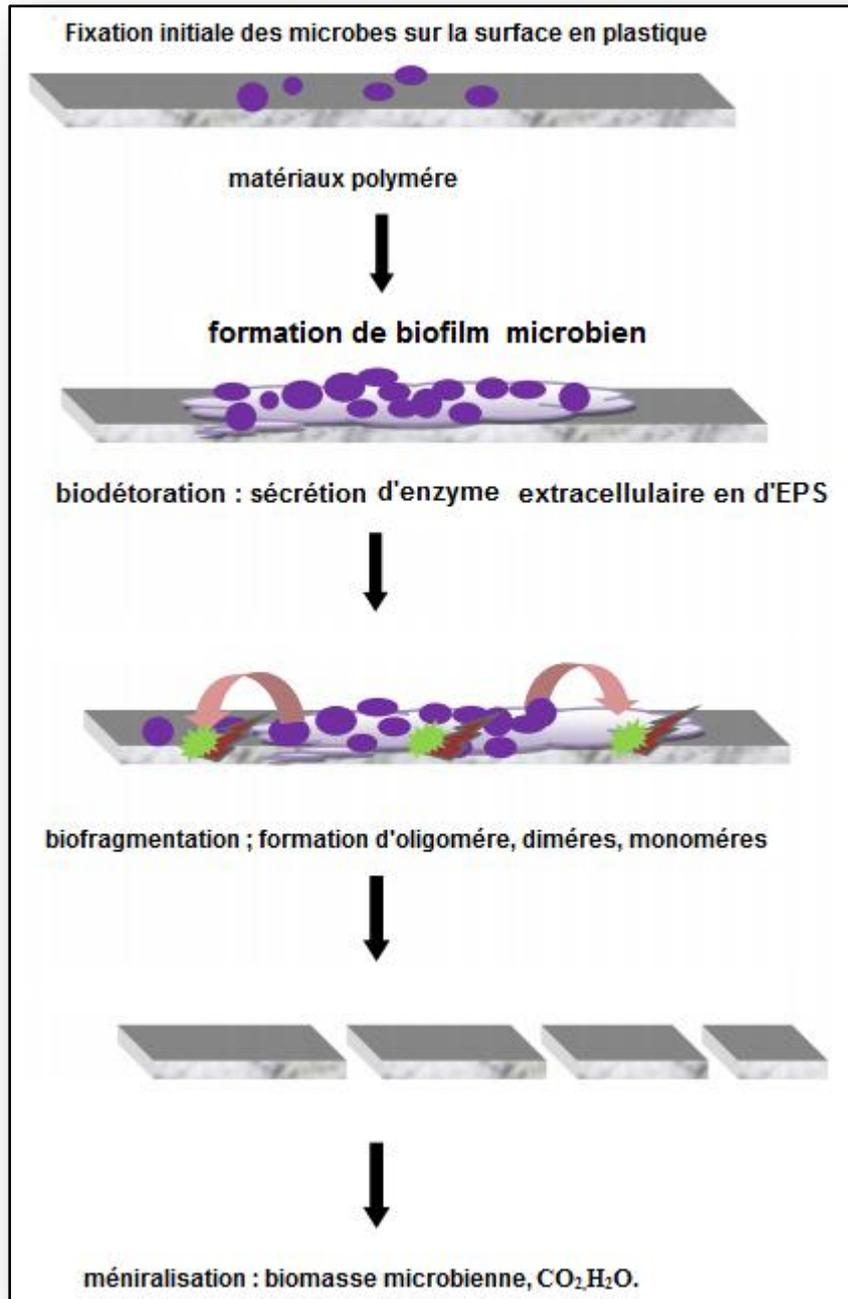


Figure 6. Illustration schématique de la biodégradation du plastique par les micro-organismes (Ganesh Kumar et al., 2019).

Dans des conditions aérobies (**Figure 7**), l'oxygène est utilisé comme accepteur d'électrons par les bactéries, suivi de la synthèse de composés organiques plus petits, et donc de CO₂ et l'eau sont produits comme produits finis (Priyanka et Archana, 2012).

Dans des conditions anaérobies, les polymères sont écrasés en l'absence d'oxygène par des microorganismes. Le sulfate, le nitrate, le fer, le dioxyde de carbone et le manganèse sont utilisés comme accepteurs d'électrons par les bactéries anaérobies (Priyanka et Archana, 2012).

De nouvelles enzymes et voies microbiennes doivent être explorées pour optimiser les conditions dans lesquelles les polymères peuvent être dégradés efficacement. Les polymères non biodégradables (fossiles et biosourcés) sont dits non biodégradables car ils pourraient être complètement biodégradables une fois que de nouvelles souches microbiennes et leurs voies de dégradation de ces polymères auraient été complètement décrites (Temoor et al., 2018).

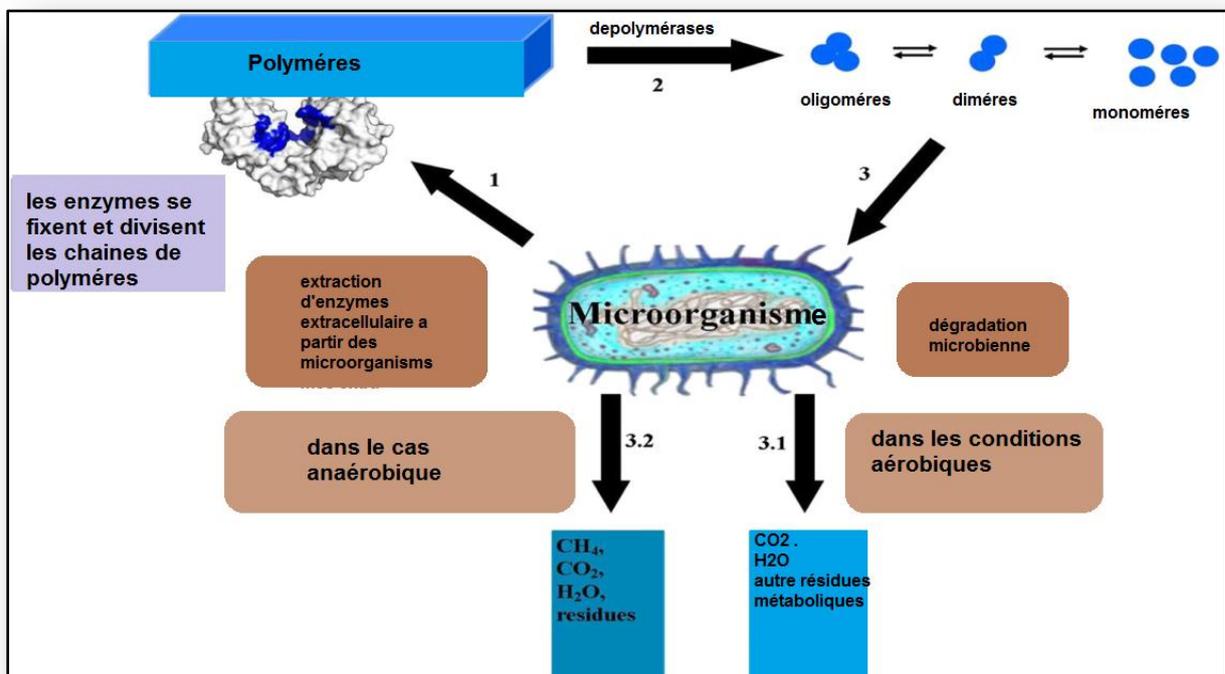


Figure 7. Mécanismes de biodégradation du plastique dans des conditions aérobiques et anaérobies (Temoor et al., 2018).

IV. Biodégradation du plastique dans les océans

La dégradabilité des plastiques dans l'eau marine est complexe et nécessite une enquête et une évaluation approfondies pour fournir une base précise pour l'application pratique des matériaux (Wang et al., 2020).

IV.1. Caractéristiques environnementales du milieu océanique

Comparativement au sol et au compost, le milieu marin se caractérise par une basse température, une salinité élevée, une pression élevée, des courants et de faibles niveaux de nutriments (p. ex. nitrate). En plus des variations de température entre les différentes saisons et les différentes zones, la température de l'eau varie avec la profondeur dans le sens vertical. La température moyenne de surface de l'eau de mer est de 17,4 °C (**Fricke et Thum, 1975**).

La température chute à 0–4 °C lorsque la profondeur de l'eau dépasse 2000 m (**Russell, 1990**). L'eau de mer est riche en sels inorganiques et la salinité est liée à l'évaporation, aux précipitations, au ruissellement des rivières et aux courants marins (**Wang et al., 2020**).

Dans différentes zones, la salinité varie à différentes profondeurs, ou dans la même zone maritime montre des changements saisonniers. La salinité des eaux du large et de l'estuaire ne dépasse généralement pas 30‰, et la salinité de surface de l'océan est comprise entre 32‰ et 37‰, avec une moyenne de 35‰. L'eau de mer est faiblement alcaline avec des valeurs de pH de ≈8.0 et 8.5. L'eau de mer de surface est généralement stable à pH = 8,1±0,2, tandis que les eaux moyennes et profondes varient généralement entre 7,8 et 7,5 (**Wang et al., 2020**).

La teneur en oxygène dissous dans l'eau de mer est nettement inférieure à celle du sol, tous deux affectés par la température et étroitement liés aux processus biologiques, par exemple la présence et l'abondance de certains organismes marins. Comme pour les facteurs abiotiques (p. ex. salinité, température, pression, rayonnement UV), l'habitat biologique en milieu marin est structuré verticalement et présente des compositions d'espèces différentes selon les zones (**Wang et al., 2020**).

Les micro-organismes sont un groupe important d'organismes divers (principalement unicellulaires), notamment des bactéries, des archées, des algues unicellulaires, des champignons et des protozoaires. Ils sont omniprésents dans les différents habitats marins et constituent une partie importante des réseaux trophiques marins (**Wang et al., 2020**).

Les micro-organismes autotrophes (par exemple, les algues, les cyanobactéries) produisent de la matière organique dans les couches supérieures inondées de lumière (zone épipélagique) par photosynthèse. Les zones plus profondes sans rayonnement UV sont principalement habitées par des organismes hétérotrophes qui décomposent les substances organiques (principalement des bactéries hétérotrophes et, dans une moindre mesure, des champignons). Ils se sont déposés sur de la matière organique dissoute ou de la matière

organique particulière (DOM ou POM), mais aussi sur des débris marins, c'est-à-dire des matières organiques plus grosses, y compris des plastiques fragmentés (Wang et al., 2020).

Les écosystèmes marins contiennent environ la moitié moins de micro-organismes que les sols terrestres. Les habitants de l'environnement marin doivent être spécifiquement adaptés aux facteurs environnementaux uniques, notamment la basse température, la haute pression, la salinité élevée et la faible teneur en éléments nutritifs. La densité des bactéries hétérotrophes dans l'eau de mer serait de l'ordre de 10^5 par millilitre. Le nombre et la composition des espèces varient selon l'emplacement et la profondeur, en particulier en haute mer, où les basses températures limitent la croissance des micro-organismes, mais une moyenne d'environ 10^6 cellules par ml semble être généralement acceptée (Nakayama et al., 2019, Schut et al., 1993).

Whitman et al., rapportent des valeurs de 5×10^5 procaryotes (bactéries autotrophes et hétérotrophes ainsi que archées) par ml pour la partie supérieure de l'océan et $0,5 \times 10^5$ cellules procaryotes par ml pour l'eau en dessous de 200 m (Whitman et al., 1998).

À des profondeurs inférieures à 4000 m, la fréquence des espèces microbiennes diminue davantage en raison de la basse température et de la faible disponibilité alimentaire. La plupart des micro-organismes des grands fonds marins se trouvent sur des matières organiques englouties (Wang et al., 2020).

Contrairement au milieu marin plutôt froid, le processus de compostage est généralement effectué à une température plus élevée entre 58 °C et 65 °C (ISO14855-1). Les espèces microbiennes directement liées à la biodégradation sont significativement différentes de celles de l'eau de mer, et le nombre est souvent plus élevé, souvent supérieur à 10^9 mL⁻¹ (Shui-xia et AnhuiAgric, 2009).

Par conséquent, les profils de dégradation des polyesters biodégradables dans l'eau de mer peuvent être très différents de ceux des sols ou des environnements de compostage (Wang et al., 2020).

IV.2. Facteurs influençant la dégradation des polyesters par l'eau océanique

Bien que la diminution du taux de biodégradation dans l'eau de mer ait été rapportée dans de nombreuses études, les raisons fondamentales de ce résultat sont à peine expliquées.

Malgré une forte lumière UV provenant de la surface de la mer, les forces mécaniques causées par les courants océaniques et les vagues océaniques dans la zone épipélagique peuvent accélérer la transition des matériaux des gros objets aux petits fragments dans la première étape. Bien que le pH et la capacité tampon de l'océan soient également dictés par l'équilibre du CO₂ atmosphérique, l'absorption par les océans, la température, la pression et la diffusion à différentes profondeurs océaniques, la force ionique élevée de l'eau de mer en fait toujours l'équivalent d'un tampon alcalin faible avec un pH de $\approx 8,0$ à $8,6$, ce qui peut augmenter la force motrice de la dégradation par rapport à l'eau douce neutre (**Rodriguez et al., 2016**).

La basse température et les différentes communautés microbiennes restent les déterminants les plus critiques de la vitesse de dégradation des polyesters et conduisent à l'effet inverse. Les matériaux qui coulent dans des zones plus profondes à une température d'environ 2 °C présentent des taux d'hydrolyse considérablement inférieurs à ceux du sol et du compost. La basse température et la salinité élevée dans le milieu marin entraînent des communautés microbiennes différentes par rapport aux écosystèmes du sol et d'eau douce, des quantités totales inférieures de micro-organismes et moins d'espèces microbiennes spécifiques nécessaires à la dégradation de la plupart des matériaux biodégradables. Dans ce cas, la deuxième étape clé de l'hydrolyse biotique est ralentie en raison du faible nombre de microbes actifs. L'hydrolyse abiotique se produit toujours, mais à un rythme encore plus lent en raison de la basse température (**Figure 8**) (**Wang et al., 2020**).

La vitesse de dégradation des polymères augmente à mesure que le nombre de micro-organismes augmente (**Kasuya et al., 1998. Lu et al., 2018. Urbanek et al., 2018**).

L'impact des microbes peut également être reflété par les performances du polyester dans différentes zones de l'océan. Les facteurs environnementaux tels que la température et les micro-organismes présents dans l'eau de mer diffèrent au cours des saisons de l'année, dans différentes régions et à différentes profondeurs, ce qui peut entraîner des différences dans les performances de dégradation d'un même matériau. Conformément à l'abondance relativement faible des populations microbiennes, la dégradation des bioplastiques dans les zones d'eau plus profonde a présenté une période de latence initiale, après quoi des taux de dégradation comparables à ceux des autres stations (**Wang et al., 2020**).

Vraisemblablement, une biodégradation significative ne s'est produite qu'après la colonisation de micro-organismes sur le plastique, un paramètre qui dépendait des populations microbiennes résidentes (**Kasuya et al., 1998**).

La plupart des films dégradés dans l'eau des lacs et des rivières ont montré une dégradabilité significativement réduite après leur entrée dans l'eau de mer, en raison des différentes espèces et quantités de micro-organismes correspondantes. En outre, il a été signalé que les taux de dégradation des polymères dans les eaux profondes sont nettement inférieurs à ceux des eaux de la baie, dus à différents nombres et types de micro-organismes (**figure 8**) (**Sekiguchi et al., 2011**).

Comme les plastiques biodégradables ont généralement une densité plus élevée que l'eau de mer, ils coulent dans des eaux plus profondes avec un nombre inférieur de micro-organismes. Par conséquent, il est rationnel qu'un sac en plastique avec une cinétique de biodégradation rapide sur le front de mer ne se dégrade pas longtemps après être entré dans l'océan ou avoir sombré dans les profondeurs marines (**Wang et al., 2020**).

				
facteurs clé	Compost	eau pure	eau de rivière	eau de la mer
humidité	+++++	+++++	+++++	+++++
température	48-65°C +++++	Adjustable +++	0-25°C +++	0-17°C +
micro-organismes	10 ⁹ +++++	0 ---	10 ³ -10 ⁶ +++	1-10 ⁵ ++
salinité	<5% ---	0 ---	0-1% ---	~35% ---
PH	neutre ++++	neutre ++++	neutre ++++	8.6 (alcaline) ++++
dégradabilité	+++++	++	++++	+++

Figure 8. Les facteurs affectent la dégradation des polyesters dans différents environnements (**Wang et al., 2020**).

IV.3. Biodégradation des types de plastiques en milieu océanique

L'étude de dégradation comprenait l'isolement de nouveaux microbes qui dégradent le polymère synthétique dans l'environnement marin et des idées novatrices qui impliquent le clonage d'enzymes spécifiques (**Premraj et al., 2004**).

Les micro-organismes impliqués dans la dégradation du plastique et leur mode d'action pour dégrader les polymères synthétiques comme le HDPE, le LDPE, l'alcool polyvinylique (PVA), le PP, le PE, le polycaprolactone (PCL), le PVA polyéthylène à faible densité linéaire (LLDPE) et le nylon sont tabulés dans **Tableau 3**. Les micro-organismes utilisent des nutriments qui entraînent des changements dans l'orientation structurale des polymères. Les organismes marins tels que *Pseudomonas*, *Alcanivorax* et *Tenacibaculum* ont le potentiel de dégrader le PCL qui est un polyester biodégradable et ces organismes sont isolés des sédiments marins profonds (**Sekiguchi et al., 2011**).

Il a été découvert que le *consortium* de *Vibrio alginolyticus* et *Vibrio parahaemolyticus* avoir la capacité de dégrader le PVA-LLDPE (**Raghul et al., 2014**). Les plastiques sont enfouis dans le milieu marin et mettent longtemps à se dégrader. Les enzymes microbiennes sont sécrétées après la fixation des microbes avec le polymère et ces enzymes induisent la dégradation de la structure polymère par hydrolyse (**Ho et al., 2017**).

Il a été suggéré que la biodégradation des polymères se produit par l'action enzymatique des hydrolases, telles que les uréases, les protéases et les estérases. La dégradation environnementale des polymères synthétiques commence par l'hydrolyse abiotique (**Asher, 2016**).

Tableau 3: Liste des souches microbiennes dégradant le plastique de l'écosystème marin (Ganesh Kumar et al., 2019).

Plastique	Micro-organismes	La source	Les références
PEHD	<i>Aspergillus</i> <i>Brevibacillusborstelensis</i> <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Arthrobactersp.</i>	Habitats côtiers marins Eaux et sédiments marins Écosystème marin	Devi et al., 2015 Mohanrasu et al., 2018 Balasubramanian et al., 2010
PEBD	<i>Kocuriapalustris</i> , <i>Bacillus pumilus</i> et <i>Bacillus subtilis</i> . <i>Vibrio alginolyticus</i> et <i>Vibrio parahaemolyticus</i>	Eaux pélagiques Zones benthiques	Harshavardhan et Jha, 2013 Raghul et al., 2014
LLDPE	<i>Lysinibacillus</i> et <i>Salinibacterium</i>	Eau de mer	Syranidou et al., 2017
Nylon	<i>Bacillus cereus</i> , <i>Bacillus sphericus</i> , <i>Vibrio furnisii</i> et <i>Brevundimonas vesicularis</i>	Eau de mer	Sudhakar et al., 2007
PCL	<i>Pseudomonas</i> , <i>Alcanivorax</i> et <i>Tenacibaculum</i> <i>Pseudomonas</i> sp., <i>Clonostachysrosea</i> , <i>Trichoderma</i> sp. et <i>Rhodococcus</i> sp.	Sédiments des profondeurs marines Sol arctique	Sekiguchi et al., 2011 Urbanek et al., 2017
PE	<i>Zalerionmaritimum</i>	Milieu marin	Paco et al., 2017
Polypropylène	<i>Bacillus</i> sp et <i>Rhodococcus</i> sp	Sédiment de mangrove	Auta et al., 2018
APV	<i>Thalassospirapovalitytica</i>	Milieu marin	Nogi et al., 2014
PVA-LLDPE	<i>Vibrio alginolyticus</i> et <i>Vibrio parahaemolyticus</i>	Zones benthiques	Raghul et al., 2014
PVC, LDPE et HDPE	<i>Bacillus</i> sp.	Eaux côtières	Kumari et al., 2019
LDPE et HDPE	<i>Bacillus sphericus</i> et <i>Bacillus cereus</i>	Eau de mer	Sudhakar et al., 2008
PE et PP	<i>P. palmate</i> et <i>A. esculenta</i> (<i>macroalgae</i>)	Zones benthiques	Welden et Cowie, 2017
PET	<i>Muricauda</i> sp. et <i>Thalassospira</i> sp.	Eau de mer	Debroas et al., 2017

IV.4. Voies métaboliques de biodégradation des polymères

Il existe actuellement plus de 5 300 qualités de polymères synthétiques pour plastiques dans le commerce (Wagner et Lambert, 2018). Ils sont généralement produits avec une gamme d'additifs chimiques tels que des plastifiants, des retardateurs de flamme, des antioxydants et d'autres stabilisants, pro-oxydants, tensioactifs, charges inorganiques ou pigments (Wagner et Lambert, 2018). Leurs propriétés physico-chimiques hétérogènes

entraîneront probablement des voies métaboliques de biodégradation très hétérogènes, en particulier si l'on considère grande variété de micro-organismes qui peuvent interagir pour la dégradation d'un seul morceau de plastique, ainsi que les facteurs environnementaux de conditions océaniques très dynamiques (Jacquin *et al.*, 2018).

IV.5. Voie métabolique de la biodégradation du polyéthylène (PE)

Le polyéthylène est dérivé de sources pétrolières et sa grande utilisation dans notre vie quotidienne en a fait le premier déchet plastique trouvé à la surface de la mer. Le PE est considéré comme difficiles à biodégrader car les longues chaînes de carbones et d'hydrogènes sont très stables et contiennent des charges très équilibrées. Les micro-organismes ont généralement besoin d'un déséquilibre de la charge électrique pour effectuer la biodégradation. Pour déstabiliser la charge électrique locale, les bactéries utilisent des oxygénases : des enzymes capables d'ajouter de l'oxygène à une longue chaîne carbonée (Krueger *et al.*, 2015).

L'oxydation peut également être traitée par des réactions abiotiques associées au rayonnement UV ou à la température (Singh et Sharma, 2008). L'oxydation et la fragmentation du PE rendent le polymère plus hydrophile et facilitent l'accès à d'autres enzymes extracellulaires, comme les lipases et les estérases (Geweret *et al.*, 2015).

La β -oxydation transforme les molécules carboxyliques oxydées (ayant un nombre pair d'atomes de carbone) en acétyl coA ou propionyl coA (si nombre impair de carbones). La carboxylation du propionyl coA en succinyl coA est réalisée par la propionyl-coA carboxylase (Graveuil *et al.*, 2017).

L'acétyl coA et le succinyl coA entrent dans le cycle de l'acide tricarboxylique (TCA). Ce cycle produit de l'énergie chimique utilisé dans la chaîne respiratoire pour produire de l'ATP, nécessaire à la création d'une nouvelle biomasse microbienne via des processus de réplication. Il produit également du CO₂ et du H₂O qui signent la minéralisation complète du PE (Jacquin *et al.*, 2018).

IV.6. Evaluation de la biodégradation du plastique

Le processus de dégradation conduira inévitablement au raccourcissement des chaînes polymères, de sorte que les informations sur la masse molaire seraient la manière la plus détaillée d'évaluer la dégradation d'un matériau. Une technique relativement robuste est la

GPC en comparant les masses molaires apparentes et les distributions de l'échantillon d'origine avec les échantillons après un certain temps de dégradation. Lors d'une analyse spécifique, le mécanisme de dégradation doit être pris en compte : pour un échantillon d'érosion de surface, tel que PCL et PHA, les données GPC de l'échantillon résiduel ne détecteront que de petits changements de la masse molaire car la majeure partie de l'échantillon reste intacte. Cependant, cette méthode ne permet pas de distinguer efficacement le processus d'hydrolyse abiotique du processus de biodégradation (**Wang et al., 2020**).

La preuve la plus directe d'un processus de biodégradation est la libération observée de dioxyde de carbone, le produit de dégradation. Ce processus est généralement effectué dans des conditions aérobies, il peut donc également être indirectement caractérisé par la consommation d'oxygène (demande biochimique en oxygène) des micro-organismes. Un test similaire de biodégradabilité du polymère dans le compost et/ou le sol est décrit dans la norme ISO14855-1-2012 et également dans la norme OCDE 306. La méthode de test est réalisée dans des conditions de laboratoire contrôlées. L'échantillon est broyé et ajouté au conteneur de compost sous 58 ° C, avec de la cellulose comme référence. Pendant le test, le dioxyde de carbone généré par le récipient de test et le récipient vierge est surveillé en continu, et la quantité cumulée de dioxyde de carbone générée est enregistrée. Le pourcentage de biodégradation du matériau d'essai est le rapport de la quantité de CO₂ produite dans le test à la quantité de dioxyde de carbone qui peut être théoriquement produite (**Wang et al., 2020**).

V. moyen d'élimination de la pollution plastique dans les océans

V.1. Ingénierie protéique des enzymes

La dégradation du polymère synthétique dépend d'un groupe distinct d'enzymes. Des études ont suscité un intérêt considérable pour l'amélioration de l'activité enzymatique grâce à l'ingénierie des protéines. Une hydrolase bactérienne modifiée a montré une activité supérieure dans l'hydrolyse des films et des fibres de PET par rapport à l'enzyme de type sauvage (**Wei et al., 2016**).

V. 2. Plastiques biodégradables

L'utilisation de plastiques biodégradables pour des applications spécifiques afin d'établir une communauté durable est une notion fructueuse en présence de stratégies appropriées de gestion des déchets et de contrôle des déchets (**Iwata, 2015**).

Le PET, un polymère fossile non biodégradable, est utilisé dans le monde entier dans les produits en plastique et son accumulation dans l'environnement a attiré l'attention du monde entier. Récemment, une nouvelle souche bactérienne, *Ideonellasakaiensis 201F6*, a été isolé et reconnu capable de dégrader le PET en l'utilisant comme source d'énergie et de carbone **(Temoor et al., 2018)**.

L'utilisation de ces matériaux devrait être ciblée à l'avenir, en particulier pour la fabrication d'articles d'emballage, l'emballage de produits alimentaires, et articles médicaux jetables. Il est également avantageux d'utiliser des plastiques biodégradables dans l'environnement comme films agricoles, matériel de pêche (filets de pêche), matériaux bio-absorbables en thérapeutique, cadres chirurgicaux et produits stériles **(Temoor et al., 2018)**.

De plus, les plastiques biodégradables doivent être appliqués là où la diffusion dans l'environnement est imminente ou lorsqu'il est difficile de trier les déchets **(Temoor et al., 2018)**.

V.3. Mélanges dégradables à l'eau de mer contenant des promoteurs de dégradation

Pour augmenter les taux de dégradation dans l'eau marine, l'ajout de charges facilement biodégradables peut aider à accélérer la dégradation de la matrice polymère. Cette stratégie a été largement appliquée et étudiée lorsque certains produits doivent donner un certain degré de biodégradabilité dans le sol ou le compost **(Guzman et al., 2011)**.

Amidon et cellulose (ou dérivés) ont été utilisés dans cette approche, car ils sont bon marché, largement disponibles, présentent une bonne compatibilité et peuvent être facilement dégradés par les levures, les champignons et diverses bactéries **(Wang et al., 2020)**.

Bien que la dégradation dans l'eau de mer de certains mélanges amidon-polyester ait augmenté par rapport aux polyesters purs, les taux de dégradation globaux sont encore beaucoup plus lents par rapport à la dégradation dans le sol et le compost **(Wang et al., 2020)**.

VI. Potentiel de biodégradation d'une biodiversité jusqu'ici inexplorée

Sur la base de la littérature publiée, nous estimons qu'il existe de bonnes chances d'identifier de nouveaux dégradeurs de plastiques conventionnels parmi la biodiversité jusqu'à présent inexplorée, en particulier pour les polymères hydrolysables. La plupart des polymères naturels (avec les macromolécules récalcitrantes dérivées de la lignine et de la lignocellulose telles que les substances humiques/fulviques et les charbons comme seules exceptions notables) sont sensibles à l'hydrolyse, ce qui fait de cette voie de dégradation un processus omniprésent. Par conséquent, il est hautement probable que certaines des enzymes responsables de la dégradation des polymères naturels présentent également une activité contre les polymères synthétiques hydrolysables (**Krueger et al., 2015**). **Russel et al., (2011)** ont démontré ces champignons endophytes dégradant le PUR de manière impressionnante dans la forêt équatorienne, capables d'utiliser le PUR comme seule source de carbone lorsqu'ils sont cultivés en anaérobiose.

De plus, les organismes et enzymes connus capables de dégrader le nylon, le PET et le PUR proviennent de divers environnements comme les usines, les sols et le compost (**Chen et al., 2010 ; Crabe et al., 1994 ; Négoro, 2000**), il est donc fort probable que des dégradeurs plus intéressants et plus efficaces puissent être isolés d'environnements jusqu'ici inexplorés.

Contrairement aux plastiques hydrolysables, nous estimons que les chances d'isoler des dégradeurs prometteurs de plastiques hydrocarbonés à partir de nouvelles sources sont plus faibles. Bien que des environnements hébergeant de tels organismes existent, comme **Yang et al., (2014)** ont démontré l'isolement des dégradeurs de PE des tripes de vers à cire, il reste un fait que des obstacles considérables doivent être surmontés pour une dégradation efficace des plastiques non hydrolysables. De tels organismes doivent exposer leurs enzymes extracellulaires directement aux plastiques extrêmement hydrophobes (**Krueger et al., 2015**).

Bien que ce polymère soit soluble dans l'eau et donc biodisponible, les champignons de la pourriture blanche se sont révélés incapables de provoquer une dépolymérisation substantielle malgré la présence d'un éventail considérable d'enzymes oxydatives extracellulaires. D'autres publications sur la dégradation des plastiques par les enzymes de la pourriture blanche ont signalé un certain degré de dégradation, généralement déterminé par les propriétés mécaniques ou la réduction du poids moléculaire du polymère, mais aucune

d'entre elles n'a pu signaler une dégradation suffisante pour se manifester par une perte de poids (Fujisawa *et al.*, 2001 ; Iiyoshi *et al.*, 1998).

Il semble probable que les effets de dégradation observés aient été causés par des défauts internes des polymères qui ont permis aux enzymes d'attaquer ces points faibles. Compte tenu du manque de rapports sur la biodégradation substantielle des plastiques à base d'hydrocarbure, en particulier le PP, le PS et le PVC, les chances de trouver des dégradeurs très efficaces pour ces polymères semblent plutôt faibles (Krueger *et al.*, 2015).

Conclusion

La demande et l'utilisation de plastiques est un processus en constante augmentation. Ce processus doit être corrélé positivement avec la gestion des déchets et le contrôle des détritiques, ainsi qu'avec l'utilisation de matériaux biodégradables d'origine biologique et fossile dans certaines applications pour une sécurité environnementale durable (**Chiba et al., 2018**).

La biodégradabilité est un terme largement utilisé à mauvais escient qui a été déformé visant généralement à donner à un produit spécifique une valeur ajoutée « verte » qui, dans de nombreux cas, n'est pas exacte. En effet, la décomposition dans des conditions naturelles peut présenter des échelles de temps différentes selon les variables environnementales spécifiques (**Albertsson et Hakkarainen, 2017**).

La sensibilisation scientifique et publique au plastique en tant que menace mondiale augmente. De nombreuses actions visent à lutter contre l'accumulation de plastique en encourageant la participation active des consommateurs, des producteurs, de l'industrie et des entreprises (**Löhr et al., 2017**).

Cependant, Différentes communautés microbiennes ont un grand potentiel pour convertir biologiquement certains polymères plastiques en produits plus simples par des mécanismes aérobies et anaérobies. De plus, la part des matériaux biodégradables dans certaines applications industrielles doit être améliorée, suivie du développement d'installations de dégradation industrielle optimisées et de stratégies de contrôle des déchets afin d'assurer la sécurité et la durabilité de l'environnement.

L'utilisation des microorganismes a été approuvée par notre synthèse d'articles. Donc une meilleure connaissance de la plastisphère est nécessaire pour comprendre le rôle des microorganismes dans ce processus.

Alors que réduire, réutiliser et recycler sont les principales stratégies qui aideront pour lutter contre les quantités croissantes de déchets plastiques dans l'environnement naturel. Une dégradation programmée dans les océans pourrait être souhaitable, ces matériaux doivent présenter une stabilité élevée lors de leur utilisation mais une dégradation rapide une fois qu'ils pénètrent dans l'environnement marin pour empêcher la formation de microplastiques.

Enfin, Le criblage d'organismes qui dégradent les polymères, ou produisent des enzymes ou des systèmes enzymatiques qui dégradent les polymères, peut s'avérer aussi rentable pour l'environnement.

A la fin la meilleure solution et de minimiser l'utilisation quotidienne de plastique et la remplacer avec le métal, le verre ou le boit quand c'est possible.

Références Bibliographiques

- **Abou-Zeid D-M, Müller R-J, Deckwer W-D** (2001) Degradation of natural and synthetic polyesters under anaerobic conditions. *J Biotechnol* 86:113–126.
- **Ahmed T. Shahid M. Azeem F, Rasul I. Shah AA. Noman M. Hameed A. Manzoor N. Manzoor I. Muhammad S** (2018) Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety, *Environmental Science and Pollution Research* 25:7287–7298 <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1234-9>.
- **Albertsson, A.-C., Hakkarainen, M.,** 2017. Designed to degrade. *Science* 358, 872–873. <https://doi.org/10.1126/science.aap8115>.
- **Anderson JM, Shive MS** (2012) Biodegradation and biocompatibility of PLA and PLGA microspheres. *Adv Drug Deliv Rev* 64:72–82. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.004>.
- **Andrady, A.L.,** 2003. *Plastics and The Environment*. John Wiley and Sons, West Sussex, England.
- **Artham T, Doble M** (2008) Biodegradation of aliphatic and aromatic polycarbonates. *Macromol Biosci* 8(1):14–24. <https://doi.org/10.1002/mabi.200700106>.
- **Ashter, S.A.,** 2016. *Introduction to Bioplastics Engineering*. Elsevier, pp. 19–30.
- **Auras R, Harte B, Selke S** (2004) An overview of polylactides as packaging materials. *Macromol Biosci* 4(9) :835–864. <https://doi.org/10.1002/mabi.200400043>.
- **Azzarello, M.Y., Van Vleet, E.S.,** 1987. Marine birds and plastic pollution. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 37, 230–295.
- **Bakir A, Rowland SJ, Thompson RC** (2014) Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastic under simulated physiological conditions. *Environ Pollut* 185 :16–23
- **Barnes, D.K.A., Galgani, F., Thompson, R.C., Barlaz, M.,** 2009. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos. Trans. R. Soc. B* 364, 1985–1998.
- **Beltrán-Sanahuja, A., Casado-Coy, N., Simó-Cabrera, L., Sanz-Lázaro, C.,** 2020. Monitoring polymer degradation under different conditions in the marine environment. *Environ. Pollut.* 259, 113836 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113836>.
- **Bergmann M, Klages M** (2012) Increase of litter at the Arctic deep-sea observatory HAUSGARTEN. *Mar Pollut Bull* 64(12):2734–2741 *Biotechnol.* 102, 7669–7678.

- **Boyandin AN, Prudnikova SV, Karpov VA, Ivonin VN, Đỗ NL, Nguyễn TH, Lê TMH, Filichev NL, Levin AL, Filipenko ML, Volova TG, Gitelson II** (2013) Microbial degradation of polyhydroxyalkanoates in tropical soils. *Int Biodeterior Biodegrad* 83:77–84. [https://doi.org/ 10.1016/j.ibiod.2013.04.014](https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.04.014).
- **Braun D, Bazdadea E. In: Nass LI, Heiberger CA,**1986, editors. *Encyclopaedia of PVC*, 2nd Ed., vol. 1. New York: Marcel Dekker.
- **Browne, M.A., Galloway, T., Thompson, R.,** 2008. Microplastic—an emerging contaminant of potential concern ? *Integr. Environ. Assess. Manag.* 3, 559–561.
- **Bryant JA, Clemente TM, Viviani DA, Fong AA, Thomas KA, Kemp P, Karl DM, White AE, DeLong EF** (2016) Diversity and activity of communities inhabiting plastic debris in the North Pacific Gyre. *mSystems* 1(3): e00024–e00016
- **Caruso G** (2015) Plastic degrading microorganisms as a tool for bioremediation of plastic contamination in aquatic environments. *J Pollut Eff Cont* 3: e112. <https://doi.org/10.4172/2375-4397.1000e112>.
- **Chattopadhyay SK, Singh S, Pramanik N, Niyogi U, Khandal R, Uppaluri R, Ghoshal AK** (2011) Biodegradability studies on natural fibers rein forced polypropylene composites. *J Appl Polym Sci* 121(4):2226–2232. <https://doi.org/10.1002/app.33828>.
- **Chen GQ** (2010) Introduction of bacterial plastics PHA, PLA, PBS, PE, PTT, and PPP. In: *Plastics from bacteria*. Springer, pp 1–16. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03287-5_1.
- **Chen GQ, Patel MK** (2011) Plastics derived from biological sources: present and future: a technical and environmental review. *Chem Rev* 112:2082–2099.
- **Chen S, Su LQ, Billig S, Zimmermann W, Chen J, Wu J** (2010) Biochemical characterization of the cutinases from *Thermobifidafusca*. *J Mol Catal B Enzym* 63 :121–127.
- **Chiba, S., Saito, H., Fletcher, R., Yogi, T., Kayo, M., Miyagi, S., Ogido, M., Fujikura, K.,** 2018. Human footprint in the abyss: 30-year records of deep-sea plastic debris. *Mar. Policy* 96, 204–212. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.03.022>.
- **Chua EM, Shimeta J, Nugegoda D, Morrison PD, Clarke BO** (2014) Assimilation of polybrominated diphenyl ethers from microplastics by the marine amphipod, *Allorchestes compressa*. *Environ Sci Technol* 48 :8127–8134

- **Cole M, Lindeque PK, Fileman E, Clark J, Lewis C, Halsband C, Galloway TS** (2016) Microplastics alter the properties and sinking rates of zooplankton faecal pellets. *Environ Sci Technol* 50:3239–3246 contaminants? *Handb. Environ. Chem.* 58.
- **Cozar A, Echevarria F, Gonzalez-Gordillo JI, Irigoien X, Ubeda B, Hernandez-Leon S, Palma AT, Navarro S, Garcia-de-Lomas J, Ruiz A, Fernandez-de-Puelles ML, Duarte CM** (2014) Plastic debris in the open ocean. *Proc Natl Acad Sci U S A* 111 :10239–10210244
- **Crabbe JR, Campbell JR, Thompson L, Walz SL, Schultz WW** (1994) Biodegradation of a colloid alester-based polyurethane by soil fungi. *Int Biodeterior Biodegrad* 33 :103–113.
- **Cunsolo, S., Schwarz, A., Levivier, A., Noble, K., Debeljak, P., Maral, H., Schoeneich Argent, R., Brambini, R., Reisser, J.,** 2018. Evidence that the great pacific garbage patch is rapidly accumulating plastic. *Sci. Rep.* 8,1–15.
- **Debroas, D., Mone, A., and Ter Halle, A.** (2017). Plastics in the North Atlantic garbage patch: a boat- microbe for hitchhikers and plastic degraders. *Sci. Total Environ.* 599, 1222–1232. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.059.
- **Derraik JGB** (2002) The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Mar Pollut Bull* 44 :842–852
- **Dussud, C., and Ghiglione, J.-F.** (2014). “Bacterial degradation of synthetic plastics,” in *Marine litter in the Mediterranean and Black Seas*, ed. F. Briand (CIESM Publisher), 180.
- **Dussud, C., Hudec, C., George, M., Fabre, P., Higgs, P., Bruzard, S., et al.,** (2018a). Colonization of Non-biodegradable and Biodegradable plastics by marine microorganisms. *Front. Microbiol.* 9, 1571.
- **Emadian, S.M., Onay, T.T., Demirel, B.,** 2017. Biodegradation of bioplastics in natural environments. *Waste Manag.* 59, 526–536. <https://doi.org/10.1016/j.Wasman.2016.10.006>.
- **Eriksen M, Lebreton LC, Carson HS, Thiel M, Moore CJ, Borerro JC, Galgani F, Ryan PG, Reisser J** (2014) Plastic pollution in the world’s oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLoS One* 9: e111913. doi: 10.1371/journal.pone. 0111913.

- **Erni-Cassola, G., Zadjelovic, V., Gibson, M.I., Christie-Oleza, J.A., 2019.** Distribution of plastic polymer types in the marine environment; A meta-analysis. *J. Hazard. Mater.* 369, 691–698. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.067>.
- **Flieger M, Kantorova M, Prell A, Řezanka T, Votruba J (2003)** Biodegradable plastics from renewable sources. *Folia Microbiol* 48(1):27–44. <https://doi.org/10.1007/BF02931273>.
- **Fricke A.H, Thum A. B, 1975.** *Trans. R. Soc. S. Afr*, 41, 351.
- **Fujisawa M, Hirai H, Nishida T (2001)** Degradation of polyethylene and nylon-66 by the laccase-mediator system. *J Polym Environ* 9 :103– 108.
- **Fukushima K, Abbate C, Tabuani D, Gennari M, Camino G (2009)** Biodegradation of poly (lactic acid) and its nanocomposites. *PolymDegrad Stab* 94(10):1646–1655. <https://doi.org/10.1016/j.polym.degradstab.2009.07.001>.
- **Galgani, F., Hanke, G., Maes, T., 2015.** Global Distribution, Composition and Abundance of Marine Litter. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Springer International Publishing, Cham, pp. 29–56. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3_2.
- **Ganesh Kumar A., Anjana K., Hinduja M., Sujitha K., Dharani G (2019).** Review on plastic wastes in marine environment – Biodegradation and biotechnological solutions. *Mar. Pollut. Bull.* 150, 110733. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110733>.
- **Gweret B, Plassmann MM, MacLeod M (2015)** Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environ Sci: Processes Impacts* 17:1513–1521
- **Gwert, B., Plassmann, M., Sandblom, O. & MacLeod, M. (2018).** Identification of chain scission products released to water by plastic exposed to ultraviolet light. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 5, 272–276.
- **Geyer R, Jambeck JR, Law KL (2017)** Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv* 3(7): e1700782.
- **Ghosh SK, Pal S, Ray S (2013)** Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environ Sci Pollut Res*20(7) :4339–4355. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1706-x>.

- **Giam, C.S., Chan, H.S., Neff, G.S., Atlas, E.L.,** 1978. Phthalate ester plasticizers: a new class of marine pollutant. *Science* 199, 419–420.
- **Goldberg ED** (1997) Plasticizing the sea floor: an overview. *Environ Technol* 18 :195–201
- **Goldstein N** (2005) Source separated MSW composting in the US. *Biocycle* 46:20.
- **Gravouil, K., Ferru-Clément, R., Colas, S., Helye, R., Kadri, L., Bourdeau, L., et al.,** (2017). Transcriptomics and lipidomics of the environment alstrain *Rhodococcus ruber* point out consumption pathways and potential metabolic bottlenecks for polyethylene degradation. *Environ. Sci. Technol.* 51, 5172–5181. doi: 10.1021/acs.est.7b00846. 614.
- **Gu JD.**2003. Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent search advances. *Int Biodeterior Biodegrad*; 52 :69–91.
- **Gugumus F. In: Pospisil J, Klemchuk PP,**1990, editors. Photooxidation of polymers and its inhibition. *Oxidation inhibition in organic materials* CRC press ; p. 29–162.
- **Guzman A.M., Janik H. Z., Mastalerz M., Kosakowska A. M.,** 2011, *Pol. J. Chem. Technol.*, 13, 57.
- **Hadad D, Geresh S, Sivan A** (2005) Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis*. *J Appl Microbiol* 98:1093–1100.
- **Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E. & Purnell, P.** (2018). An overview of chemical additives presents in plastics: migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *J. Haz. Mat.* 344, 179–199.
- **Halpern BS, Walbridge S, Selkoe KA, Kappel CV, Micheli F, D'Agrosa C, Bruno JF, Casey KS, Ebert C, Fox HE, Fujita R, Heinemann D, Lenihan HS, Madin EM, Perry MT, Selig ER, Spalding M, Steneck R, Watson R** (2008) A global map of human impact on marine ecosystems. *Science* 319(5865) :948–952.
- **Harrison, J. P., Sapp, M., Schratzberger, M., and Osborn, A. M.** (2011). Interactions between Microorganisms and marine microplastics: A Call for Research. *Mar. Technol. Soc. J.* 45, 12–20. doi :10.4031/MTSJ.45.2.2.
- **Henton DE, Gruber P, Lunt J, Randall J** (2005) Polylactic acid technology natural fibers, biopolymers, and biocomposites 16 :527–577.

- **Ho, Ba, Roberts, Tim, Lucas, Steven**, 2017. An overview on biodegradation of polystyrene and modified polystyrene : the microbial approach. *Cric. Rev. Biotech.* 38,1–13.
- **Hoang K-C, Tseng M, Shu W-J** (2007) Degradation of polyethylene succinate (PES) by a new thermophilic *Microbispora* strain. *Biodegradation* 18(3):333–342. <https://doi.org/10.1007/s10532006-9067-5>.
- **Hoshino A, Tsuji M, Ito M, Momochi M, Mizutani A, Takakuwa K, Higo S, Sawada H, Uematsu S** (2003) Study of the aerobic biodegradability of plastic materials under controlled compost. In: Chielline E, Solaro R (eds) *Biodegradable polymers and plastics*, Springer, pp 47–54.
- **Iiyoshi Y, Tsutsumi Y, Nishida T** (1998) Polyethylene degradation by lignin-degrading fungi and manganese peroxidase. *J Wood Sci* 44: 222–229.
- **Ikada Y, Tsuji H** (2000) Biodegradable polyesters for medical and ecological applications. *Macromol Rapid Commun* 21(3):117–132. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3927\(20000201\)21:3<117: AID-MARC117>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3927(20000201)21:3<117: AID-MARC117>3.0.CO;2-X).
- **International Pacific Research Center**, 2008. Tracking ocean debris. *IPRC Climate*, 8, 14–16. Available from: <http://iprc.soest.hawaii.edu/newsletters/iprc_climate_vol8_no2.pdf>.
- **İpekoglu, B., Böke, H., and Çizer, Ö.** (2007). Assessment of material use in relation to climate in historical buildings. *Build. Environ.* 42, 970–978.
- **Iwata T** (2015) Biodegradable and bio-based polymers: future prospects of eco-friendly plastics. *Angew Chem Int Ed* 54(11) :3210–3215. <https://doi.org/10.1002/anie.201410770>.
- **Jacquin J, Cheng J, Odobel C, Conan P, Pujo-pay M, Meistertzheim A and Jean-francois G** (2018) Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the ‘plastisphere’. *Front. Microbiol.* 10 :865. doi :10.3389/fmicb.2019.00865.
- **Jambeck JR, Geyer R, Wilcox C, Siegler TR, Perryman M, Andrady A, Narayan R, Law KL** (2015) Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science* 347 :768–771.
- **Jayasekara R, Harding I, Bowater I, Lonergan G** (2005) Biodegradability of a selected range of polymers and polymer blends and standard methods for assessment

of biodegradation. *J Polym Environ* 13(3): 231–251. <https://doi.org/10.1007/s10924-005-4758-2>.

- **Joel, F.R.**,1995, *Polymer Science & Technology: Introduction to polymer science*, Eds. 3, Pub: Prentice Hall PTR Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458; p: 4–9.
- **Kale G, Kijchavengkul T, Auras R, Rubino M, Selke SE, Singh SP** (2007) Compostability of bioplastic packaging materials: an overview. *Macromol Biosci* 7(3) :255–277. <https://doi.org/10.1002/mabi.200600168>.
- **Karakus K** (2016) Polycaprolactone (PCL) based polymer composites filled wheat straw flour. *KastamonuUniv J For Fac* 16(1):264–268.
- **Karlsson, T. M., Hassellöv, M. &Jakubowicz, I.** (2018). Influence of thermooxidative degradation on the in-situ fate of polyethylene in temperatecoastal waters. *Mar. Pollut. Bull.* 135, 187–194.
- **Kashiwada, S.**, 2006. Distribution of nanoparticles in the see-through Medaka (*Oryziaslatipes*). *Environ. Health Persp.*114 (11), 1697–1702.
- **Kasirajan S, Ngouajio M** (2012) Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. *Agron Sustain Dev* 32:501–529.
- **Kasuya K, Takagi K, Ishiwatari S, Yoshida Y.**1998 *Doi, Polym.Degrad. Stab.*, 59, 327.
- **Kawai F, Watanabe M, Shibata M, Yokoyama S, Sudate Y** (2002) Experimental analysis and numerical simulation for biodegradability of polyethylene. *Polym Degrad Stab* 76(1) :129–135. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(02\)00006-X](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(02)00006-X).
- **Kawai F, Watanabe M, Shibata M, Yokoyama S, Sudate Y, Hayashi S** (2004) Comparative study on biodegradability of polyethylene wax by bacteria and fungi. *Polym Degrad Stab* 86(1):105–114. https://doi.org/10.1016/j.polym_degrade_stab.2004.03.015.
- **Keswani, A., Oliver, D. M., Gutierrez, T., and Quilliam, R. S.** (2016). Microbial hitchhikers on marine plastic debris: Human exposurerisks at bathing waters and beach environments. *Mar. Environ. Res.* 118, 10–19. [Doihttps://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.04.006](https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.04.006).
- **Kijchavengkul T, Auras R** (2008) Compostability of polymers. *Polym Int* 57(6) :793–804. <https://doi.org/10.1002/pi.2420>.

- **Kolvenbach BA, Helbling DE, Kohler HP, Corvini PF** (2014) Emerging chemicals and the evolution of biodegradation capacities and pathways in bacteria. *Curr Opin Biotechnol* 27 :8–14.
- **Krueger MC, Harms H, Schlosser D** (2015) Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics. *Appl Microbiol Biotechnol* 99(21):8857–8874. <https://doi.org/10.1007/s00253-0156879-4>.
- **Kwpp LR, Jewell WJ** (1992) Biodegradability of modified plastic films in controlled biological environments. *Environ Technol*; 26:193–8.
- **Kyrikou I, Briassoulis D** (2007) Biodegradation of agricultural plastic films: a critical review. *J Polym Environ* 15(2):125–150. <https://doi.org/10.1007/s10924-007-0053-8>.
- **L. Rittie, B. Perbal, J.** (2008) *Cell Commun. Signaling*, 2, 25.
- **Laist, D.W.**, 1987. Overview of the biological effects of lost and discarded plastic debris in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 18 (6B), 319–326.
- **Law KL, Moret-Ferguson SE, Goodwin DS, Zettler ER, Deforce E, Kukulka T, Proskurowski G** (2014) Distribution of surface plastic debris in the eastern Pacific Ocean from an 11-year dataset. *Environ Sci Technol* 48 :4732–4734738.
- **Law, K.L., Morét-Ferguson, S., Reddy, C.M., Peacock, E.E., Maximenko, N.A.**, 2010. A 22-year record of plastic marine debris in the Atlantic Ocean. *Eos Trans. AGU* 91 (26). *Ocean Sci. Meet. Suppl.*, Abstract # IT31C-02.
- **Laycock B, Nikolić M, Colwell J.M, Gauthier E, Halley P, Bottle S, George G**, (2017). *Prog. Polym. Sci.*, 71, 144.
- **Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., Hajbane, S., Li, W.C., Tse, H.F., Fok, L.**, 2016. Plastic waste in the marine environment: a review of sources, occurrence and effects. *Sci. Total Environ.* 566–567, 333–349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.084>.
- **Li, X., Zeng, Z., Chen, Y., Xu, Y.**, 2004. Determination of phthalate acid esters plasticizers in plastic by ultrasonic solvent extraction combined with solid phase micro extraction using calix [4] arene fiber. *Talanta* 63, 1013–1019.
- **Liu L, Li S, Garreau H, Vert M** (2000) Selective enzymatic degradations of poly (L-lactide) and poly (ϵ -caprolactone) blend films. *Biomacromolecules* 1(3):350–359. <https://doi.org/10.1021/bm000046k>.

- **Liu, L., Fokkink, R., Koelmans, A.A.,** 2016. Sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons to polystyrene nanoplastic. *Environ. Toxicol. Chem.* 35, 1650–1655.
 - **Lobelle, D., Cunliffe, M.,** 2011. Early microbial biofilm formation on marine plastic debris. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 197–200.
 - **Löhr A, Savelli H, Beunen R, Kalz M, Ragas A, Van Belleghem F** (2017) Solutions for global marine litter pollution. *Curr Opin Environ Sustain* 28 :90–99.
 - **Lu B, Wang G.-X, Huang D, Ren Z.-L, Wang X.-W, Zhen Z.-C, Zhang W, Ji J.-H,** *Polym. Degrad. Stab.* 2018, 150, 133.
 - **Marion, G. M. et al.,** (2011). pH of seawater. *Mar. Chem.* 126, 89 –96.
 - **Masaki K, Kamini NR, Ikeda H, Iefuji H** (2005) Cutinase-like enzyme from the yeast *Cryptococcus sp.* strain S-2 hydrolyzes polylactic acid and other biodegradable plastics. *Appl Environ Microbiol* 71(11) :7548–7550. <https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.7548-7550>. 2005.
 - **Masó, M., Garcés, E., Pagès, F., and Camp, J.** (2003). Drifting plastic debris as a potential vector for dispersing Harmful Algal Bloom (HAB) species. *Sci. Mar.* 67, 107–111.
 - **Mattsson, K., Hansson, L.-A., Cedervall, T.,** 2015. Nano-plastics in the aquatic environment. *Environ. Sci. Proces. and Impacts.*1–17.
 - **McCormick A, Hoellein TJ, Mason SA, Schlupe J, Kelly JJ** (2014) Microplastics an abundant and distinct microbial habitat in an urban river. *Environ Sci Technol* 48 :11863–11871.
 - **Min, K., Cuiffi, J.D., Mathers, R.T.,** 2020. Ranking environmental degradation trends of plastic marine debris based on physical properties and molecular structure. *Nat. Commun.* 11, 727. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14538-z>.
 - **Mir S, Asghar B, Khan AK, Rashid R, Shaikh AJ, Khan RA, Murtaza G** (2017) The effects of nanoclay on thermal, mechanical and rheological properties of LLDPE/chitosan blend. *J Polym Eng.* <https://doi.org/10.1515/polyeng-2015-0350>.
 - **Mohanty A, Misra M, Hinrichsen G** (2000) Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: an overview. *Macromol Mater Eng* 276:1–24.
- Mohee R, Unmar GD, Mudhoo A, and Khadoo P.** 2008. Biodegradability of biodegradable/degradable plastic material under aerobic and anaerobic conditions. *Waste Manag* 28 : 1624–9.

- **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. *Mar. Pollut. Bull.* 60, 1873–1878.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.020>.
- **Mueller RJ.**2006 Biological degradation of synthetic polyesters—enzymes as potential catalysts for polyester recycling. *Proc Biochem*; 41:2124–8.
- **Muhamad WNAW, Othman R, Shaharuddin RI, Irani MS** (2015) Microorganism as plastic biodegradation agent towards sustainable environment. *Adv Environ Biol* 9:8–14.
- **Nakayama.A, Yamano.N. Kawasaki. N.,**2019. *Polym. Degrad. Stab*, 166, 290.
- **Nanda S, Sahu S, Abraham J** (2010) Studies on the biodegradation of natural and synthetic polyethylene by *Pseudomonas spp.* *J Appl Sci Environ Manag* 14(2):57–60.
- **Negoro S** (2000) Biodegradation of nylon oligomers. *Appl Microbiol Biotechnol* 54 :461–466.
- **Oberbeckmann, S., Kreikemeyer, B., and Labrenz, M.** (2018). Environmental Factors Support the formation of specific bacterial assemblages on microplastics. *Front. Microbiol.* 8, 2709. Available at
[:https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2017.02709](https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmicb.2017.02709).
- **Olayan HB, Hamid HS, Owen ED.**1996. Photochemical and thermal crosslinking of polymers. *J Macromol Sci Rev Macromol Chem Phys*; 36 :671–719.
- **Orr IG, Hadar Y, Sivan A** (2004) Colonization, biofilm formation and biodegradation of polyethylene by a strain of *Rhodococcus ruber*. *Appl Microbiol Biotechnol* 65(1) :97–104. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1584-8>.
- **Owen ED.**1984 *Degradation and Stabilisation of PVC*. Barking: Elsevier Applied Science Publishers.
- **Pauli NC, Petermann JS, Lott C, Weber M** (2017) Macrofouling communities and the degradation of plastic bags in the sea: an in-situ experiment. *R Soc Open Sci* 4(10) :170549.
- **Pavia DL, Lampman GM, Kriz GS.**1988. *Introduction to Organic Laboratory Techniques*. 3rd Ed. Fort Worth, TX: Saunders.
- **Peng, X., Chen, M., Chen, S., Dasgupta, S., Xu, H., Ta, K., Du, M., Li, J., Guo, Z., Bai, S.,** 2018. Microplastics contaminate the deepest part of the world's ocean. *Geochem. Perspect. Lett.* 9, 1–5. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.1829>.

- **Philip S, Keshavarz T, Roy I** (2007) Polyhydroxyalkanoates: biodegradable polymers with a range of applications. *J Chem Technol Biotechnol* 82(3):233–247. <https://doi.org/10.1002/jctb.1667>.
- **Pichel, W.G., Churnside, J., Veenstra, T., Foley, D., Friedman, K., Brainard, R., Nicoll, J., Zheng, Q., Clemente-Colón, P.**, 2007. Marine debris collects with in the North Pacific subtropical convergence zone. *Mar. Pollut. Bull.* 54, 1207–1211.
- **Pickett, J. E. & Coyle, D. J.** (2013). Hydrolysis kinetics of condensation polymer under humidity aging conditions. *Polym. Degrad. Stabil.* 98, 1311–1320.
- **Pospisil J, Nespurek S.** 1997. Highlights in chemistry and physics of polymer stabilization. *Macromol Symp*; 115:143–63.
- **Premraj, B.J., Raja, S., Bhavesh, N.S., Shi, K., Hosur, R.V., Sundaralingam, M., Yathindra, N.**, 2004. Solution structure of 2', 5'd(G4C4). Relevance to topological restrictions and nature's choice of phosphodiester links. *Eur. J. Biochem.* 1 (14), 2956–2966.
- **Priyanka N, Archana T** (2012) Biodegradability of polythene and plastic by the help of microorganism: away for brighter future. *J Environ Anal Toxicol* 1 :12–15.
- **Rampelotto PH** (2014) Polar microbiology: recent advances and future perspective. *Biology* 3:81–84.
- **Rånby, B.** (1993). Basic reactions in the photodegradation of some important polymers. *J. Macromol. Sci., Part A* 30, 583–594.
- **Rånby, B.** (1989). Photodegradation and photo-oxidation of synthetic polymers. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 15, 237–247.
- **Reddy MM** (2008) Oxo-biodegradation of polyethylene. RMIT University, Melbourne.
- **Rivard C, Moens L, Roberts K, Brigham J, Kelley S.** 1995. Starch esters as biodegradable plastics: Effects of ester group chain length and degree of substitution on anaerobic biodegradation. *Enz Microbial Tech*; 17: 848–52.
- **Rodriguez E. J, Marcos B, Huneault M.A.**, 2016, *J. Appl. Polym. Sci.* 133.
- **Rummel CD, Jahnke A, Gorokhova E, Kühnel D, Schmitt-Jansen M** (2017) Impact of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment. *Environ Sci Technol Lett* 4(17):258–267.
- **Russell JR, Huang J, Anand P, Kucera K, Sandoval AG, Dantzler KW, Hickman D, Jee J, Kimovec FM, Koppstein D, Marks DH, Mittermiller PA, Nunez SJ,**

Santiago M, Townes MA, Vishnevetsky M, Williams NE, Vargas MPN,

Boulanger LA, Bascom-Slack C, Strobel SA (2011) Biodegradation of polyester polyurethane by endophytic fungi. *Appl Environ Microbiol* 77: 6076–6084.

- **Russell NJ** (1990) Cold adaptation of microorganisms. *Philos Trans R Soc Lond Ser B Biol Sci* 326:595–611.
- **Sabir, I.**, 2004. Plastic Industry in Pakistan. <http://www.jang.com.pk/thenews/investors/nov2004/index.html>.
- **Saminathan P, Sripriya A, Nalini K, Sivakumar T, Thangapandian V** (2014) Biodegradation of plastics by *Pseudomonas putida* isolated from garden soil samples. *J Adv Bot Zool* 1(3):34–38.
- **Sanchez JG, Tsuchii A, Tokiwa Y** (2000) Degradation of polycaprolactone at 50°C by a *thermotolerant Aspergillus sp.* *Biotechnol Lett* 22(10):849–853. <https://doi.org/10.1023/A:1005603112688>.
- **Sauders JH, Frisch KC.**1964. Chemistry and Technology, Part II, Technology. Polyurethanes. New York: Interscience Publishers.
- **Schut F, Devries E. J, Gottschal J. C, Robertson B. R, Harder W, Prins R. A, Button D. K,** 1993. *Appl. Environ. Microbiol.* 59, 2150.
- **Scott G.**1999. Polymers in modern life. Polymers and the Environment. Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry.
- **Sekiguchi. T., Saika. A, Nomura. K., Watanabe. T., Fujimoto.Y. Enoki.M. Sato.T., Kato.C. Kanehiro H.,** 2011. *Polym. Degrad. Stab.* 96, 1397.
- **Selim MS, Shenashen MA, El-Safty SA, Higazy SA, Selim MM, Isago H, Elmarakbi A** (2017) Recent progress in marine foul-release polymeric nano composite coatings. *Prog Mater Sci* 87:1–32.
- **Setala O, Fleming-Lehtinen V, Lehtiniemi M** (2014) Ingestion and transfer of microplastics in the planktonic food web. *Environ Pollut* 185: 77–83.
- **Seymour RB.**1989. Polymer science before & after 1899: notable developments during the life time of Maurtis Dekker. *J Macromol Sci Chem*; 26:1023–32.
- **Shah A A, Hasan F, Hameed A, Ahmed S** (2008) Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances* 26: 246–265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>.
- **Sharma S, Singh I, Viridi J** (2003) A potential *Aspergillus* species for biodegradation of polymeric materials. *Curr Sci* 84(11):1399–1402.

- **Shimao M** (2001) Biodegradation of plastics. *Curr Opin Biotechnol* 12(3):242–247. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(00\)00206-8](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(00)00206-8).
- **Shui-xia W, Anhui Agric J.** 2009. *Sci*, 28, 13710.
- **Singh, B., and Sharma, N.** (2008). Mechanistic implications of plastic degradation. *Polym. Degrad. Stab.* 93, 561–584. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2007.11.008.
- **Sivan A** (2011) New perspectives in plastic biodegradation. *Curr Opin Biotechnol* 22(3):422–426. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011>.
- **Song, Y.K., Hong, S.H., Jang, M., Han, G.M., Jung, S.W., Shim, W.J.,** 2017. Combined effects of UV exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type. *Environ. Sci. Technol.* 51 (8), 4368–4376.
- **Stevens's E** (2003) What makes green plastics green? *Biocycle* 44 :24–27.
- **Tekman MB, Gutow L, Macario A, Haas A, Walter A, Bergmann M** (2017) 1,510 species are affected by litter, Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research.
- **Ter Halle, A. et al.,** (2017). Nanoplastic in the North Atlantic Subtropical Gyre. *Environ. Sci. Technol.* 51, 13689–13697.
- **Ter Halle, A. et al.,** (2016). Understanding the fragmentation pattern of marine plastic debris. *Environ. Sci. Technol.* 50, 5668–5675.
- **Teuten, E.L., Saquing, J.M., Knappe, D.R.U., Barlaz, M.A., Jonsson, S., Björn, A., Rowland, S.J., Thompson, R.C., Galloway, T.S., Yamashita, R., Ochi, D., Watanuki, Y., Moore, C., Viet, P.H., Tana, T.S., Prudente, M., Boonyatumanond, R., Zakaria, M.P., Akkhavong, K., Ogata, Y., Hirai, H., Iwasa, S., Mizukawa, K., Hagino, Y., Imamura, A., Saha, M., Takada, H.,** 2009. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philos. Trans. R. Soc. B* 364, 2027– 2045.
- **Tezuka Y, Ishii N, Kasuya K-i, Mitomo H** (2004) Degradation of poly (ethylene succinate) by mesophilic bacteria. *Polym Degrad Stab* 84(1):115– 121. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2003.09.018>.
- **Thevenon F, Carroll C, Sousa J** (2014) Plastic debris in the ocean: the characterization of marine plastics and their environmental impacts, situation analysis report, Vol. IUCN. 52 pp. Gland, Switzerland.
- **Thompson R, Moore C, Andrady A, Gregory M, Takada H, Weisberg S** (2005) New directions in plastic debris. *Science* 310 :1117–1117.

- **Thompson RC, Olsen Y, Mitchell RP, Davis A, Rowland SJ, John AWG, McGonigle D, Russell AE** (2004) Lost at sea: where is all the plastic? *Science* 304 :838–838.
- **Tokiwa Y, Calabia BP, Ugwu CU, Aiba S** (2009) Biodegradability of plastics. *Int J Mol Sci* 10(9):3722–3742. <https://doi.org/10.3390/ijms10093722>.
- **Tokiwa Y, Calabia BP**.2004. Degradation of microbial polyesters. *Biotechnol Lett*; 26 :1181–9.
- **Tosin, M., Weber, M., Siotto, M., Lott, C., Degli-Innocenti, F.,** 2012. Laboratory test methods to determine the degradation of plastics in marine environmental conditions. *Front. Microbiol.* 3, 225. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00225>.
- **Tribedi P, Sil A** (2014) Cell surface hydrophobicity: a key component in the degradation of polyethylene succinate by *Pseudomonas sp.* AKS2. *J Appl Microbiol* 116(2):295–303. <https://doi.org/10.1111/jam.12375>.
- **Tsuchii A, Suzuki T, Takahara Y**.1977. Microbial degradation of styrene oligomer. *Agric Biol Chem*; 41:2417–21.
- **Urbanek AK, Rymowicz W, Mironczuk AM** (2018) Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats. *Applied Microbiology and Biotechnology* 102:7669-7678.
- **Urbanek, A.K., Rymowicz, W., Strzelecki, M.C., Kociuba, W., Franczak, L., Mironczuk, A.M.,** (2017). Isolation and characterization of Arctic microorganisms decomposing.
- **Van Cauwenberghe L, Vanreusel A, Mees J, Janssen CR** (2013) Microplastic pollution in deep-sea sediments. *Environ Pollut* 182 :495–499.
- **Van Sebille E, Spathi C, Gilbert A** (2016) The ocean plastic pollution challenge: towards solutions in the UK.
- **Veiga JM, Fleet D, Kinsey S, Nilsson P, Vlachogianni T, Werner S, Galgani F, Thompson RC, Dagevos J, Gago J, Sobral P, Cronin R** (2016) Identifying sources of marine litter. MSFD GES TG Marine Litter Thematic Report; JRC Technical Reports.
- **Vered, G., Kaplan, A., Avisar, D., Shenkar, N.,** 2019. Using solitary ascidians to assess microplastic and phthalate plasticizers pollution among marine biota : a case study of the Eastern Mediterranean and Red Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 138, 618–625.

- **Vert M, Santos ID, Ponsart S, Alauzet N, Morgat JL, Coudane J, Garreau H** (2002) Degradable polymers in a living environment: where do you end up? *Polym Int* 51(10):840–844. <https://doi.org/10.1002/pi.903>.
- **Viera JS.C, Marques MR.C, Nazareth MC, Jimenez PC, Sanz-L'azaroc C, Castro I.IB.**(2021) Are biodegradable plastics an environmental rip off? *Journal of Hazardous Materials* 416125957.
- **Vijaya C, Reddy RM** (2008) Impact of soil composting using municipal solid waste on biodegradation of plastics. *Indian J Biotechnol* 7: 235–239.
- **Von Moos, N., Burkhardt-Holm, P., Kohler, A.,** 2012. Uptake and effects of microplastic on cells and tissue of the blue mussel *Mytilus edulis* L. after an experimental exposure.
- **Wackett L, Hershberger C** (2001) Biodegradation and biocatalysis—microbial transformation of organic compounds. ASM Press, Washington, DC.
- **Wagner, M., Lambert, S., and Eds** (2018). Freshwater microplastics: emerging environmental.
- **Waller CL, Griffiths HJ, Waluda CM, Thorpe SE, Loaiza I, Moreno B, Pacherres CO, Hughes KA** (2017) Microplastics in the Antarctic marine system: an emerging area of research. *Sci Total Environ* 598:220–227.
- **Wang GX, Huang D, Ji JH, Völker C, Wurm FR** (2020) Seawater-Degradable Polymers—Fighting the Marine, Plastic Pollution. *Adv. Sci.*, 2001121.
- **Wei, R., Oeser, T., Schmidt, J., Meier, R., Barth, M., Then, J., Zimmermann, W.,** 2016. Engineered bacterial polyester hydrolase efficiently degrades polyethylene terephthalate due to relieved product inhibition. *Biotechnol. Bioeng.* 113, 1658–1665.
- **Welden, N. A. & Cowie, P. R.** (2017). Degradation of common polymer ropes in a sublittoral marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 118, 248–253.
- **Whitman. W. B, Coleman. D. C, Wiebe. W. J,** *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 1998, 95, 6578.
- **Wilkes RA, Aristilde L** (2017) Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas sp.*: capabilities and challenges. *J Appl Microbiol* 123(3) :582–593.
- **Woodall LC, Sanchez-Vidal A, Canals M, Paterson GLJ, Coppock R, Sleight V, Calafat A, Rogers AD, Narayanaswamy BE, Thompson RC** (2014) The deep-sea is a

major sink for microplastic debris. *R Soc Open Sci* 1 :140317. doi :10.1098/rsos.140317.

- **Wu C-S** (2005) A comparison of the structure, thermal properties, and biodegradability of polycaprolactone/chitosan and acrylic acid grafted polycaprolactone/chitosan. *Polym* 46(1):147–155. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.11.013>.
- **Yadav AN, Verma P, Kumar V, Sachan SG, Saxena AK** (2017) Extreme cold environments: a suitable niche for selection of novel psychrotrophic microbes for biotechnological applications. *AIBM*. <https://doi.org/10.19080/AIBM.2017.02.555584>.
- **Yamada-Onodera K, Mukumoto H, Katsuyaya Y, Saiganji A, Tani Y**.2001. Degradation of polyethylene by a fungus. *Penicillium simplicissimum* YK. *Poly Degrad Stab*; 72:323–7.
- **Yang J, Yang Y, Wu WM, Zhao J, Jiang L** (2014) Evidence of polyethylene biodegradation by bacterial strains from the guts of plastic eating waxworms. *Environ Sci Technol* 48:13776–13784.
- **Yoshida S, Hiraga K, Takehana T, Taniguchi I, Yamaji H, Maeda Y, Toyohara K, Miyamoto K, Kimura Y, Oda K** (2016) A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Sci* 351(6278):1196–1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>.
- **Zettler, E. R., Mincer, T. J., and Amaral-Zettler, L. A.** (2013). Life in the “Plastisphere”: Microbial communities on plastic marine debris. *Environ. Sci. Technol.* 47, 7137–7146. Doi : 10.1021/es401288x.

ملخص

البلاستيك هو مصطلح عام يستخدم لمجموعة واسعة من البوليمرات العضوية عالية الوزن الجزيئي التي يتم الحصول عليها بشكل رئيسي من المشتقات المختلفة للهيدروكربونات والبتترول. هناك اتجاه متزايد في إنتاج واستهلاك البلاستيك بسبب العديد من التطبيقات الصناعية والمنزلية.

توفر المحيطات موارد مهمة وقيمة مثل الغذاء والطاقة والمياه. هم أيضا عامل الاستقرار الرئيسي للمناخ. لذلك، يمكن أن يكون للتغيرات في النظام البيئي البحري الناتجة عن التأثيرات البشرية مثل التلوث البلاستيكي تأثير كبير على النطاق العالمي. تشكل البوليمرات حياة الإنسان، ولكن تم تحديدها أيضا على أنها ملوثات في المحيطات بسبب عمرها الطويل وقابليتها المنخفضة للتحلل. في الآونة الأخيرة، درس العديد من الباحثين تأثير اللدائن الدقيقة على الحياة البحرية والتنوع البيولوجي والسمية المحتملة.

ركزت الأدبيات المتزايدة على الحياة الميكروبية التي تتطور على سطح هذه الملوثات المسماة "الكرة الأرضية"، لكن المفاهيم العامة للسمية البيئية الميكروبية نادراً ما تم دمجها.

يمكن للمجتمعات الميكروبية المعرضة للمواقع الملوثة بالبلاستيك أن تتكيف وتشكل أغشية حيوية كثيفة على سطح البلاستيك وتنتج إنزيمات تحفيزية نشطة. قد تكون هذه الإنزيمات قادرة على تحلل البوليمرات الاصطناعية.

ومع ذلك، فقد ثبت أن معظم المواد البلاستيكية شيوغا شديدة المقاومة حتى في ظل الظروف المعروفة بتعزيز التحلل الميكروبي. المعرفة حول التدهور البيئي أكثر ندرة.

في ظل وجود استراتيجيات مناسبة لإدارة النفايات إلى جانب مرافق التحلل البيولوجي الخاضعة للرقابة الصناعية، فإن استخدام البلاستيك القابل للتحلل الحيوي لتطبيقات معينة مثل التعبئة والتغليف أو صناعة الرعاية الصحية يعد خياراً واعداً وجذاباً للفوائد الاقتصادية والبيئية والصحية.

الكلمات المفتاحية: البلاستيك، التلوث، النظم البيئية، البيوع، البلاستيك الدقيق، التحلل البيولوجي، محيط

Résumé

Le plastique est un terme général utilisé pour une large gamme de polymères organiques de haut poids moléculaire obtenus principalement à partir des divers dérivés d'hydrocarbures et de pétrole. Il y a une tendance croissante à la production et à la consommation de plastiques en raison de leurs nombreuses applications industrielles et domestiques.

Les océans fournissent des ressources importantes et précieuses telles que la nourriture, l'énergie et l'eau. Ils sont aussi le principal stabilisateur du climat. Par conséquent, les changements dans l'écosystème marin causés par des influences anthropiques telles que la pollution plastique peuvent avoir un impact dramatique à l'échelle mondiale. Les polymères façonnent la vie humaine, mais ils ont également été identifiés comme des polluants dans les océans en raison de leur longue durée de vie et de leur faible dégradabilité. Récemment, divers chercheurs ont étudié l'impact des microplastiques sur la vie marine, la biodiversité et la toxicité potentielle.

Une littérature croissante s'est intéressée à la vie microbienne se développant à la surface de ces polluants appelés la « plastisphère », mais les concepts généraux d'écotoxicologie microbienne n'ont que rarement été intégrés.

Les communautés microbiennes exposées à des sites contaminés par du plastique peuvent s'adapter et former des biofilms denses sur la surface du plastique et produire des enzymes catalytiques actives. Ces enzymes peuvent dégrader les polymères synthétiques.

Cependant, la plupart des plastiques courants se sont avérés hautement récalcitrants même dans des conditions connues pour favoriser la dégradation microbienne. Les connaissances sur la dégradation de l'environnement sont encore plus rares.

En présence de stratégies de gestion des déchets appropriées couplées à des installations de biodégradation contrôlées industriellement, l'utilisation de plastiques biodégradables pour certaines applications telles que l'emballage ou l'industrie de la santé est une option prometteuse et attrayante pour les avantages économiques, environnementaux et sanitaires.

Mots clés : plastique, pollution, les écosystèmes, environnement, microplastique, biodégradation, océan

Abstract

Plastic is a general term used for a wide range of high molecular weight organic polymers obtained mainly from the various derivatives of hydrocarbons and petroleum. There is a growing trend in the production and consumption of plastics due to their many industrial and domestic applications.

The oceans provide important and valuable resources such as food, energy and water. They are also the main stabilizer of the climate. Therefore, changes in the marine ecosystem caused by anthropogenic influences such as plastic pollution can have a dramatic impact on a global scale. Polymers shape human life, but they have also been identified as pollutants in the oceans due to their long lifespan and low degradability. Recently, various researchers have studied the impact of microplastics on marine life, biodiversity, and potential toxicity.

A growing literature has focused on the microbial life developing on the surface of these pollutants called the "plastisphere", but the general concepts of microbial ecotoxicology have only rarely been integrated.

Microbial communities exposed to plastic-contaminated sites can adapt and form dense biofilms on the plastic surface and produce active catalytic enzymes. These enzymes may be able to degrade synthetic polymers.

However, most common plastics have proven to be highly recalcitrant even under conditions known to promote microbial degradation. Knowledge about environmental degradation is even rarer.

In the presence of appropriate waste management strategies coupled with industrially controlled biodegradation facilities, the use of biodegradable plastics for certain applications such as packaging or the healthcare industry is a promising and attractive option for economic benefits, environmental and health.

Keywords: plastic, pollution, ecosystems, environment, microplastic, biodegradation, ocean