

République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أبو بكر بلقايد- تلمسان
Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEN
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

Sekkal Mourad & Mohammedi Noura

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Microbiologie et contrôle de qualité

Thème

Biodégradation du plastique par les microorganismes des eaux marines

Soutenu le 15/06/2022 devant le jury composé de :

Président	M ^{elle} Bouali Wafaa	MCA	UniversitéTlemcen
Encadrant	M ^{me} Brahim Kholkhal Wahiba	MCB	UniversitéTlemcen
Examineur	M ^{elle} Djaziri Fatéma	MCB	UniversitéTlemcen

Année universitaire 2021/2022

Remerciement

Dans un premier temps, on remercie le bon dieu qui nous a aidés à terminer ce travail.

Je tiens à remercier en premier lieu, notre encadrant de mémoire Mme Brahimi Kholkhal Wahiba (Maitre de conférence B) auprès de qui, on a énormément appris, on vous remercie pour votre disponibilité, vos conseils avisés, vos encouragements intarissables. On a pu apprécier tout au long de mon parcours universitaire leur patience inébranlable avec nous.

Ce travail est un des résultats de vos encouragements. Merci Madame, vous nous avez aidés à trouver et démêler un fil conducteur.

On tient à remercier M^{elle} Bouali Waffa (Maitre de conférence A) de l'Université de Tlemcen d'avoir accepté de présider notre jury. C'est vraiment un honneur pour nous de le compter parmi les membres de notre jury.

Nos sincères remerciements vont également à M^{elle} Djaziri Fatéma (Maitre de conférence B) d'avoir accepté de juger ce travail.

Les derniers remerciements et non les moindres vont à notre entourage, famille et amis, pour leur soutien sans faille et leurs encouragements constants.

La palme des remerciements revient nos mères et nos pères sans qui, ils ne m'auraient pas été possibles de mener ce travail à bien. De tout cœur, merci pour votre sourire, votre amour, vos encouragements, votre écoute, votre patience à chaque épreuve.

On réserve les derniers mots de conclusion pour une pensée affectueuse nos mes frères, qui n'ont pas cessé eux aussi de nous encourager à terminer ce mémoire

Merci finalement à tous ceux qu'ont l'ai a pas nommé mais qui savent tout ce que l'on doit.

Je dédie ce mémoire :

*A mon père et ma mère et mon frère pour leur amour inestimable,
leurs sacrifices, leur confiance, leur soutien et toutes les valeurs qu'ils
ont su m'inculquer.*

*A ma grand-mère et mon grand père, pour toute l'affection qu'ils
m'ont donnée et pour ces précieux encouragements.*

*A tous mes camarades de l'Université Abou bekr Belkaid-Tlemcen
pour cette merveilleuse année et pour les précieux souvenirs.*

*A mes sœurs AMINA et GHYZLAINE pour être présent dans les bons
et les mauvais moments, pour leurs amours et leurs soutiens.*

*A mes amis et spécialement a mes frères ADEL, MUSTAPHA, RAMZY
et a mon cousin Walid qui n'ont jamais cessé de
me soutenir et Sans oublier mon binôme.*

Je dédie ce mémoire a :

Mes chers parents, que nulle dédicace ne puisse exprimer mes sentiments pour leur patience illimitée, leur encouragement contenu, leur aide, en témoignage de profond respect et gratitude pour leur grand sacrifice.

Mes chers frères pour leur soutien, et ma cher sœur Zohra

Sans oublier mon binôme, et a tous mes copine Fouzia, Farah, soumia, Siham, ibtissem

الملخص

أدت السلوكيات البشرية والاستخدام المكثف للبلاستيك المرتبط بضعف أداء نظام الإدارة إلى تراكم هائل للنفايات البلاستيكية في البيئة البحرية حيث تمثل 50 إلى 80% من جميع النفايات . إن توزيعها وسلوكها في البحر وتدهورها وتأثيراتها ناتج مباشرة عن تكوينها وخصائص استخدامها. إن إعادة تدوير البلاستيك والمعالجات الكيميائية والحرق ودفن النفايات ليست الحلول المثلى لتقليل التلوث البلاستيكي. يبدو أن إنتاج البلاستيك الحيوي والتحلل البيولوجي للبلاستيك باستخدام الكائنات الحية الدقيقة والطحالب هي الحل لمساعدتنا في الحد من الزيادة العالمية في النفايات البلاستيكية.

الكلمات المفتاحية: التحلل البيولوجي ، الكائنات الحية الدقيقة ، البلاستيك ، مياه البحر ، الطحالب ، التلوث البحري

Résumé

Les comportements humains et l'utilisation intensive du plastique associés à une faible performance du système de gestion ont engendré une accumulation massive de déchet plastique dans le milieu marin où ils représentent 50 à 80% de l'ensemble des déchets. Leur distribution, leur comportement en mer, leur dégradation et leurs impacts découlent directement de leur composition et propriété d'usage.

Le recyclage du plastique, les traitements chimiques, l'incinération et la mise en décharge ne sont apparemment pas les solutions optimales pour réduire la pollution plastique. Il semble que la production de bioplastique et la biodégradation du plastique à l'aide des microorganismes et des algues soient notre secours pour résoudre l'augmentation mondiale des déchets plastiques.

Mots clé : biodégradation, microorganisme, plastique, eau de mer, algue, pollution marine.

Abstract

Human behaviors and the intensive use of plastic associated with a weak performance of the management

System have generated a massive accumulation of plastic waste in the marine environment where they present 50 to 80% of all waste. Their distribution, their behavior at sea, their degradation and their impacts result directly from their composition and properties of use.

Plastic recycling, chemical treatments, incineration and landfilling are apparently not the optimal solutions to reduce plastic pollution. It seems that the production of bioplastic and the biodegradation of plastic using microorganisms and algae are our help in solving the global increase in plastic waste.

Keywords: biodegradation, microorganism, plastic, sea water, algae, marine pollution.

Liste des abréviations

Adh :	alcohol dehydrogenase
ALKB :	alcanol hydroxylase
BP :	plastique biodégradable
Cyp:	cytochrome 450
PBSA:	butylène succinate-co-butylène adipate
PESu :	éthylène succinate
PE :	Polyéthylène
PET /PETE :	Polyéthylène téréphtalate
PET ase :	PET hydrolase
PHA :	Polyhydroxyalcanoate
PHB :	Polyhydroxybutyrate
PHBV :	hydroxybutyrate-co-hydroxyvalerate
POP :	Polluants organiques persistants
PS :	Polystyrène
PU :	polyuréthane typique
PVC :	Chlorure de polyvinyle
PP :	Polypropylène

Liste des tableaux

Tableau 1. Application de divers types de plastiques (Chattopadhyay, 2022).....	11
Tableau 2. Classification, structure chimique et caractéristiques des principaux polymères biodégradables.....	16
Tableau 3. liste de souches microbiennes impliquées dans la dégradation de différents types de plastiques dans l'écosystème marin.....	47
Tableau 4. les des microorganismes impliqués dans la dégradation de différents types de plastiques..	50
Tableau 5. Méthodes d'essai de biodégradation standard actuelles pour l'environnement marin	57
Tableau 6. Colonisation d'algues sur une surface en plastique	58

Figure 1. Le plastique sous différents formes.....	7
Figure 2.les différents types de plastique	9
Figure 3 .Structures chimiques des principaux plastiques.(A) Plastiques à squelette carbone-carbone : polyéthylène (PE), polypropylène (PP), chlorure de polyvinyle (PVC) et polystyrène. (B) Plastiques avec des hétéroatomes dans la chaîne principale : téréphtalate (PET) et un polyuréthane typique (PU).....	10
Figure 4 .les bioplastiques et leur production à partir de ressources renouvelables.	14
Figure 5.Augmentation de la production de produits en plastique et de leur utilisation dans le monde. Modifié à partir de Plastic Europe (2017) et Statistique (2018).....	21
Figure 6.les types de plastiques et leurs tailles dans la mer.	24
Figure 7.les différents types de microplastiques et comment sont ils formé	27
Figure 8.une tortue coincé dans des filets de pêche et des plastiques	30
Figure 9.ingestion du plastique par des poissons marins.	32
Figure 10.Impacts hiérarchiques des débris plastiques dans les écosystèmes aquatiques de (une)effets sous-organismes sur la santé des organismes individuels.....	34
Figure 11.Représentation schématique de différentes étapes de la biodégradation des plastiques.....	41
Figure 12.Types de dégradation des polymères	43
Figure 13.Méthodes conventionnelles pour traiter les déchets plastiques avec des alternatives de traitement appropriées.	44
Figure 14.Voie de biodégradation pour traiter les plastiques.....	45
Figure 15.Illustration schématique de la biodégradation du plastique par les microorganismes (reproduite deKumar et al., 2020©2019 Elsevier Ltd. Tous droits réservés)	52
Figure 16 .Potentiel des microalgues dans la production de bioplastiques.....	61
Figure 17 .Les hydroxylases hypothétiques seraient la P450, l'AlkB, la peroxygénase non spécifique (UPO) et d'autres classes d'hydroxylases capables d'activer la liaison C-H. La voie métabolique synthétique avec quatre enzymes dépolymérise le PE, puis les petits produits de dépolymérisation dérivés de la voie seraient acheminés vers les cellules en tant que matières premières. Abréviations : CYP, cytochrome P450.	67

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale

I. Chapitre : Le plastique	5
I. Le Plastique :	6
I.1.Définition :	6
I.2.Histoire :	7
II. Types de plastiques :	9
II.1.Les formes les plus courantes de plastiques :	10
II.2.Procédés utilisés pour la production du plastique :	11
III. Les bioplastiques :	12
III.1.Définition et rôle des bioplastiques :	12
III.2.Types de Bioplastiques :	15
III.2.1.Le PLA :	17
III.2.2.Le PCL :	17
III.2.3.Les PHA :	17
III.2.4.Le PBS :	18
II. Chapitre : la pollution des eaux marines par le plastique	19
I. Source de pollution marine	20
I.1.Source marine	21
I.2.Source terrestre :	22
II. Contamination par le plastique	23
III.1. Pollution par les macroplastiques:	24
III.2. Pollution par les microplastiques	25
III.2.1. Microplastiques primaire :	27
III.2.2 Microplastiques secondaires :	28

Table des matières

IV. Impact de la pollution plastique :	28
IV.1.Enchevêtrement :	29
IV.2.Ingestions :	31
IV.3.Loisirs :	33
IV.4.Autres :	33
V. Les effets de toxicité du plastique :	34
V.1. Effets de toxicité interactive entre les microplastiques et les contaminants additifs dans les organismes marins	34
V.2.Implication du stress oxydatif en tant que mécanismes possibles de la toxicité induite par les microplastiques :	35
V.3. Autres effets toxiques :	36
V.4. Mécanismes de la toxicité induite par les microplastiques chez les espèces marines :	36
V.5. Mécanismes d'accumulation et de translocation des microplastiques chez les espèces marines :	37
V.6. Effet des microplastiques sur les algues :	37
III. Chapitre : la dégradation des plastiques	39
I.1 Dégradation du plastique :	40
I.1.1 Les Facteurs influençant la dégradation :	40
I.1.2 Types de dégradation :	42
I.2 Dégradation biologique du plastique ou biodégradation :	44
I.2.1 Dégradation microbienne :	45
I.2.1.1 Les différents microorganismes :	46
I.2.1.2 Dégradation microbienne des polymères synthétiques :	48
I.2.1.3 Dégradation des polymères biodégradables :	51
I.2.1.4 Les microorganismes et la biodégradation du plastique en milieu marin :	53
I.2.1.5 Les essais de la biodégradation du plastique par le biofilm marin :	55
I.2.2 Dégradation du plastique par les algues :	57
I.2.2.1 Biodégradation du plastique par les algues et mécanisme :	57
I.2.2.2 Potentiel des algues comme source de bioplastiques :	60

Table des matières

I.2.2.2.1	Mélanges avec d'autres matériaux :	62
I.2.2.2.2	Ingénierie génétique :	63
I.2.2.2.3	Les défis des bioplastiques algaux :	64
I.2.3	Dégradation enzymatique :	65
I.3	Les méthodes d'élimination du plastique :	68
I.3.1	Gestion des déchets de plastique :	68
I.3.2	L'utilisation des bioplastiques :	68
I.3.3	L'utilisation des algues :	69
	Conclusion	71
	Références bibliographiques	73



**Introduction
générale**

Le plastique a commencé à remplacer le verre, le bois et le métal sous divers aspects et à faire partie de la vie humaine. En raison de leurs propriétés intéressantes, leur production mondiale a été considérablement augmentée (Thompson *et al.*, 2009).

En 2018, la production mondiale de plastique était de 359 millions de tonnes, dont 61,8 produites en Europe. Plus d'un tiers des plastiques est utilisé pour fabriquer des produits jetables, tels que des emballages, des sacs jetables, etc., avec une durée de vie de 3 ans (Gewert *et al.*, 2015 ; Plastiques Europe, 2019 ; Shah *et al.* 2008 ; Wang *et al.*, 2016).

Le rejet continu et la présence de ces polluants dans le milieu marin sont désormais un problème mondial qui nécessite des stratégies de gestion urgentes pour atténuer ou éviter d'exacerber les menaces potentielles pour la survie des organismes et la santé humaine, et de détériorer les valeurs esthétiques (Mouat *et al.*, 2010 ; Daiwile *et al.*, 2015; Bour *et al.*, 2018; Barletta *et al.*, 2019).

En outre, le potentiel des débris plastiques à transporter des produits chimiques dangereux organiques et inorganiques de la terre à l'environnement marin et à l'homme via les voies d'alimentation a suscité une préoccupation mondiale (Teuten *et al.*, 2009 ; Holmes *et al.*, 2012 ; Léon *et al.*, 2018).

Bien que les propriétés uniques : légèreté, résistance à la traction, durabilité, résistance à la corrosion et isolation électrique, l'utilité accrue du plastique dans les environnements industriels (Thompson *et al.*, 2009).

Mais, ils se biodégradent rarement lorsqu'ils sont rejetés dans l'environnement. Ils subissent des effets interactifs via des processus biologiques, physiques et chimiques qui se traduisent par leur fragmentation en une faible densité de particules plus petites appelées microplastiques (Thompson *et al.*, 2004 ; Singh et Sharma, 2008 ; O'Brine et Thompson, 2010 ; Song *et al.*, 2017)

Les déchets plastiques marins proviennent à la fois de sources terrestres et marines et une fois en mer, les gros objets ont tendance à se fragmenter ou à couler, puis à s'accumuler sur le littoral ou sur le fond marin, nuisant à la vie sauvage et aux chaînes alimentaires marines (Avio *et al.*, 2017).

Depuis leur entrée dans la mer, les plastiques sont rapidement colonisés par des micro-organismes et subissent des processus physiques (migration, sédimentation, accumulation), des processus chimiques (dégradation et adsorption) et des processus biologiques (consommation, translocation et biodégradation) (Lobelle et Cunliffe, 2011 ; Wang *et al.*, 2016).

Actuellement, bien que le rôle de la colonisation microbienne n'ait pas encore été entièrement révélé, plusieurs études ont rapporté une perte de poids du plastique due aux activités des micro-organismes (Syranidou *et al.*, 2017 ; Sudhakar *et al.*, 2008 ; Savoldelli *et al.*, 2017).

En effet, divers micro-organismes ont un grand potentiel pour convertir biologiquement certains polymères plastiques en produits plus simples via un mécanisme aérobie et anaérobie (Ahmed, *et al.*, 2018)

L'objectif de notre étude (travail) est les microorganismes qui dégradent les plastiques dans les eaux marines. Pour cela, on a essayé d'analyser dix articles :

Dans ce travail, on a fait l'analyse de 10 (dix) articles :

- Rôle du microbiome et du biofilm dans la dégradation du plastique de l'environnement (Chattopadhyay I, Biocatalyse et biotechnologie agricole 39 : 102263). (2022)
- l'Impacts biologiques et écologiques des débris plastiques dans les écosystèmes aquatiques (Green DS (2020) in Stock F, Georg Reifferscheid, Nicole Brennholt, and Evgeniia Kostianaia (eds.), *Plastics in the Aquatic Environment - Part I: Current Status and Challenges*, Springer Nature Switzerland).
- la Polymères biodégradables : Une réelle opportunité pour résoudre la pollution plastique marine? Manfra L, Marengo V, Libralato G, Costantini M, Falco FD, Cocca M. *Journal of Hazardous Materials* 416 (2021) 125763).
- l'Interaction entre les communautés microbiennes et divers types de plastique dans différents systèmes aquatiques (Ashar M, Fraser MA, Li J, Wang C, Huang W, Zhang D, Zhang C, *Marine Environmental Research* 162 (2020) 105151).
- Biodégradation des films plastiques en chlorure de polyvinyle par des consortiums marins anaérobies enrichis (Giacomucci L, Raddadi N, Soccio M, Lotti N, Fava F, *Marine Environmental Research* 158 (2020) 104949).
- les Petits débris de plastique dans les sédiments de la mer Adriatique centrale : types, occurrence et distribution (Mistria M, Infantinia V, Scoponib M, Granatad T, Moruzzid L, Massarae F, Donatie MD, Munaria C, *marine pollution bulletin* 124 (2017) 435-440).
- Bactéries synthétiques dégradant le plastique à base de P450 (Yeom SJ, Le TK, Yun CH, *Trends in Biotechnology*, 2 (2022) 40).

- les Défis associés à l'élimination des déchets plastiques et aux voies microbiennes associées pour leur dégradation efficace : un examen complet (Moharir RV, Kumar S Journal of Cleaner Production 208 (2019) 65-76).
- Microplastiques en milieu marin : Tendances actuelles de la pollution environnementale et mécanismes du profil toxicologique (Alimbaa CG, Faggioc C, Environmental toxicology and pharmacology 68 (2019) 61-74).
- Lutte de la nature contre la pollution plastique : les algues pour la biodégradation du plastique et la production de bioplastiques (Chia WY, Tang DYY, Khoo KS, Lup ANK, Chew KW, Environmental Science and Ecotechnology 4 (2020) 100065).

En plus du résumé et l'introduction, le manuscrit est organisé de la manière suivante :

- Le premier chapitre : le plastique
- Le deuxième chapitre : la pollution des eaux marines par le plastique
- Le troisième chapitre : la dégradation des plastiques

Et enfin on termine notre synthèse par une conclusion et les références bibliographiques



**I. Chapitre :
Le plastique**

I. Le Plastique :

I.1.Définition :

Les plastiques sont des polymères organiques synthétiques, qui sont de longues chaînes de molécules hydrophobes, inertes et de poids moléculaire élevé (monomères) qui sont liées par des liaisons covalentes (Brigham *et al.*, 2020).

Leurs propriétés sont malléables, solides, durables, légères et peu coûteuses, ce qui les rend adaptées à la fabrication d'une variété de produits, notamment des articles ménagers, des emballages de produits et des sacs à provisions, qui sont pour la plupart des produits à usage unique. Traditionnellement, les plastiques synthétiques sont des produits pétroliers raffinés où les polymères constitués de liaisons carbone-carbone sont dérivés dans un environnement contrôlé (Andrew, 2018).

Ces plastiques conventionnels fabriqués à partir du pétrole brut lourd pourraient entraîner des problèmes d'épuisement des ressources fossiles, de changement climatique et d'émissions de gaz à effet de serre (Abdul-Latif, *et al.*, 2020).

Les plastiques sont couramment utilisés comme matière première dans les cosmétiques, les produits chimiques, les détergents, les produits pharmaceutiques, les aliments et les boissons (Ganesh Kumar *et al.*, 2020) (Fig.1).

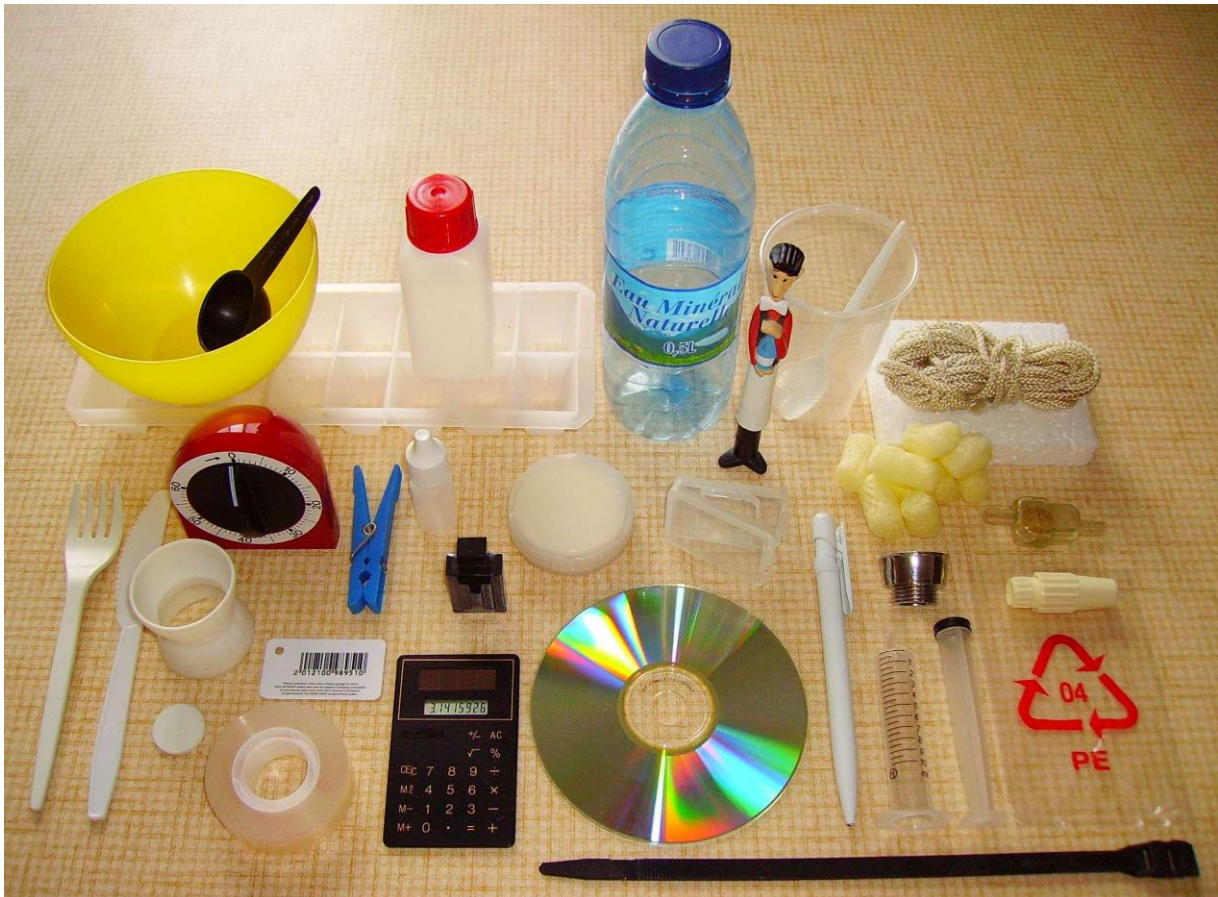


Figure 1. Le plastique sous différentes formes (source : le plastique au quotidien : matière plastique) auteur : anonyme (2022)

I.2.Histoire :

Les plastiques, polymères avec des mélanges complexes de composés organiques principalement synthétiques qui sont liés entre eux lors de la polymérisation, ont été inventés pour la première fois en 1839 par Eduard Simon sous le nom de polystyrène (un plastique solide créé à partir d'éthylène et de benzène) (Bellis, 2018).

Suite à son utilité et sa polyvalence dans la production de matériaux tels que les gobelets et les emballages pour cacahuètes, a conduit à l'invention du premier plastique artificiel appelé Parkesine (un matériau organique dérivé de la cellulose qui, une fois chauffé, pouvait être moulé et conservait sa forme une fois refroidi) en 1862 par Alexander Parkes (Bellis, 2018).

Après l'invention de Parkesine, l'utilisation du formaldéhyde est devenue le prochain produit faire progresser la technologie plastique. Vers 1897, les efforts pour produire des

tableaux blancs ont conduit à la synthèse de caséine plastique à partir de protéines de lait mélangées au formaldéhyde (Bellis, 2018).

En 1899, Arthur Smith découvrit les résines phénol-formaldéhyde qui servaient de substitut à l'ébonite dans l'isolation électrique. En 1907, Leo Hendrik Baekeland a amélioré les techniques de réaction phénol-formaldéhyde pour développer la première résine synthétique (premier plastique moderne) avec la marque commerciale Bakelite. L'invention de la bakélite a accru les connaissances sur les techniques peu coûteuses qui ont amélioré la production de plastiques thermodurcissables (plastiques qui ne peuvent pas être refondus et reformés lorsqu'ils sont chauffés) et les thermoplastiques (plastiques qui peuvent être réchauffés, remodelés et congelés à plusieurs reprises) (García *et al.*, 2014 ; Hamid *et al.*, 2015; Plastic Europe, 2017).

Ces techniques ont conféré aux plastiques la légèreté, la durabilité, l'inertie et la résistance à la corrosion, ce qui a invariablement accru leur polyvalence et leur efficacité en tant que matériaux clés dans des secteurs stratégiques tels que l'emballage, le bâtiment et la construction, les transports, les équipements scientifiques, les énergies renouvelables, les appareils médicaux et sportifs, pour n'en citer que quelques-uns (Plastic Europe, 2017).

Cette découverte a ensuite été suivie par la production en série de produits liés au plastique à partir des années 1940.

Les plastiques en raison de leurs applications diverses sur l'ensemble du spectre de la civilisation humaine sont devenus des matériaux omniprésents dans la société humaine (Emadian *et al.*, 2017). L'un des principaux attributs du plastique qui en ont fait un tel grand matériau accepté et utilisé est sa structure polymère (Ferreira *et al.*, 2005).

II. Types de plastiques :

Une grande partie des produits en plastique fabriqués chaque année dans le monde ont des compositions et des propriétés différentes (Fig.2).

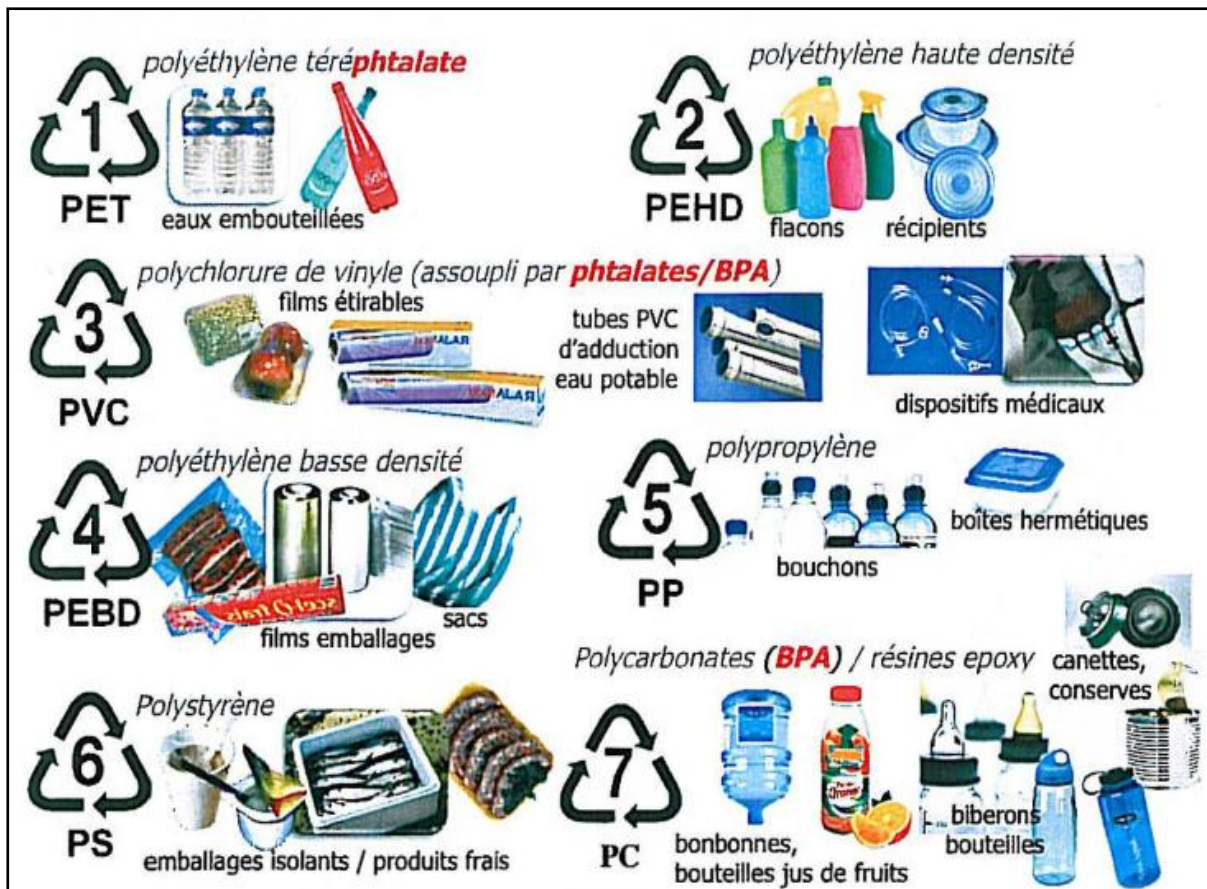


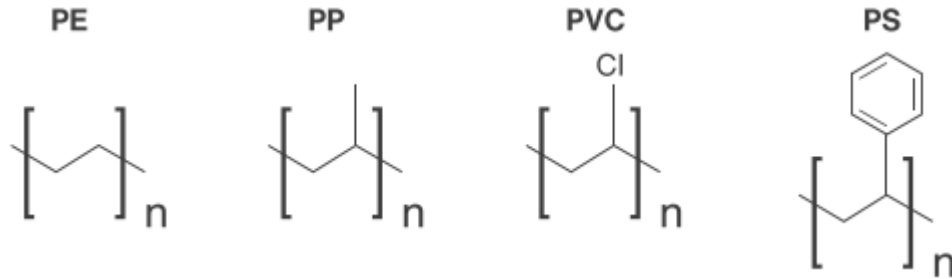
Figure 2. Les différents types de plastique (Source : quel plastique se recycle) auteur : anonyme (2018)

Ils ont été regroupés principalement en fonction de leur réaction à la chaleur en plastiques thermodurcissables (matières plastiques utilisées dans l'isolation, les revêtements, les adhésifs, les composites, les pneus et les ballons, etc.) et thermoplastiques (matières plastiques utilisées pour les bouteilles, les contenants alimentaires, les tuyaux, les textiles, les engins de pêche, les pots à lait, les films, les sacs, mégot de cigarette, etc.). A haute température ou lorsqu'ils sont chauffés, les matériaux thermoplastiques deviennent souples ou fondent, tandis que les matériaux thermodurcissables se dégradent sans passer par la phase liquide (García *et al.*, 2014 ; Hamid *et al.*, 2015)

II.1. Les formes les plus courantes de plastiques :

Le PE, le PP, le polychlorure de vinyle (PVC), le PE téréphtalate (PET), le polyuréthane (PU) et le PS (Inderthal *et al.*, 2021; Mohanan *et al.*, 2020) (Fig.3)

(A) plastique avec un squelette carbone-carbone



(B) plastiques avec hétéroatome dans la chaîne principale

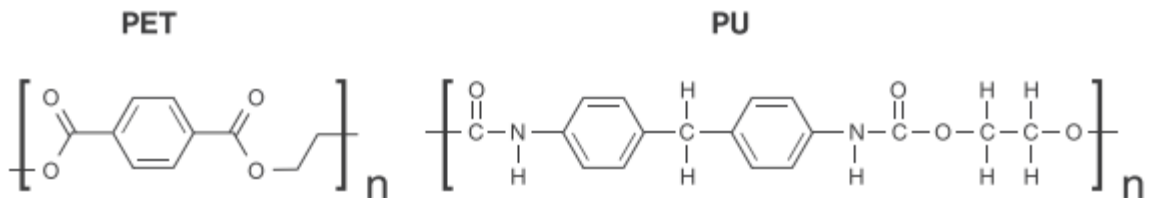


Figure 3 .Structures chimiques des principaux plastiques. (A) Plastiques à squelette carbone-carbone : polyéthylène (PE), polypropylène (PP), chlorure de polyvinyle (PVC) et polystyrène. (B) Plastiques avec des hétéroatomes dans la chaîne principale : téréphtalate (PET) et un polyuréthane typique (PU).

Les polymères synthétiques tels que le polyamide (PA), le polyéthylène téréphtalate (PET), le polystyrène (PS), le chlorure de polyvinyle (PVC), le polypropylène (PP), le polyéthylène (PE) et le polyuréthane (PUR) sont fabriqués en grandes quantités au monde (tableau1).

Tableau 1. Application de divers types de plastiques (Chattopadhyay, 2022)

Types de plastique	Application
Polyamides (PA)	Poils de brosse à dents
Polyéthylène téréphtalate (PET)	Bouteilles de boissons gazeuses
polystyrène (PS)	Gobelets, assiettes et couverts jetables
Chlorure de polyvinyle (PVC)	Sols, tuyaux de plomberie et rideaux de douche
Polypropylène (PP)	Bouchons de bouteilles et pailles
Polyéthylène (PE)	Bouteilles en plastique
Polyuréthanes (PU)	Mousses de rembourrage et d'isolation thermique

Par ailleurs, parmi les plastiques dérivés du pétrole, le PVC est le troisième en termes de demande européenne de plastique (5 millions de tonnes en 2018) (Plastiques Europe, 2019). Les plastiques PVC ont une large gamme d'applications, telles que les emballages alimentaires, l'électronique, les revêtements, les dispositifs médicaux, etc., en raison de leur faible coût, de leur stabilité à long terme et de leurs propriétés mécaniques et en fonction de la quantité et de la qualité des plastifiants ajoutés (Bueno-Ferrer *et al.*, 2010; Glas *et al.*, 2014 ; Reddy *et al.*, 2010).

II.2.Procédés utilisés pour la production du plastique :

Deux procédés principaux de polymérisation et de polycondensation avec des catalyseurs spécifiques sont utilisés pour produire des plastiques. (Edmondson et Gilbert, 2017 ; Plastics Europe, 2020).

Dans le processus de polymérisation, les composés de faible poids moléculaire se lient progressivement les uns aux autres. Au début, ils commencent à s'attacher au centre actif, qui se situe au début de la chaîne de croissance. Dans un réacteur de polymérisation, les

monomères, tels que l'éthylène et le propylène, se lient pour former de longues chaînes polymères. Chaque polymère a ses propres propriétés, structure et taille en fonction des différents types de monomères de base utilisés (Chamas *et al.*, 2020).

Les polymères se connectent pour former un réseau 3D via un processus de condensation à travers plusieurs étapes successives de formation de polymères de haut poids moléculaire. Les PE, PP et PS ont des liaisons C–H rigide et dense difficiles à activer, alors que le PET et le PU ont des groupes fonctionnels avec ester et des liaisons amide auxquelles les enzymes hydrolytiques peuvent accéder (Chamas *et al.*, 2020).

Au fur et à mesure que les chaînes dorsales en PE sont construites exclusivement à partir de liaisons simples C–C sans aucun groupe fonctionnel, le PE est un matériau inerte et très récalcitrant à la dégradation (Chamas *et al.*, 2020).

Bien que sa structure polymère diffère de celle du PE, le PP comprend également uniquement des liaisons simples C – C inertes.

III. Les bioplastiques :

III.1. Définition et rôle des bioplastiques :

Les bioplastiques sont définis comme des plastiques fabriqués entièrement ou partiellement à partir de biomasse ou de sources renouvelables, telles que les cultures vivrières, et ont la même fonction que les plastiques à base de pétrole (Mekonnen, *et al.*, 2013).

Ils peuvent être constitués de différents matériaux, dont ils sont divisés en trois groupes principaux (European Bioplastics 2018).

i. Plastiques biosourcés mais non compostables : PE, PP, PET, polytriméthylène téréphtalate (PTT) ou élastomères polyester (TPC-ET)

ii. Plastiques biosourcés et dégradables : Acide polylactique (PLA), PHA, amidon, cellulose

iii. Plastiques biodégradables à base de ressources fossiles : Polybutylène adipate téréphtalate (PBAT)

Il existe de nombreuses sources qui peuvent être utilisées pour fabriquer des bioplastiques, principalement des cultures agricoles, telles que le maïs, le blé, les protéines de soja, les protéines de lait, le collagène et la gélatine (Bastos Lima *et al.*, 2018).

Cependant, cela soulève des inquiétudes sur la durabilité de ces matières premières, comme la concurrence entre les terres et les ressources en eau pour la consommation humaine (Bastos Lima *et al.*, 2018).

De plus, le processus d'extraction des composés, en particulier à partir de plantes pour la synthèse de bioplastiques est difficile en raison de la présence de parois cellulaires en couches. (Lodish *et al.*, 2000).

De plus, les plastiques « verts » fabriqués à partir de cultures vivrières, comme le manioc, le maïs ou le sagou, sont confrontés aux problèmes de faible résistance à l'eau (Machmud *et al.*, 2013).

Les BP sont utilisés dans la fabrication des produits compostables afin de faciliter la collecte des biodéchets et le recyclage organique, conformément aux exigences de la directive européenne sur les emballages et les déchets d'emballages 94/62/CE (Fig.4).

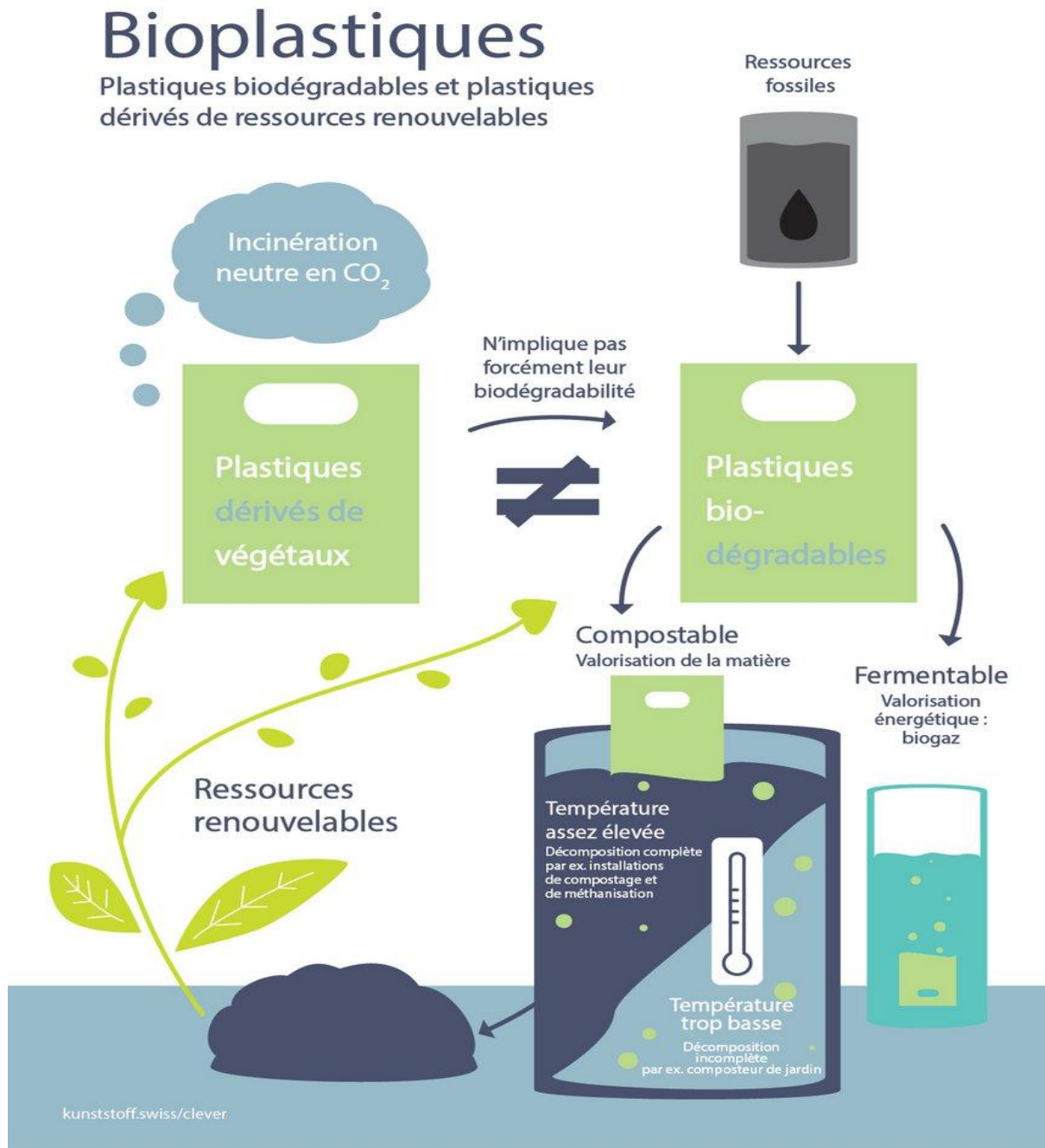


Figure 4 .Les bioplastiques et leur production à partir de ressources renouvelables.

(Source : Kunststoff Swiss : simplyscience : le bioplastique) auteur : anonyme(2020)

L'utilisation des BP principalement dans les systèmes agricoles peut induire une réduction des problèmes écologiques associés à l'utilisation de plastiques conventionnels (Degli Innocenti et Breton, 2020).

De plus, les BP permettent de lutter contre les déchets mal gérés qui se déversent dans l'environnement, là où l'intervention humaine est inefficace (Meereboer *et al.*, 2020).

Les BP sont des matériaux qui se biodégradent naturellement dans l'environnement en raison de l'action de micro-organismes naturels tels que les bactéries, les champignons et les algues (Lambert et Wagner, 2017). Ils peuvent provenir de ressources renouvelables ou pétrochimiques.

Les bioplastiques (biosourcés, biodégradables ou les deux) sont largement utilisés dans plusieurs secteurs du marché, comme l'emballage, les produits de restauration, l'automobile, l'agriculture/horticulture, les jouets, les textiles, etc. Le plus grand secteur d'application des bioplastiques est l'emballage avec près de 65 % (1,2 MT) du marché total des bioplastiques en 2018 (Bioplastiques européens, 2018).

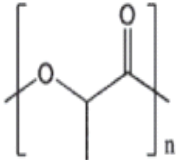
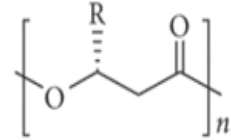
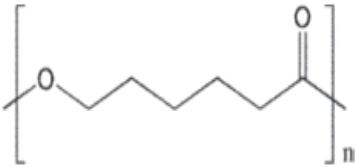
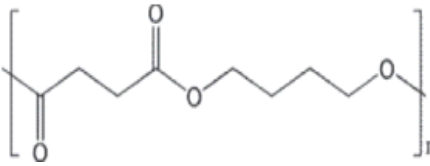
Les emballages en plastique oxo-dégradables présentaient plusieurs défauts (c'est-à-dire le devenir dans l'environnement, la fragmentation et la capacité d'accumulation de substances toxiques) et ont été interdits en 2019 par l'Union européenne (Roy *et al.*, 2011 ; Fontanelle *et al.*, 2013 ; Eyheraguibel *et al.*, 2018 ; Commission européenne, 2019).

III.2.Types de Bioplastiques :

Le PLA, le poly (ϵ -caprolactone) (PCL), les poly (hydroxyalcanoates) (PHA), le poly (succinate de butylène) (PBS), leurs mélanges et composites ont attiré l'attention scientifique pour réduire l'ampleur des problèmes d'élimination des déchets et obtenir une large gamme de matériaux biodégradables à utiliser commercialement (Coca *et al.*, 2015).

Ces polyesters aliphatiques sont largement étudiés et, jusqu'à présent, utilisés comme biomatériaux pour différentes applications (Domb *et al.*, 2011 ; Nair et Laurencin, 2007). Dans le tableau 2, les principales propriétés de ces polyesters sont rapportées.

Tableau 2 . Classification, structure chimique et caractéristiques des principaux polymères biodégradables (Manfra *et al.*, 2021)

Polymère	La source	Caractéristiques
<p>Poly(acide lactique) (PLA)</p> 	Biosourcé	Bonnes propriétés mécaniques et facilité de traitement. Faible taux de cristallisation. Température de fusion 150–180°C. Source principale : fermentation du glucose à partir de l'hydrolyse de l'amidon de maïs. Souvent utilisé dans des mélanges avec d'autres polymères.
<p>PHA</p> 	Fossile basé	Température de fusion 56–65°C. Principalement utilisé dans des mélanges avec des biopolymères (par exemple, l'amidon)
<p>Poly(ε-caprolactone) (PCL)</p> 	Biosourcé	Le PHB est le plus abondant. Point de fusion 180°C. Pour éviter une dégradation thermique rapide et une fragilité, le PHB est souvent mélangé avec du PHV ou d'autres polymères biodégradables (par exemple, PLA).
<p>Poly(succinate de butylène) (PBS)</p> 	Biosourcé	Bonnes propriétés mécaniques. Température de fusion 115°C. Souvent mélangé avec d'autres polymères (c.-à-d. amidon, PLA) ou copolymères (c.-à-d. adipate de succinate de polybutylène) pour diminuer la cristallinité.

III.2.1.Le PLA :

C'est un polyester thermoplastique aliphatique linéaire biodégradable et biocompatible produit à partir de sources renouvelables (Bogaert et Coszac, 2015).

C'est l'un des BP les plus étudiés. L'intérêt pour les polymères à base d'acide lactique s'est accru au cours des dernières années, avec la mise en place des procédés industriels rentables pour produire le monomère à partir de ressources végétales (Gross et Kalra, 2002).

Il est largement utilisé pour les applications biomédicales et d'emballage en raison de ses excellentes propriétés mécaniques et de sa faible toxicité. Le PLA est généralement obtenu à partir de la polycondensation de l'acide L-lactique ou issu de la polymérisation par ouverture de cycle du lactide, un dimère cyclique de l'acide lactique. Le PLA est un polymère thermoplastique semi-cristallin (Cocca *et al.*, 2011 ; Di Lorenzo *et al.*, 2014).

Diverses tentatives ont été faites pour améliorer l'aptitude au traitement et la flexibilité du PLA en utilisant des plastifiants et des mélanges de polymères (Avolio *et al.*, 2018).

III.2.2.Le PCL :

C'est un polyester aliphatique thermoplastique semi-cristallin synthétisé par polymérisation par ouverture de cycle de la caprolactone. Le PCL se caractérise par une bonne résistance à l'eau, à l'huile, aux solvants et au chlore, un point de fusion et une viscosité bas. Pour réduire les coûts de fabrication, le PCL peut être mélangé avec de l'amidon par exemple, afin de fabriquer des sacs poubelles ou des fibres naturelles comme la cellulose (Ghavimi *et al.*, 2015).

Parmi les différents composites polymériques actuellement disponibles, le mélange d'amidon et de PCL a fait l'objet d'une grande attention depuis les années 1980 (Ghavimi *et al.*, 2015).

Le PCL est complètement biodégradé par les micro-organismes dans différents environnements tels que les boues d'épuration, le sol, les écosystèmes marins et les composts (Kasuya *et al.*, 1998).

III.2.3.Les PHA :


Ils sont une famille diversifiée de biopolymères intracellulaires synthétisés par un large éventail de micro-organismes dans des conditions de stress nutritif (Leja et Lewandowicz, 2010).

Ce sont des polymères thermoplastiques biocompatibles avec des propriétés mécaniques comparables à celles des polymères traditionnels. Le PHA se dégrade dans différents environnements tels que le compost, le sol ou l'eau de rivière (Weng *et al.*, 2010 ; Kasuya *et al.*, 1998).

III.2.4.Le PBS :

Le copolymère poly (butylène succinate-co-butylène adipate) (PBSA) et le poly (éthylène succinate) (PESu) ont été inventés en 1990 et produits avec succès par une réaction de polycondensation de glycols avec des acides dicarboxyliques aliphatiques et leurs dérivés (Tserki *et al.*, 2006).

Au cours de la dernière décennie, l'intérêt scientifique et industriel s'est concentré sur le PBSA en raison de sa capacité de transformation et de ses propriétés mécaniques, qui en font un candidat potentiel pour remplacer d'autres produits tels que le polyéthylène, le PE et le PCL(Fujimaki,1998).



**II. Chapitre : la
pollution des
eaux marines
par le plastique**

I. Source de pollution marine

L'écosystème marin joue un rôle vital dans la fourniture de la richesse mondiale des services écosystémiques tels que la sécurité alimentaire, le stockage du carbone, la détoxification des déchets et les avantages culturels (par exemple, les possibilités de loisirs et l'amélioration spirituelle) (Geyer *et al.*, 2017)

L'Augmentation de la production mondiale de plastique de 1,5 million de tonnes dans les années 1950 à 335 millions de tonnes en 2016 (Fig. 5), a pour conséquence l'accumulation de débris plastiques dans l'environnement et des impacts toxicologiques sur le biote (Gall et Thompson, 2015 ; Lu *et al.*, 2016 ; Dawson *et al.*, 2018).

De nombreux chercheurs, organisations gouvernementales et non gouvernementales de divers pays du monde ont largement signalé l'accumulation de débris plastiques dans pratiquement toutes les composantes des écosystèmes marins et côtiers. (Carpentier et Smith, 1972)

Les débris de plastique dans le milieu marin ont été signalés pour la première fois par Carpenter et Smith en 1972, lorsqu'ils prélevaient des échantillons de poissons pélagiques de l'ouest de la mer des Sargasses. Ils ont attribué leur observation au déversement de déchets par les villes ou par les cargos et les navires à passagers, dont ils ont suggéré qu'avec l'augmentation du taux de production de plastique, combinée à de mauvaises pratiques d'élimination des déchets, ces derniers s'accumuleront dans la mer avec le temps (Carpenter et Smith, 1972).

Quatre décennies (40 ans) après leur rapport, la pollution plastique du milieu marin est devenue un problème mondial croissant de pollution environnementale et de santé publique (Colton *et al.*, 1974 ; Ye et Andrady, 1991 ; Derraik, 2002 ; Desforges *et al.*, 2014 ; Eriksen *et al.*, 2014 ; D'Alesandro *et al.*, 2018 ; Barletta *et al.*, 2019).

Actuellement, une énorme quantité de déchets plastiques est produite dans le monde. Sans changements efficaces dans la production mondiale de plastique et la gestion des déchets, environ 12 000 MT pourraient finir dans les décharges. ou dans l'environnement d'ici 2050 (Geyer *et al.*, 2017).

La production mondiale de plastique continue de croître pour atteindre 359 millions de tonnes en 2018 (Fig5), dont leur majorité sont des emballages (Plastic Europe, 2019).

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

Geyer *et al.*, (2017) ont estimé que sur l'ensemble du plastique produit dans le monde jusqu'en 2015, seuls 9 % ont été recyclés, 12 % incinérés et 79 % soit envoyés à la décharge, soit devenus des déchets dans l'environnement. Ils ont également estimé que parmi les articles produits, plus de 40 % d'entre eux étaient conçus à des fins « à usage unique » (Geyer R, *et al.*, 2017).

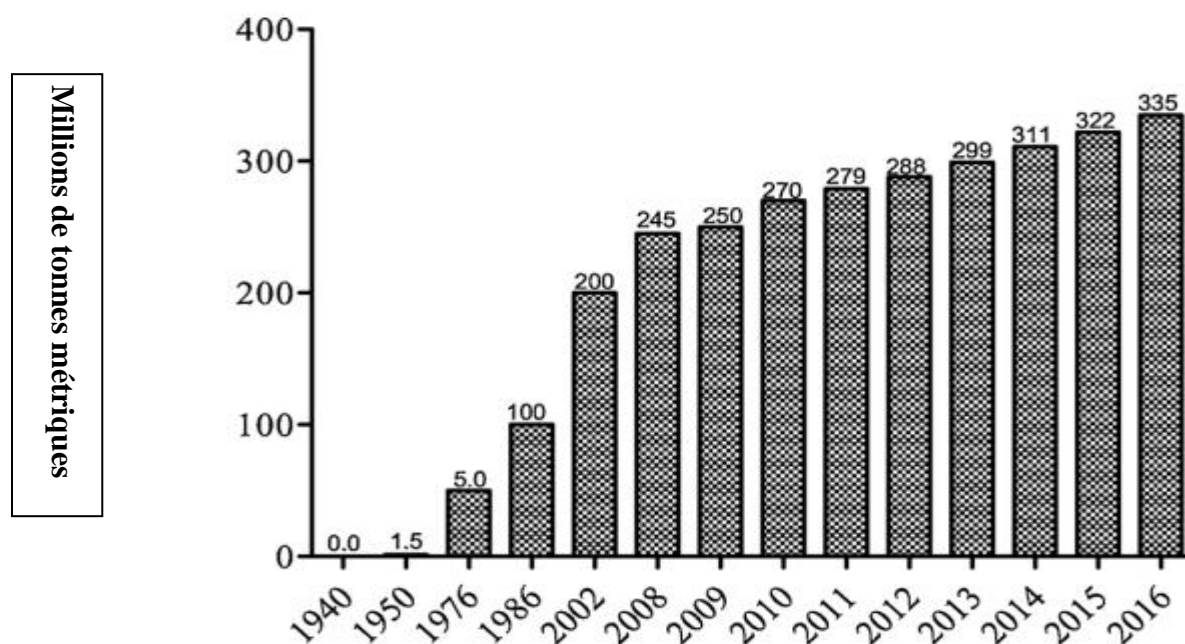


Figure 5. Augmentation de la production de produits en plastique et de leur utilisation dans le monde. Modifié à partir de Plastic Europe (2017) et Statistique (2018).

Le terme "pollution plastique marine" a été défini en raison d'une quantité importante et croissante d'exposition aux déchets plastiques dans l'écosystème marin (Geyer, et al, 2017).

En fait, au fil du temps, ces déchets peuvent se fragmenter en plus petits morceaux dispersés dans l'environnement sur des échelles de temps géologiques, ce qui nécessite une gestion intensive, coûteuse et laborieuse pour éliminer ces plastiques marins (Jambeck, *et al.*, 2015). La source de cette pollution peut être marine ou terrestre.

I.1. Source marine

Le milieu marin et les rivières constituent potentiellement une voie de transport majeure pour les débris plastiques de toutes tailles (Li *et al.*, 2016; Schmidt *et al.*, 2017).

En outre, il ne sera pas seulement transporté par les rivières de la terre à la mer, mais même une fois dans le milieu aquatique, il pourra également retourner à terre lors de marées hautes ou d'inondations (Horton *et al.*, 2017).

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

Les gros objets ont tendance à se fragmenter ou à couler, puis à s'accumuler sur le littoral ou sur le fond marin (Avio *et al.*, 2017).

L'accumulation excessive de plastiques sur les littoraux du monde entier (Galvani *et al.*, 2015) ont sensibilisé à la pollution plastique, les petits débris plastiques (microplastiques) (Barnes *et al.*, 2009), ne sont apparus que récemment comme une source imminente de contamination plastique dans le milieu marin, en raison de leur présence insaisissable dans les sédiments et l'eau de mer (Andrady, 2011).

Les plastiques sont relativement flottants et peuvent être transportés depuis des pays par le vent et les courants d'eau (Barnes *et al.*, 2009)

I.2.Source terrestre :

La pollution marine due aux débris de déchets a longtemps été liée au rejet de déchets terrestres et à diverses activités humaines sur la mer (Carpentier et Smith, 1972).

Faris et Hart (1995) ont montré qu'environ 80 % du total des débris dans le milieu marin provenaient de sources terrestres.

Par la suite, l'Agence des Nations Unies pour la protection de l'environnement a estimé cela à environ 6,4 millions de tonnes de déchets par an (Programme des Nations Unies pour l'environnement (UNEP, 2010)

Parmi le total des débris terrestres qui pénètrent dans le milieu marin, les plastiques représentent entre 40 et 80 % (Derraik, 2002 ; Barnes *et al.*, 2009).

Ces 40 à 80 % qui se retrouvent dans le milieu marin pourraient représenter environ 10 % du total des plastiques produits annuellement (Thompson, 2006 ; Hoornweg et Bhada-Tata, 2012).

Les 10 % étaient estimés entre 4,8 et 12,7 millions de tonnes de débris de plastique en 2010 (Galloway *et al.*, 2017).

Ce chiffre est énorme et devrait augmenter dans le milieu marin étant donné que les débris plastiques persistent plus longtemps et peuvent s'accumuler dans le milieu marin et les écosystèmes terrestres. (Galloway *et al.*, 2017).

II. Contamination par le plastique

La contamination plastique est générée par le transfert direct de plastique (macro et micro) dans les systèmes aquatiques ou provient de la dégradation physique/mécanique des macroplastiques dans les décharges qui produisent des microplastiques, qui sont transférés par le lixiviat vers les rivières et enfin vers les mers (Avio *et al.*, 2017; Galloway *et al.*, 2017).

De plus, les additifs présents dans les formulations plastiques ne sont normalement pas lié de manière covalente aux chaînes polymères et pourrait donc s'échapper des plastiques et pénétrer dans le milieu marin (Avio *et al.*, 2017; Gewert *et al.*, 2015 ; Harrison *et al.*, 2014).

Les plastiques entrant dans le milieu marin pourraient également absorber des polluants organiques persistants (POP) en raison des caractéristiques hydrophobes de ces composés ou être un agent vecteur de propagation d'organismes nuisibles habitant les surfaces en plastique (Avio *et al.*, 2017 ; Harrison *et al.*, 2014 ; Oberbeckmann *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2016 ; Zettler *et al.*, 2013).

La décomposition des plastiques est la plus difficile parmi toutes les marchandises générales telles que les fruits, les papiers, les cuirs et l'aluminium. C'est parce qu'il peut persister dans la nature pendant siècles avant de se décomposer. (Chia *et al.*, 2020).

Les scientifiques et le grand public sont préoccupés par la contamination par le plastique. Des appels ont été lancés pour étiqueter les microplastiques comme des matières dangereuses (Rochman *et al.*, 2013).

Une myriade de différents types de polymères plastiques synthétiques sont présents dans l'environnement, et leur densité peut déterminer leur position dans l'environnement aquatique. Par exemple, les polymères à faible densité tels que le polyéthylène et le polypropylène sont généralement plus abondants à la surface de la mer que les polymères plus denses tels que le polyester, le polyamide et les acryliques, qui coulent rapidement et s'accumulent dans les sédiments (Erni-Cassola *et al.*, 2019).

Une fois que les polymères de faible densité sont colonisés par des biofilms, ils vont également s'enfoncer dans les sédiments (Andrady 2011 ; Kaiser *et al.*, 2017).

Les débris plastiques contaminent les écosystèmes aquatiques du monde entier et sont présents dans les mers (Chae *et al.*, 2015) et d'eau douce (Fischer *et al.*, 2016) colonnes d'eau,

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

plages marines (Karthik *et al.*, 2018) et mer profonde (Woodall *et al.*, 2014) et dans les zones côtières (Willis *et al.*, 2017) et sédiments lacustres d'eau douce (Vaughan *et al.*, 2017).

On le trouve également chez de nombreux animaux marins, y compris les invertébrés (Desforges *et al.*, 2015), les poissons (Lusher *et al.*, 2013), les reptiles (Pham *et al.*, 2017) et les mammifères (Fossi *et al.*, 2012) et les animaux d'eau douce, y compris les invertébrés (Windsor *et al.*, 2019) et poissons (Silva-Cavalcanti *et al.*, 2017)

III. Types de pollution de plastique :

Les différents types de pollution sont illustrés dans la fig. 6.

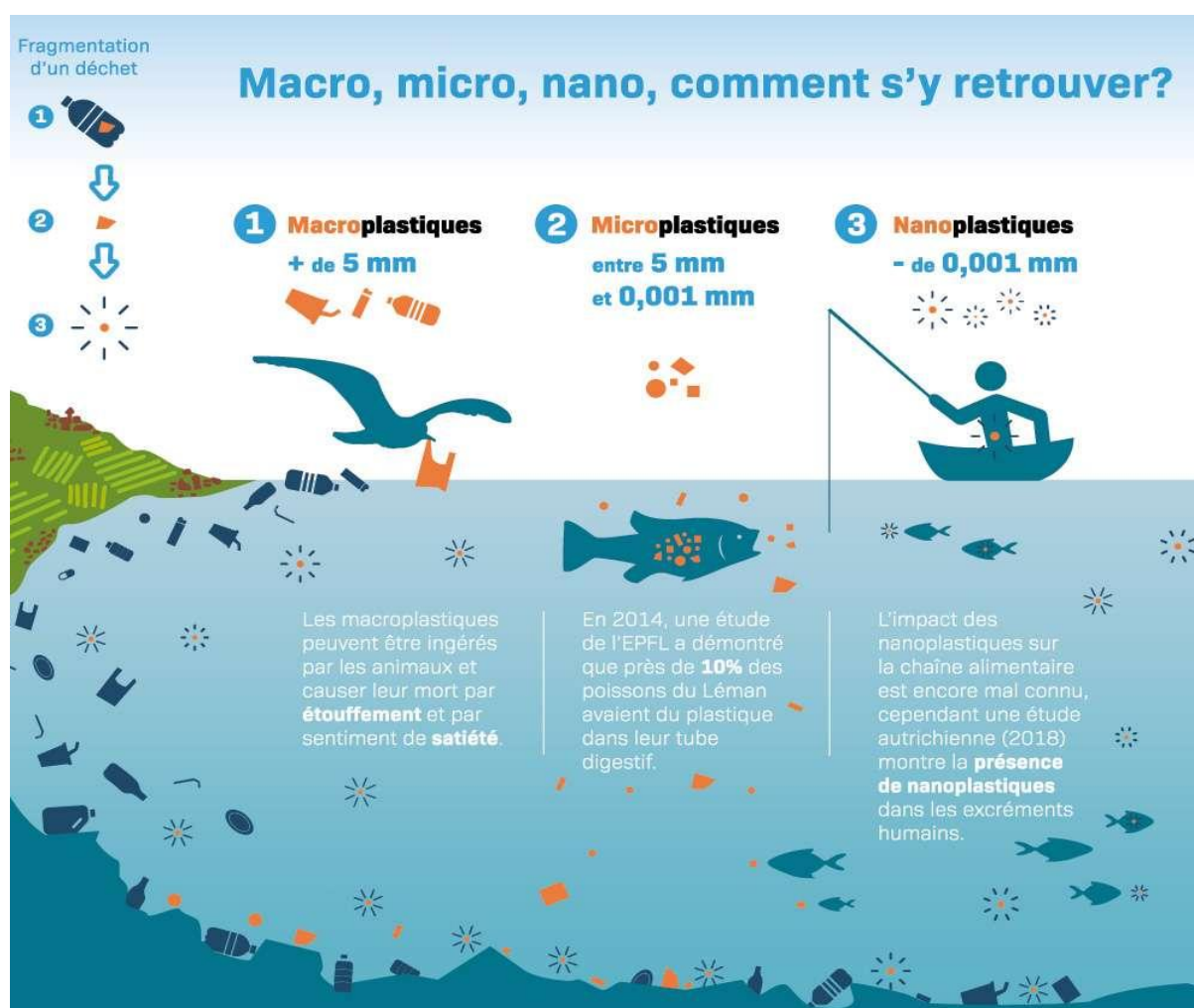


Figure 6. les types de plastiques et leurs tailles dans la mer. (Source : plastique dans la chaîne alimentaire : SISL (société internationale de sauvetage du Léman) auteur : anonyme (2018))

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

III.1. Pollution par les macroplastiques:

Près de la moitié (moyenne de 49 %) des débris de plastique trouvés lors du nettoyage des plages sont composés d'articles à usage unique tels que des emballages alimentaires, les bouteilles en plastique et les sacs en plastique (Priestland *et al.*, 2017) .

L'apport constant de débris plastiques dans les habitats aquatiques se traduit par un réservoir toujours croissant de déchets. En raison de sa durabilité, il peut persister dans l'environnement, peut-être pendant des siècles, la fragmentation d'articles plus gros fournissant une source constante de microplastiques. (Ostl *et al.*, 2019)

III.2. Pollution par les microplastiques

Le terme « microplastique » est un terme générique qui englobe un large éventail de différents types de particules. Ils sont généralement définis comme étant de l'ordre de 5 mm à 1 mm. (Oceanic and Atmospheric Administration Marine Debris Program(2014).

Alternativement, d'autres définissent les microplastiques comme étant inférieurs à 1 mm (Browne *et al.*,2011).

Les microplastiques sont actuellement la forme de déchets solides la plus abondante sur Terre (Eriksen *et al.*, 2014). En raison de leur petite taille, ils sont biodisponibles pour les organismes de tout le réseau trophique.

Une fois ingérés par un organisme, ils peuvent provoquer une réponse via leur présence physique (éventuellement altérée par leur forme), leur composition chimique (dont les plastifiants et les polluants organiques persistants) ou leurs auto-stoppeurs biologiques (microorganismes dont les pathogènes) (Barboza et Gimenez, 2015 ; Galgani *et al.*, 2015).

Les microplastiques sont omniprésents dans la plupart des environnements marins du monde. Ils constituent plus de 95 % des déchets marins qui s'accumulent et se répandent dans les cinq matrices du milieu marin ; surface des eaux et de la colonne d'eau, sur les rivages (plages), les sédiments marins, le fond marin et le biote, avec leur abondance et leur distribution montrant une variabilité spatiale considérable (Barboza et Gimenez, 2015;Galgani *et al.*, 2015).

Dans leur revue sur la distribution des microplastiques en milieu marin, (Galgani *et al.*, 2015) et (Auta *et al.*,2017) ont montré que les microplastiques ont conquis tous les

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

composants des mers du monde ; rivages, plages, dans les sédiments du fond marin et sur les eaux de surface de l'Arctique à l'Antarctique.

Différentes études ont montré que des concentrations variables de microplastiques sont réparties dans de nombreuses mers du monde, y compris Golf d'Aqaba, Monterey USA (Rosevelt *et al.*, 2013), mers d'Asie de l'Est (Isobe *et al.*, 2015), Bootless Bay (Smite *et al.*, 2012), Kaosiung, Taïwan (Liu *et al.*, 2013), Tasmanie (Slavin *et al.*, 2012), mer intérieure de Seto (Isobe *et al.*, 2014), estuaires urbains du KwaZulu-Natal, Afrique du Sud (Naidoo *et al.*, 2015).

La distribution globale de ces particules dans les milieux marins est renforcée par leurs faibles densités (par rapport à l'eau), les sources de production et de rejet dans l'environnement, et les mécanismes de dispersion (par les courants et/ou la direction des vagues) et les processus hydrodynamiques de la masse d'eau (Kukulka *et al.*, 2012).

L'évaluation de la pollution marine par les microplastiques est relativement récente, dont de vastes zones de mers restent encore peu explorées. C'est le cas de la mer Méditerranée (UNEP/MAP/MEDPOL, 2009), dont les côtes abritent environ 10 % de la population littorale mondiale, tandis que le bassin constitue l'une des voies de navigation les plus fréquentées au monde et reçoit les eaux de bassins fluviaux densément peuplés (par exemple Nil, Ebro, Po, Rhône).

La contamination par les petits débris plastiques en Méditerranée est un problème dont l'ampleur n'a été reconnue que récemment (Gago *et al.*, 2015).

Dans leur revue, Cozar *et al.*, (2015) ont rapporté que les abondances de petits plastiques flottants dans la mer Méditerranée étaient similaires à celles trouvées dans les gyres de l'océan Pacifique, tandis que (Woodall *et al.*, 2014) ont signalé une pollution microplastique dans les sédiments provenant des carottes profondes.

Par ailleurs, les microplastiques produits intentionnellement à l'échelle microscopique sont appelés « microplastiques primaires » (par exemple, microbilles, particules de sablage ou granulés de pré-production) (Botterell *et al.*, 2019 ; Wright *et al.*, 2013).

Les microplastiques produits indirectement à partir de la fragmentation d'articles en plastique plus gros en morceaux plus petits sont appelés « microplastiques secondaires » (par exemple, les fibres synthétiques provenant du lavage des vêtements ou de l'écaillage des emballages) (Botterell *et al.*, 2019 ; Wright *et al.*, 2013)(Fig.7).



Figure 7.les différents types de microplastiques et comment sont-ils formés. (Source : huesker : microplastique)Auteur : anonyme (2018)

III.2.1. Microplastiques primaire :

Les microplastiques primaires sont des particules de petite taille d'environ 5 mm utilisées comme granulés de résine dans l'industrie du plastique et inférieurs à 0,5 mm (poudre) sont utilisés à cet égard comme composants de produits d'hygiène et de soins personnels (Thompson, 2015), des insectifuges et des écrans solaires, des fluides de forage pour vêtements synthétiques et des agents de décapage à l'air comprimé (Grégory, 1996).

Ces minuscules particules pénètrent directement dans le milieu marin via les eaux usées et les effluents d'eaux usées et/ou les déversements industriels (Cole *et al.*, 2011; Castaneda *et al.*, 2014).

Environ 5 000 g de microplastiques primaires provenant des produits d'hygiène personnelle et de soins de santé pénètrent chaque année dans les flux de déchets qui finissent dans le milieu marin (Chang, 2013).

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

III.2.2 Microplastiques secondaires :

Les microplastiques secondaires en milieu marin proviennent de la fragmentation des matières plastiques plus grosses en particules de petite taille. Cela implique des processus individuels ou une combinaison de processus biologiques, chimiques ou physiques qui augmentent la rupture de la réticulation/des liaisons dans les polymères plastiques. Lors de la formation secondaire de microplastiques, des fragments et des fibres de plastique sont continuellement produits et rejetés dans le milieu marin par dégradation photothermique, oxydation et/ou abrasion mécanique (Mailhot *et al.*, 2000 ; Wagner *et al.*, 2014).

Les microplastiques primaires et secondaires sont présents dans tous les écosystèmes marins à des concentrations variables, dont environ 245 millions de tonnes sont rejetées chaque année dans le milieu marin (Desforges *et al.*, 2014).

Des études récentes ont montré que la plupart des microplastiques, formés par des processus primaires ou secondaires, devraient continuer à se fragmenter jusqu'à ce qu'ils atteignent le stade nanométrique ($<1 \mu\text{m}$), ou qu'ils se dégradent continuellement sur une échelle de temps inconnue jusqu'à ce que le polymère soit complètement minéralisé en dioxyde de carbone, eau et biomasse (Dawson *et al.*, 2018b).

IV. Impact de la pollution plastique :

Les débris plastiques ont des effets délétères sur toutes les formes d'organismes marins, y compris les cétacés (par exemple les baleines), les oiseaux marins, les tortues marines, les poissons et les invertébrés. Ils ingèrent et accumulent des débris plastiques et des microplastiques ou sont empêtrés dans des fibres plastiques. (Van Franker, 1985 ; Ryan, 1987)

L'effet résultant des microplastiques sur les organismes aquatiques peut varier en fonction de leurs :

- (a) Caractéristiques physiques (c'est-à-dire la forme et la taille des particules).
- (b) La composition chimique (c'est-à-dire le type de polymère, les plastifiants et les polluants organiques persistants dans l'environnement).
- (c) Les communautés biologiques (c'est-à-dire la présence de microbes à leur surface).

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

La forme des microplastiques pourrait être importante pour déterminer leur impact car elle pourrait affecter leur biodisponibilité, le temps nécessaire pour traverser l'intestin et la propension à s'accumuler dans les organismes. (Botterell *et al.*, 2019, Wright *et al.*, 2013).

Parmi les très rares études visant à comparer les effets de différentes formes sur les organismes aquatiques, certaines ont trouvé que les perles étaient plus bénignes que les formes irrégulières telles que les fragments ou les fibres et pensent que cela est dû à des temps de séjour plus longs de formes irrégulières dans l'intestin ou potentiellement à un enchevêtrement, au sein de l'organisme (Gall et Thompson, 2015 ; Lu *et al.*, 2016).

Après avoir conquis pratiquement tous les écosystèmes marins du monde et compte tenu de leurs configurations structurelles et chimiques, les débris plastiques ont envahi les diverses espèces d'invertébrés et de vertébrés, provoquant une variété d'effets toxicologiques (Gall et Thompson, 2015 ; Lu *et al.*, 2016).

Les effets des déchets plastiques marins peuvent résulter soit de l'enchevêtrement, soit de l'ingestion. Par exemple, des débris macroplastiques plus gros tels que des engins de pêche perdus ou abandonnés provoqueront très probablement un enchevêtrement, tandis que des objets plus petits tels que des bouchons de bouteilles et des microplastiques peuvent être ingérés (Kühn *et al.*, 2015)

Les impacts des débris plastiques peuvent être létaux ou sublétaux et se produisent sur une hiérarchie d'échelles allant des effets sur la santé des organismes individuels, à leurs activités biologiques et altérations des assemblages et de la biodiversité et enfin aux effets sur le fonctionnement des écosystèmes (Green, 2020).

De nombreux médias grand public décrivent des baleines, des tortues et des oiseaux de mer échoués sur les plages avec des estomacs pleins de déchets plastiques, montrant la gravité de l'impact de ces déchets sur les organismes marins. Ces espèces marines charismatiques conservent une contribution significative à la société et si ces crises n'étaient pas surmontées, les générations futures pourraient ne jamais avoir une chance directe d'observer l'existence de ces animaux marins (Aanesen, *et al.*, 2015 ; Jobstvogt *et al.*, 2014)

IV.1.Enchevêtrement :

L'enchevêtrement / l'encerclement dans les fibres / colliers en plastique provoque une scoliose des os de la colonne vertébrale, des abrasions sur la peau et les tissus, une sous-

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

alimentation et une mauvaise ventilation en raison du blocage de l'œsophage et de la mort de ces espèces de poissons. (Bird, 1978).

Laist (1997) ont également signalé des raies et des roussettes non identifiées (*Squalus acanthe*) pris empêtré dans des filets maillants depuis la baie de Cape Cod.

L'enchevêtrement peut entraîner une mortalité rapide si l'animal est asphyxié (par exemple, occlusion de l'évent chez les baleines (Cassoff *et al.*, 2011), tandis qu'une mort plus lente ou une condition physique réduite peut résulter d'une blessure au tissu dermique et d'un mouvement restreint entraînant une diminution de la capacité à capturer des proies (Kühn *et al.*, 2015) ou pour échapper à la prédation (Beck *et al.*, 1991).

Le plastique est si durable dans le milieu marin que lorsqu'un animal empêtré meurt, les débris peuvent retourner à la mer avec le potentiel d'empêtrer un autre animal. Il convient de noter que les oiseaux de mer, les tortues de mer, les serpents de mer, les cétacés et les poissons marins sont de précieux indicateurs des niveaux de la pollution plastique marine, car l'échantillonnage de ces organismes peut fournir des informations fiables sur l'état de santé des écosystèmes marins (Laist, 1997 ; Campani *et al.*, 2013 ; Acampora *et al.*, 2016) (Fig. 8).



Figure 8. Une tortue coincé dans des filets de pêche et des plastiques (source : tortue filet de pêche : l'homme contre la mer) auteur : anonyme(2010)

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

Il existe de nombreuses études et revues sur les ingestions de débris plastiques et l'enchevêtrement dans les sacs plastiques, les engins de pêche (filets et cordes) et les cordes en fibre :

- Des dauphins (Denuncio *et al.*, 2011; Benedetto et Ramos, 2014) ;
- Des Scellés (Bravo Rebolledo *et al.*, 2013 ; Waluda et Staniland, 2013 ; Lawson et coll., 2015 ; Cosgrove *et al.*, 2016) ;
- Baleine (Jacobsen *et al.*, 2010 ; Stephanis *et al.*, 2013; Baulch et Perry, 2014 ; Unger *et al.*, 2016) ;
- Serpent de mer (Udyawer *et al.*, 2013) et
- Lion de mer (Hamer *et al.*, 2013 ; Page et al., 2004), entraînant une augmentation de la morbidité et de la mortalité de ces animaux marins.

IV.2.Ingestions :

Carpentier et al. (1972) ont écrit le premier rapport sur l'ingestion de plastique par les petits poissons marins, sale (*Myoxocephalus aenus*), plie rouge (*Pseudopleuronectes americanus*), perche blanche (*Roccus americanus*), argentés (*Ménidies ménidies*) et chaetognath (*Sagitta elegans*).

Ils ont observé un pourcentage variable d'occurrence de sphérules en plastique avec des PCB dans l'intestin des stades larvaire et adulte des poissons étudiés. Ils ont supposé que les effets de l'ingestion de sphérules de plastique seules ou avec des PCB peuvent entraîner un blocage intestinal, une croissance médiocre et la mortalité (Barnesetal, 2009)

Des rapports scientifiques ont montré que les chercheurs utilisent de plus en plus les espèces marines comme organismes sentinelles pour surveiller la pollution plastique marine (Gall *et al.*, 2015 ; Bour et al., 2018 ; Dawson *et al.*, 2018 a,b).

Ils trouvent que le plastique ingéré bloquait le flux de matières alimentaires dans le tube digestif, entraînant une famine accrue, des potentiels d'alimentation et une digestion compromis.Par conséquent, augmentation de la morbidité et de la mortalité (Van Franeker, 1985 ; Ryan, 1987) (fig9).



Figure 9.ingestion du plastique par des poissons marins. (Source : poisson plein de plastique : les microplastiques) auteur : anonyme (2018)

De plus, des études récentes ont révélé que l'ingestion de plastique par la faune marine peut non seulement augmenter les traumatismes physiques chez ces animaux. Mais, elle peut également augmenter le risque d'exposition aux produits chimiques organiques (plastifiants plastiques) ; aux métaux toxiques et aux agents pathogènes (microbiens et invertébrés) via l'absorption ou la sorption des produits chimiques et les agents pathogènes des débris de plastique (Teuten *et al.*, 2009 ; Reisser *et al.*, 2014 ; Oberbeckmann *et al.*, 2015 ; Jasna *et al.*, 2018 ; Jeong *et al.*, 2018).

Romeo *et al.*, (2015) ont étudié 123 grands poissons pélagiques, 56 espadons (*Xiphias gladius*), 36 thons rouges (*Thunnus thynnus*) et 31 germons (*Thunnus alalunga*), capturés en mer Méditerranée entre 2012 et 2013, pour la présence de débris de plastique dans l'estomac. Ils ont observé que 18,2 % du contenu de l'estomac contenaient différentes tailles de plastiques ingérés.

Des études plus récentes ont documenté des fréquences variables d'ingestion de microplastiques dans différents environnements marins du monde chez différentes espèces de poissons (Alimbaa et Faggioc, 2019).

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

Bellas *et al.*, (2016) ont montré que trois aiguillat commun (*Scyliorhinus canicule* ; *Merlu européen*, *Merluccius merluccius*) et rougets (*Mullus barbatus*) commercialement importantes des côtes espagnoles de l'Atlantique et de la Méditerranée abritaient différentes quantités et tailles de plastiques.

Les plastiques marins sont fréquemment ingérés par les espèces marines, ce qui peut avoir un impact sur la chaîne alimentaire des stocks de poissons et de crustacés et sur leurs proies en diminuant leur reproduction, leur croissance et leur niveau de population (Galloway *et al.*, 2017).

A terme, ces espèces marines contaminées peuvent être consommées par les communautés sociales en tant que fruits de mer et cela affecte indirectement le risque pour la santé humaine. La consommation de pollutions organiques persistantes toxiques entrant dans la composition des polymères (c'est-à-dire les plastifiants, les biocides et les retardateurs de flamme) fait peser un risque supplémentaire sur les communautés sociales (Rochman, *et al.*, 2015)

L'industrie de la pêche et de l'aquaculture est très fragile car la productivité, la viabilité, la rentabilité et la sécurité sont affectées par les déchets plastiques présents dans l'écosystème marin (Rochman *et al.*, 2015)

IV.3.Loisirs :

Malgré cela, le service écosystémique a signalé l'impact négatif substantiel des déchets plastiques sur les loisirs expérientiels où les côtes sont exposées au plastique. Cela contribue directement aux coûts économiques impactés par ces déchets plastiques notamment dans le processus de nettoyage pour l'écosystème (World Health Organization, 2003).

La présence de déchets plastiques sur le rivage peut être l'une des principales raisons pour lesquelles les visiteurs passeront moins de temps dans ces environnements ou éviteront certains sites, diminuant ainsi l'économie des revenus du tourisme (Hartley *et al.*, 2013)

IV.4.Autres :

D'autres conséquences directes causées par la présence de déchets plastiques sont une gamme de blessures inattendues (par exemple, des débris pointus, empêtrés dans des filets et l'exposition à des articles insalubres) (Kirstein *et al.*, 2016 ; Wyles *et al.*, 2016)

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

Enfin, il existe des preuves que les débris plastiques pourraient altérer les processus écosystémiques tels que la productivité primaire et les cycles biogéochimiques et, à leur tour, affecter le fonctionnement de l'écosystème (Galloway *et al.* , 2017) (Fig.10). Très peu d'études ont tenté d'évaluer ces effets plus larges.

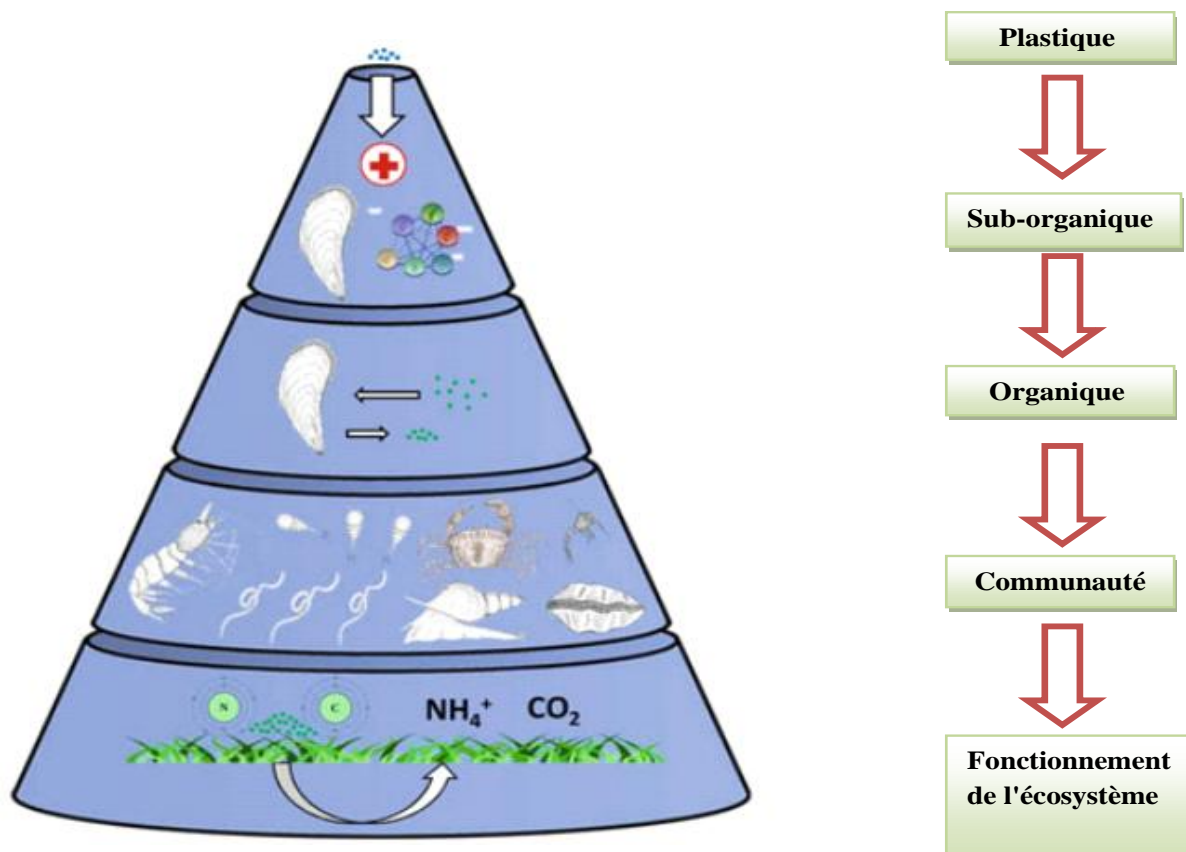


Figure 10. Impacts hiérarchiques des débris plastiques dans les écosystèmes aquatiques.

Explication du figure 10: (a) : effets sous-organismes sur la santé des organismes individuels. (b) : effets sur le fonctionnement biologique (par exemple, taux d'alimentation, respiration, taux de reproduction) des organismes qui pourraient entraîner des effets plus larges sur les populations. (c) : des altérations de la structure ou de la composition des assemblages et (d) : les altérations des processus écosystémiques (par exemple, la productivité primaire, le cycle des éléments nutritifs) qui ont des conséquences plus larges sur le fonctionnement de l'écosystème.

V. Les effets de toxicité du plastique :

V.1. Effets de toxicité interactive entre les microplastiques et les contaminants marins

Un autre problème important auquel sont confrontés les biologistes et toxicologues marins mondiaux est de comprendre les mécanismes de la toxicité des microplastiques en

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

conjonction avec des additifs et / ou des contaminants chimiques absorbés (Nakashima *et al.*, 2012 ; Besseling *et al.*, 2013 ; Reisser *et al.*, 2014 ; Oberbeckmann *et al.*, 2015 ; Rani *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2017 ; Jasna *et al.*, 2018 ; Jeong *et al.*, 2018 ; Turner, 2018)

Ces additifs et contaminants chimiques absorbés, qui comprennent les polluants organiques persistants (POP), les métaux lourds et les agents pathogènes, ont fait l'objet de nombreux rapports (Nakashima *et al.*, 2012 ; Besseling *et al.*, 2013 ; Reisser *et al.*, 2014 ; Oberbeckmann *et al.*, 2015 ; Rani *et al.*, 2017 ; Wang *et al.*, 2017 ; Jasna *et al.*, 2018 ; Jeong *et al.*, 2018 ; Turner, 2018).

Pourtant, (Rochman *et al.*, (2014) ont montré que l'absorption de produits chimiques rejetés par les plastiques ne semble pas avoir d'effets significatifs sur le biote marin. Le risque d'ingestion de ces contaminants avec les microplastiques a provoqué certains chercheurs visant à comprendre les effets individuels ou interactifs des microplastiques et des produits chimiques adsorbés chez les espèces marines.

Besseling *et al.*, (2013 a fourni la première preuve dans une étude expérimentale contrôlée qui a montré une corrélation positive entre la concentration de microplastiques de polystyrène et une bioaccumulation significative de PCB et de plusieurs congénères individuels dans Port de plaisance d'Arénicola. Cela a entraîné une perte de poids et une réduction de l'activité alimentaire et de la condition physique des personnes exposées.

Rainieri *et al.*, (2018) ont exposé des poissons zèbres à des aliments supplémentés en microplastiques et sorbés avec des mélanges de PCB, de composés perfluorés et de méthylmercure pendant 21 jours. Ils ont observé que les microplastiques combinés et les contaminants absorbés altéraient de manière significative l'homéostasie dans le foie, le cerveau, l'intestin et les muscles que les microplastiques ou les contaminants seuls.

Les preuves ici suggèrent que les effets interactifs entre les combinaisons de microplastiques et de contaminants chimiques peuvent augmenter les effets néfastes des microplastiques.

V.2.Implication du stress oxydatif en tant que mécanismes possibles de la toxicité induite par les microplastiques :

Les rapports selon lesquels le polystyrène est capable de provoquer un stress oxydatif chez *D. rerio* (Lu *et al.*, 2016) et *C.elegans* (Lei *et al.*, 2018) suggère que la toxicité induite par les microplastiques de taille nanométrique est due à la formation de radicaux libres. Ces radicaux, qui peuvent provenir de molécules d'oxygène et/ou d'azote (espèces réactives de

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

l'oxygène, ROS), lorsqu'ils sont surproduits, peuvent altérer l'homéostasie physiologique des composants cellulaires en supprimant l'activité des systèmes antioxydants (stress oxydatif). La production écrasante de ROS (stress oxydatif) s'accompagne généralement de dommages aux macromolécules cellulaires, notamment l'ADN, les glucides, les lipides et les structures protéiques.

Ces dommages peuvent être associés à une instabilité du génome, à des altérations biochimiques et physiopathologiques et à la carcinogenèse.

Aussi, dans une autre étude, (Tang *et al.*, 2018) ont montré que l'exposition aux microplastiques activait la réponse au stress (stress oxydatif) chez *P. damicornis*, réprimait la détoxification et le système immunitaire via les voies de signal JNK et ERK.

Ces résultats ont confirmé que le stress oxydatif est un mécanisme majeur impliqué dans la toxicité induite par les microplastiques dans les organismes (Lu *et al.*, 2016)

V.3. Autres effets toxiques :

Des études évaluent actuellement les impacts des microplastiques sur les processus métaboliques généraux du corps. (Gardon *et al.*, 2018) ont exposés des huîtres (*Pinctada margaritifera*) au polystyrène pendant 2 mois et suivi des impacts du polystyrène sur la physiologie globale de l'animal via l'ingestion et le rythme respiratoire, l'efficacité d'assimilation sur une mesure métabolique pour déterminer le bilan énergétique individuel et les potentiels de reproduction. Le polystyrène a causé une diminution significative de l'efficacité d'assimilation et de la marge de croissance des animaux exposés.

Dans le rapport de (Tallec *et al.*, 2018) dans laquelle des particules de polystyrène de tailles et de fonctionnalisations variables affectent les trois étapes clés de la reproduction (fécondation, embryogenèse et métamorphose) des huîtres du Pacifique (*Crassostrea gigas*), les nanoplastiques ont considérablement réduit le succès de la fécondation et le développement embryo-larvaire avec de nombreuses malformations qui culminent avec un arrêt total du développement chez les huîtres exposées.

V.4. Mécanismes de la toxicité induite par les microplastiques chez les espèces marines :

Les microplastiques sont facilement ingérés par les planctons qui peuvent servir de voie de transfert vers les consommateurs secondaires et tertiaires dans la chaîne alimentaire marine avec des conséquences éventuelles sur les humains, les consommateurs finaux. Il est

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

important de souligner que plus la taille des microplastiques est petite, plus les conséquences toxicologiques sont importantes (Browne *et al.*, 2008).

Un large éventail d'organismes marins (invertébrés et vertébrés) ingère des microplastiques principalement lors de la recherche de nourriture. Jusqu'à présent, la plupart des rapports scientifiques disponibles se concentraient sur l'évaluation des microplastiques accumulés (> 1 mm) dans l'intestin des espèces marines après ingestion (Derraik, 2002) et la capacité de déféquer principalement via les matières fécales (Eriksson *et al.*, 2003).

Des études antérieures ont rapporté que le blocage du tube digestif qui conduit à la famine et à la suffocation est la principale cause de morbidité et de mortalité induites par les plastiques chez la plupart des vertébrés marins (Laist, 1997 ; Provencher *et al.*, 2014).

V.5. Mécanismes d'accumulation et de translocation des microplastiques chez les espèces marines :

(Browne *et al.*, 2008) ont utilisées des moules (*Mytilus edulis*), comme bio-indicateur pour étudier les mécanismes d'accumulation et de toxicité des microsphères de polystyrène suite à son ingestion. Ils ont observés après 12 heure suivant l'exposition des moules aux microsphères. Ces derniers s'accumulaient dans la cavité intestinale et les tubules digestifs. En l'espace de 3 jours, le polystyrène est passé de l'intestin au système circulatoire.

Ils ont également montré que l'abondance de microplastiques était la plus élevée après 12 jours et diminuait par la suite.

De plus, les particules plus petites étaient plus abondantes que les particules plus grosses, ce qui indique que plus les particules sont petites, plus le potentiel d'accumulation dans les tissus est rapide.

V.6. Effet des microplastiques sur les algues :

(Waller *et al.*, 2017) ont rapporté que même les zones les moins peuplées et les plus inaccessibles, comme la région de l'Antarctique, sont également contaminées par des microplastiques.

Les particules microplastiques contiennent des additifs nocifs et peuvent absorber des composés dangereux tels que les polluants organiques et les métaux lourds ainsi qu'envahir la chaîne alimentaire au niveau des micro-organismes ou des petits animaux en raison de leur petite taille et de leurs propriétés physiques (Law, 2017)

Chapitre 2 : la pollution des eaux marines par le plastique

En étudiant l'influence des microplastiques sur la croissance des *Spirulina sp.* (Khoironi, *et al.*, 2019) ont rapporté que plus la concentration de microplastiques était élevée, plus le taux de croissance des microalgues était faible.

En effet, la présence de microplastiques en culture peut provoquer des effets d'ombrage qui conduisent à une intensité lumineuse réduite et affectent la photosynthèse des microalgues (Yurtsever *et al.*, 2017)

Cependant, dans une recherche de Zhang *et al.*, 2017 ; l'impact négatif des microplastiques sur les microalgues n'était pas dû à l'effet d'ombrage, mais à l'interaction entre les deux telles que l'agrégation et l'adsorption. Ceci explique que les effets des microplastiques sur les microalgues dépendent de la granulométrie des microplastiques.

Selon Liu *et al.*, 2020, les microplastiques de plus grande taille ont causé de graves impacts en bloquant le transport de la lumière et en affectant la photosynthèse tandis que les microplastiques de plus petite taille ont détruit la paroi cellulaire des microalgues en absorbant à sa surface.

Au contraire, Canniff *et al.*, 2018) ont rapporté que *Raphidocelis subcapitata* a connu une croissance plus élevée dans les milieux d'exposition contenant des microbilles de plastique (63e75mm) que le témoin.

De plus, les découvertes de Chae *et al.*, 2019 ont montré que la croissance cellulaire et l'activité photosynthétique des microalgues marines *Dunaliella salina* ont été promues sans influence sur la morphologie cellulaire lors de l'exploration de l'impact des microplastiques, qui étaient plus gros que les cellules d'algues (environ 200mm de diamètre).

La croissance favorisée était probablement due aux traces de concentrations d'additifs chimiques qui pourraient être lessivés des microplastiques tels que les stabilisants, les phtalates et les perturbateurs endocriniens (Chae *et al.*, 2019)

Cependant, il devrait y avoir une enquête pour savoir si les algues utilisent le microplastique comme source de carbone pour la croissance.

En bref, davantage études sont nécessaires sur l'impact des microplastiques sur les microalgues qui jouent un rôle crucial en tant que producteurs primaires des écosystèmes (Chae *et al.*, 2019)



**Chapitre III :
la dégradation
des plastiques**

I.1 Dégradation du plastique :

Les polymères ont une liaison très forte, il est très difficile de rompre cette liaison, mais de tels traitements peuvent augmenter le taux de dégradation. Les traitements thermiques tels que l'incinération, la pyrolyse et la gazéification sont soumis à une dégradation thermique, mais des traitements tels que l'incinération libèrent des gaz nocifs, tels que les dioxines et les furanes, qui sont signalés comme la principale menace pour les êtres humains et l'environnement (Kawai, 1995 ; Olayan *et al.*, 1996).

Le processus de dégradation catalytique dépend de l'utilisation d'un tel catalyseur qui améliore la vitesse de biodégradation et réduit le temps normalement requis dans d'autres traitements. Le déchiquetage de la taille du polymère est l'une des méthodes utiles dans le traitement de ces polymères pour des traitements ultérieurs (Gu *et al.*, 2000a)

I.1.1 Les Facteurs influençant la dégradation :

La dégradation est influencée d'une part par la nature chimique, le poids moléculaire, la densité, l'épaisseur, la morphologie des polymères, du pH, de la température, de l'humidité et du niveau d'oxygène de l'environnement (Emadian *et al.*, 2017) (Fig.11).

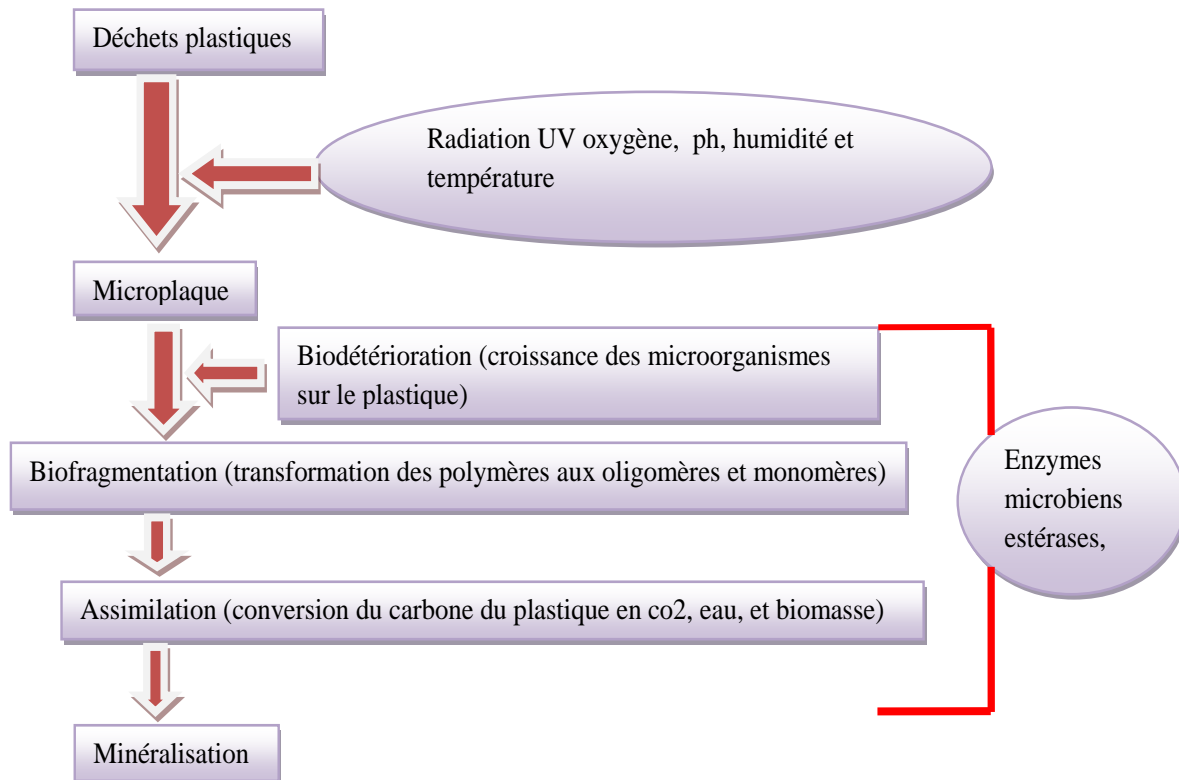


Figure 11. Représentation schématique de différentes étapes de la biodégradation des plastiques.

Explication de la figure 11 : La biodétérioration implique des altérations de produits chimiques et physiques du plastique par la croissance des microorganismes dans les plastiques. La biofragmentation implique la transformation des polymères vers des oligomères et des monomères. Dans l'étape d'assimilation, les microorganismes transforment le carbone du plastique en CO₂, de l'eau et de la biomasse. La biodégradation des polymères est influencée par la nature chimique des polymères, du pH, de la température, de l'humidité et du niveau d'oxygène de l'environnement

D'autre part le type d'inoculation, le prétraitement appliqué et le temps sont des facteurs importants. Les micro-organismes hétérotrophes ciblent particulièrement les plastiques car leur substrat fait partie de la catégorie des polymères (Pospisil *et al.*, 1997).

Lors de la fabrication du polymère, certains additifs seront ajoutés pour une résistance supplémentaire. Il n'est pas possible de le dégrader complètement, à cette fin, il est d'abord décomposé en monomère, ce qui le rend beaucoup plus facile pour les micro-organismes de les consommer (Gu *et al.*, 2000b ; Swift, 1997)

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

Afin de convertir un polymère en monomère, certains prétraitements sont nécessaires (Swift, 1997).

Ils peuvent être réalisés chimiquement en utilisant de l'acide nitrique ou tout acide approprié pour briser leur liaison chimique ainsi que physiquement comme sous l'action de la lumière du soleil, des rayons UV et la chaleur (Pospisil *et al.*, 1997).

Par ailleurs, le poids moléculaire est le facteur déterminant du polymère à dégrader par les micro-organismes. Plus le poids moléculaire est élevé, plus il sera difficile à biodégrader (Palmisano et Pettigrew, 1992)

Au cours du processus de dégradation, les exoenzymes des micro-organismes jouent un rôle vital dans la décomposition des structures polymères complexes qui modifient les polymères en courtes chaînes monomères telles que les oligomères, les dimères et les monomères (Palmisano *et al.*, 1992).

Ces composés plus petits sont adéquats pour traverser la membrane cellulaire des micro-organismes qui est utilisée comme source de carbone et d'énergie. Ce processus est appelé dépolymérisation (Palmisano *et al.*, 1992).

I.1.2 Types de dégradation :

La dégradation du plastique nécessite de nouvelles solutions viables capables de faire face aux problèmes de gestion, de traitement et d'élimination des déchets (Karaduman, 2002).

L'une des meilleures solutions possibles est la dégradation du polymère. Une action chimique, physique et biologique qui transforme le polymère plastique en modifiant sa liaison chimique, c'est-à-dire que la transformation chimique est appelée dégradation du polymère (Pospisil *et al.*, 1998).

Selon la nature des agents responsables, les dégradations des polymères ont été classées en dégradation photo-oxydante, dégradation induite par l'ozone, dégradation thermique, dégradation mécano-chimique, dégradation catalytique et dégradation biologique (Grassie et Scott, 1985). (Fig12)

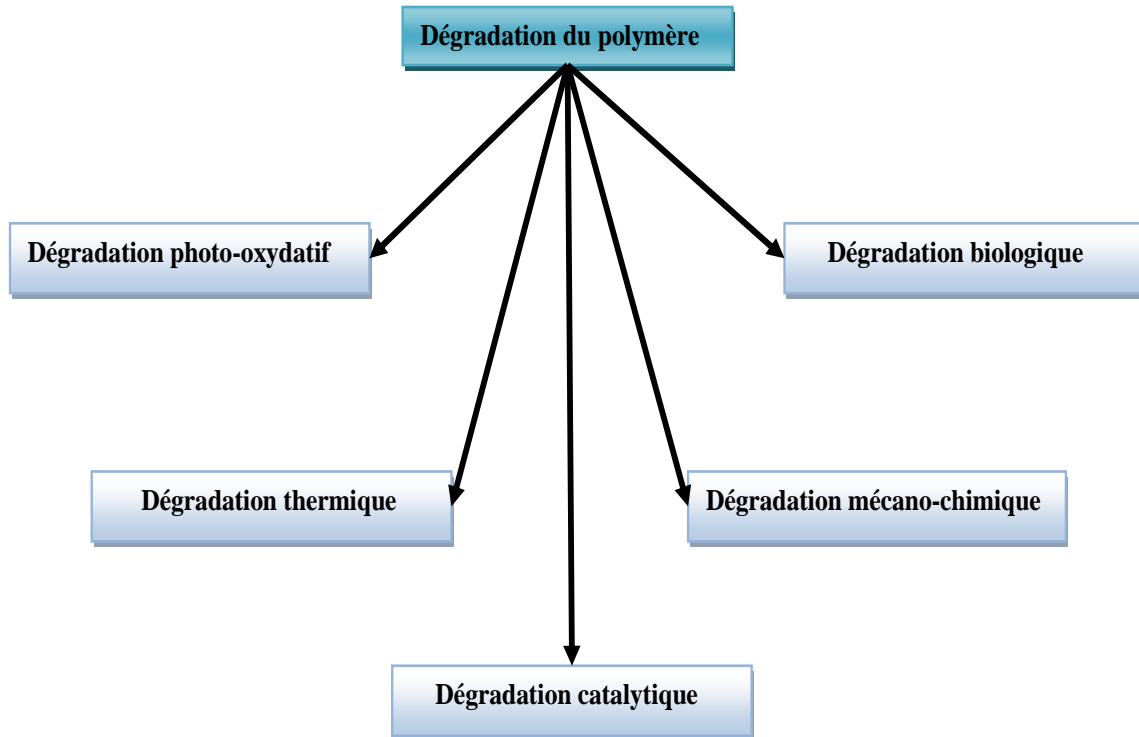


Figure 12. Types de dégradation des polymères

Plusieurs facteurs abiotiques tels que le rayonnement UV, l'oxygène et la température sont impliqués dans la dégradation incomplète et prolongée des plastiques, tandis que les micro-organismes sont impliqués dans la dégradation totale des plastiques (Yuan *et al.*, 2020).

Différents polyesters tels que la polypropiolactone et la polycaprolactone sont dégradés par l'enzyme lipase isolée de *Rhizopus Delemar* (Maity *et al.*, 2021).

Les systèmes conventionnels largement adoptés pour l'élimination du plastique dans le scénario existant sont le recyclage, l'incinération et les décharges. Cependant, les méthodes, telles que le recyclage, ont des limites car au-delà d'une certaine limite, les plastiques ne peuvent pas être recyclés. L'incinération des plastiques produit d'importants polluants atmosphériques, tels que les dioxines et les furanes. (Kawai, 1995 ; Olayan *et al.*, 1996)

Ces polluants atmosphériques sont très dangereux et peuvent entraîner des risques majeurs pour la santé, notamment affections cancérogènes (Commission européenne, 2011). (Fig. 13) Configure les meilleures options de traitement appropriées par rapport aux méthodes conventionnelles.

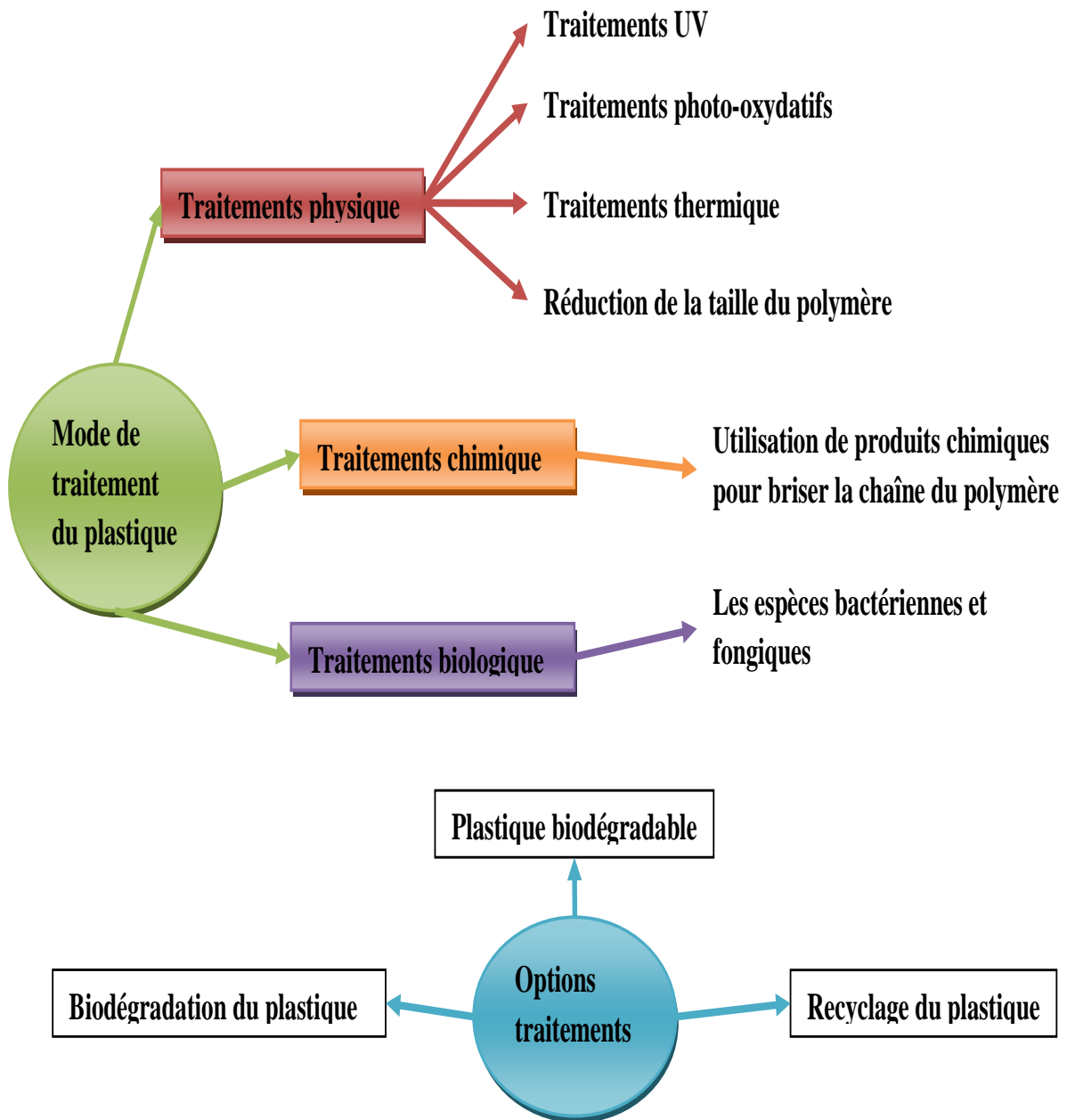


Figure 13. Méthodes conventionnelles pour traiter les déchets plastiques avec des alternatives de traitement appropriées.

I.2 Dégradation biologique du plastique ou biodégradation :

La biodégradation est le processus par lequel les organismes vivants sont responsables de la dégradation des substances organiques.

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

La biodégradation peut être obtenue par l'une des manières suivantes (Gu *et al.*, 2000a) et également présenté schématiquement dans (Fig. 14)

- Aérobie Lorsqu'il est effectué dans la nature sauvage, produit du dioxyde de carbone et de l'eau en présence d'oxygène.
- Anaérobie Lorsqu'il est effectué dans des décharges et des sédiments, produit du dioxyde de carbone, de l'eau et du méthane en l'absence d'oxygène.
- Semi-aérobie Lorsqu'elles sont réalisées dans des composts, avec ou parfois sans oxygène.

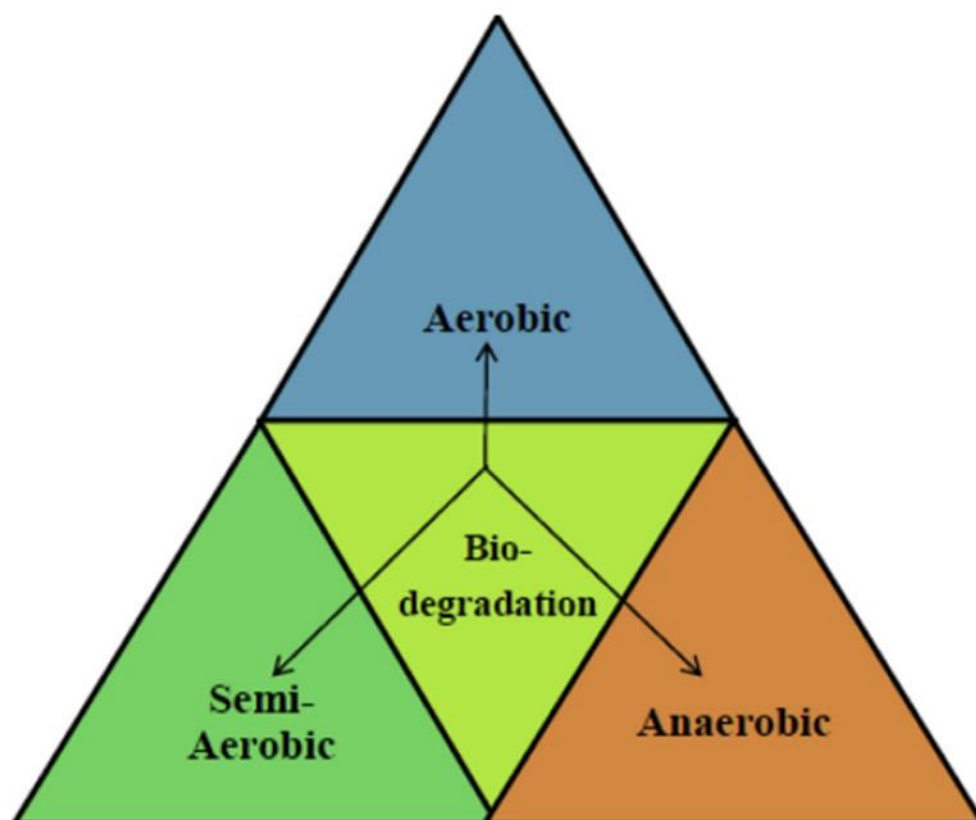


Figure 14. Voie de biodégradation pour traiter les plastiques.

I.2.1 Dégradation microbienne :

Elle est définie comme une activité microbienne dans laquelle les micro-organismes sécrètent des enzymes dégradant le polymère qui entraînent la décomposition du polymère (Kale *et al.*, 2015).

Ces derniers temps, une grande attention a été accordée au développement de technologies qui utilisent des voies microbiennes pour la dégradation des plastiques, en raison de leurs avantages évidents par rapport à d'autres systèmes conventionnels de traitement des déchets plastiques. En raison de la nature récalcitrante des plastiques, leurs problèmes de

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

traitement, d'élimination et de gestion ont retenu l'attention des scientifiques car ils ont des effets délétères sur l'environnement (Shah *et al.*, 2008).

Les bactéries et les champignons sont impliqués dans ce processus qui est capable de dégrader à la fois le plastique naturel et synthétique. La biodégradation du polymère se produit dans différentes conditions environnementales qui conviennent aux micro-organismes pour dégrader la matière plastique (Moharir et Kumar, 2019).

(Volova *et al.*, 2010) ont étudié la biodégradabilité des PHA dans l'eau de mer naturelle. Comme on pouvait s'y attendre, la biodégradation des matériaux s'est avérée influencée par la forme du polymère, la technique de préparation et la composition chimique.

En effet, les taux de biodégradation des films polymères, en forme de disques (diamètre de 30 mm et épaisseur de 0,1 mm), dans l'eau de mer se sont révélés supérieurs à ceux des pastilles compactées (diamètre de 10 mm et épaisseur de 0,5 mm).

Le comportement de dégradation différent a été pris en compte dans les différentes structures et surfaces des échantillons qui influencent l'adhésion des micro-organismes et leur activité enzymatique. Lors de la dégradation, il y a eu une perte de masse et de poids moléculaire de l'échantillon due à la scission des chaînes polymères, alors qu'aucune altération du degré de cristallinité des deux PHA n'a été enregistrée, puisque la phase amorphe et la phase cristalline étaient également désintégrées.

I.2.1.1 Les différents microorganismes :

Les organismes microbiens sont impliqués dans le métabolisme des produits chimiques dans les différents écosystèmes à travers leurs enzymes (Urbanek *et al.*, 2018).

En effet, les bactéries : *Arthrobacter*, *Corynebacterium*, *Micrococque*, *Pseudomonas*, *Streptomyces*, et *Rhodococcus* sont impliqués dans la biodégradation des plastiques (Pathak *et al.*, 2017).

Par ailleurs, les Champignons tels qu'*Aspergillus*, *Clonostachys*, *Fusarium*, *Doratomyces*, *Lecanicillium*, *Cladosporium*, *Thermomyces*, *Verticillium*, *Penicillium*, *sable Mortierelle* sont impliqués dans la biodégradation des biopolymères.

Les principaux groupes d'enzymes microbiennes responsables de l'élimination de la plupart des contaminants nocifs dans l'environnement sont des hydrolases, des

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

oxydoréductases, des déhalogénases, des oxygénases et des transférases (Saravanan *et al.*, 2021).

Les hydrolases et oxydoréductases de microorganismes sont impliquées dans la dégradation de polluants hydrophobes tels que des additifs plastiques (Carmen, 2021).

Phazs Dépolymérasés de *Comamonas Testosteroni* Ym1004, *Schlegelella sp. Kb1a*, *Thermodépolymérins de Schlegelella*, *Streptomyces sp. EN 1et thermophilus thermosHB8* participent à la dégradation des polymères des déchets industriels en présence de pH et de températures élevées (Urbanek *et al.*, 2020) (Tableau 3).

Tableau 3. liste de souches microbiennes impliquées dans la dégradation de différents types de plastiques dans l'écosystème marin (Manfra *et al.*, 2021)

Plastique	Micro-organismes	Les références
PCL	<i>Pseudomonasp.</i> , <i>Moritella</i> , <i>Shewanella</i> , <i>Psychrobacter</i>	Sekiguchi et al. (2009) Sekiguchi et al., 2010
	<i>Colwellia</i> , <i>Marinomonas</i> , <i>Pseudoalteromonas</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Shewanella</i>	Pathak et Navnett, 2017
	<i>Clonostachys Rosea</i> , <i>Trichodermitesp.</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Rhodococcus</i>	Pauli et al. (2017)
Densité linéaire basse polyéthylène	<i>Vibrio Alginolyticus</i>	Raghul et al. (2014)
	<i>Vibrio Parahaemolyticus</i>	
	<i>Bacillus cereus</i> ,	Ganesh Kumar et al. (2020)
	<i>Bacillus Sphericus</i>	
	<i>Rhodobacter</i> (Alphaproteobacteria), <i>Alcanivorax</i> , <i>Marinobacter</i> (Protéobactéries gamma), <i>Arénibacter</i> , <i>tenacibaculum</i> (Bactérioides)	Purohit et al. (2020)
PHB	<i>Aspergillus Clavatus</i> , <i>Alcaligènes Faecalis</i> AE122, <i>Streptomyces</i> sp. Sng9	Ganesh Kumar et al. (2020)
PUR	<i>Pseudomonas chlororaphis</i>	Ganesh Kumar et al. (2020)
PET & PP	Bactériettes (<i>Crocinitomix</i> , <i>Owenweeksia</i> , <i>fluviicola</i> , <i>Tenacibaculum</i>), Gammaproteobacteria (<i>Acinetobacter</i>), Verrucomicrobia (<i>Persicirhabdus</i>)	Oberbeckmann et al. (2016)
Animal de compagnie	Alcanivocareacée (<i>Alcanivorax</i>), Arenicellaceae, Cryomophaceaea, Erythrobracter, Oleiphilaceae (<i>Olephilus</i>)	Pinto et al. (2019)
PVC	Alteromonadaceae (<i>Alteromonas</i>), Cellvibrionaceae, Oceanospirillaceae	Pinto et al. (2019)

I.2.1.2 Dégradation microbienne des polymères synthétiques :

- **Le Polyéthylène téréphtalate (PET)**

Le polyéthylène téréphtalate (PET) utilisé dans l'industrie textile c'est un polymère d'acide téréphtalique aromatique et d'éthylène glycol. Le monomère de PET est considéré comme un bis (2-hydroxyéthyl) téréphtalate (BHET).

Les Actinomycètes sont principalement impliquées dans la dégradation potentielle de PET (Danso *et al.*, 2019). Les genres bactériens *Thermobifida* et *Thermomonospora* ont des enzymes de dégradation du PET tels que des cutinases (CE 3.1.1.74), des lipases (CE 3.1.1.3) et des carboxylestérases (CE 3.1.1.1) (Wei *et al.*, 2014).

Pseudomonas Mendocina, *Fusarium Solani*, et *Thermomyces insolens* sont également impliqués dans la dégradation du PET en utilisant l'hydrolase de type cutinase (Ru *et al.*, 2020).

- **Le Polyuréthane (PUR)**

La bactérie *Pseudomonas protegens* (PF-5) a des gènes lipases tels que Puda et PueB qui sont impliqués dans la dégradation des polyuréthanes (PUR) (Hung *et al.*, 2016).

Les Champignons Comme *Aspergillus fumigatus*, *Aspergillus Flavus*, *Aspergillus Tubingensis*, *Candida Ethanolica*, *Candida Rugosa*, *Cladosporium Asperulatum*, *Cladosporium Pseudocladosporioine*, *Tenuissum Tenuissum*, *Cladosporium Montecillanum*, *Penicillium Chrysogenum*, et *Fusarium Solani* contribuent de manière significative dans le métabolisme de PUR (Danso *et al.*, 2019).

Acinetobacter Calcoacéticus, *Bacillus Subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, *P. aeruginosa*, *Corynebacterium sp.*, et *Comamonas acidovorans* utilisent le PUR comme source de carbone et d'azote pour leur croissance (Mohan *et al.*, 2020).

- **Le Polyéthylène (PE)**

La présence de microorganismes dégénéralants de polyéthylène (PE) est rapportée dans les boues activées, le sol, l'eau de mer et le compost (Montazer *et al.*, 2020).

Il est principalement métabolisé par des genres bactériens gram-négatif tels que *Pseudomonas*, *Ralstonia*, et *Stenotrophomonas* ainsi que des genres bactériens à gram-positifs tels que *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Staphylococcus*, et *Streptomyces* (Resetpo *et al.*, 2014).

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

Des genres fongiques telles que *Aspergillus*, *Cladosporium*, et *Penicillium* sont également impliqués dans la dégradation de PE (Resetpo et al., 2014).

- **Polyamide (PA) Polyamide**

(PA) tel que l'acide 6-amino-oxanoïque et 8-caprolactame présents en nylon servent de source de carbone et d'azote pour les bactéries telles qu'*Arthrobacter sp.* souche ki72 (Takehara et al., 2017).

Bacillus cereus, *Bacillus Sphaericus*, *Brevundimonas vesicularis*, et *Vibrio Furtiissii* sont impliqués dans le Métabolisme du nylon (Sudhakar et al., 2007). *Pseudomonas aeruginosa* dégrade les dimères linéaires de 6-aminohexanoate (Danso et al., 2019).

- **Polystyrène (PS)**

Les Champignons de pourriture blanche tels que *Pleurotus Ostreatus*, *Phanerochate Chrysosporium*, et *Tramètes versicolor* ainsi que les champignon de la pourriture brune *Gloeophyllum Trabeum* sont impliqués dans la dépolymérisation du PS avec la lignine (Danso et al., 2019).

Les microorganismes de sol tels que *Bacille sp. Str-yo*, *Sphingobacterium sp.*, et *Xanthomonas sp.* a montré une activité de dégradation de PS (Ru et al., 2020).

- **Chlorure de polyvinyle (PVC)**

Plusieurs champignons tels que *Aspergillus Niger*; *Aspergillus Sydowii*, *Lentinus Tiginus*, et *Phanerochète chrysosporium* est impliqué dans le métabolisme du PVC (Ali et al., 2014).

Les bactéries tels que *Acinetobacter calcoacéticus*; *Pedis acanthopleurobacter*; *Bacillus cereus*; *Bacillus Aerius*; *Bacille flexus*, *Chryséomicrobium imtechase*; *Lysinibacillus fusiformis*; *Sténotrophomonas Pavanii*, *Pseudomonas Otitidis*; et *Pseudomonas citronellolis* isolées des sols de jardin, des sites d'élimination des déchets et des environnements marins ont montré du métabolisme de BIS (2-éthylhexyle) phtalate (DEHP) (Latorre et al., 2012;Giacomucci et al., 2019;Anwar et al., 2016).

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

Tableau 4. Les des microorganismes impliqués dans la dégradation de différents types de plastiques (Chattopadhyay, 2022).

Types de plastique	Micro-organisme	Enzymes microbiennes impliquées dans la dégradation	Référence
Polyéthylène Téréphtalate (ANIMALUX)	<i>ThermoBifida</i> , <i>Thermomonospora</i>	Cutinases (CE 3.1.1.74), lipases (CE 3.1.1.3), carboxylestérases (CE 3.1.1.1)	Wei et al., 2014; Mohanan et al. (2020); Ru et al. (2020)
	<i>Thermobifida alba</i> , <i>thermobifida cellulolytica</i> , et <i>Thermomonospora Curvata</i> , <i>Thermobifida Fusca</i>		Yoshida et al. (2016)
	<i>Ideonella Sakaiensis</i> 201-F6	Tannases	Haernvall K et al., 2017
	<i>Pseudomonas Pseudoalcaligenes</i> et <i>Pseudomonas Pelagia</i>	Cutinase, lipase	Hajjghasemi et al. (2018)
	<i>Fructosivorans</i> de <i>désulfovibridio</i>	Estérases	Ru et al. (2020)
Polyuréthanes (PUR)	<i>Pseudomonas Mendocina</i> , <i>Fusarium Solani</i> , et <i>Thermomyces insolens</i>	Cuttinase	Danso et al. (2019)
	<i>pseudomonas chlororaphis</i>	PueB, Lipase Pueé	Hund et al. (2016)
	<i>Comamonas acidovorans</i> tb-35	Estérase (Puda)	Peng et al. (2014)
	<i>Pseudomonas Protegens</i> souche PF-5	Lipase (Puere et Pueb)	Danso et al. (2019)
	<i>Pseudomonas Puttida</i> , <i>Bacillus Subtilis</i> et <i>Alicyclophilus</i> <i>Aspergillus Fumigatus</i> , <i>Aspergillus Flavus</i> , <i>Aspergillus Tubingensis</i> , <i>Candida Ethanolica</i> , <i>Candida Rugosa</i> , <i>Cladosporium Asperulatum</i> , <i>Cladosporium Pseudocladosporioine</i> , <i>Cladosporium Tenuissum</i> , <i>Cladosporium Montecillanum</i> , <i>Penicillium Chrysogenum</i> , et <i>Fusarium Solani</i>	Na	
		APRÈS	
	<i>Alternaria Tenuissima</i>		Oprea et al. (2018)
	<i>Curvularia sénégalensis</i>	Estérase	ru et al. (2020)
	<i>Acinetobacter Calcoaceticie</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> , <i>P. aeruginosa</i> , et <i>Corynebacterium</i> sp.,		Mohanan et al. (2020)
		APRÈS	
Polyéthylène (PE)	<i>Pseudomonas</i> , <i>Ralstonia</i> , <i>Sténotrophomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Rhodococcus</i> , <i>Staphylococcus</i> , <i>Streptomyces</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Cladosporium</i> , et <i>Pénicillium</i>		Resetpo-florez et coll. (2014)
		APRÈS	
	<i>Enterobacter Asburiae</i> YT1, <i>Bacillesp.</i> YP1 <i>Acinetobacter</i> sp. Souche nyz450, <i>Bacillus</i> sp. Souche NYZ451 <i>Phanerochate Chrysosporium</i>		Yang et al., 2015a
		APRÈS	
	<i>Rhodococcus Ruber</i> C208	La laccase de peroxydase manganèse (MNP)	Yin et al. (2020) ru et al. (2020) Santo et al. (2013)
		APRÈS	
	<i>Acinetobacter Pittii</i> IRN19, <i>Pseudomonas Puttida</i> IRN22, <i>P. Putida</i> LS46, et <i>Micrococcus luteus</i> irn20		Montazer et al. (2019)
		APRÈS	
	<i>Anabaena Spiroides</i> , <i>Navicula Pupula</i> , <i>Sceneesmus Dimorphus</i> <i>Bacillus cereus</i> , <i>Bacillus Sphaericus</i> , <i>Brevunonas Vesicularis</i> , <i>Vibrio Furnissii</i>		Kumar et al. (2017)
		APRÈS	
Polyamide (PA)	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	6-aminohexanoate cyclique-dimer-dimer hydrolase et un dimère 6-aminohexanoate hydrolase	Sudhakar et al. (2007)
			Danso et al. (2019)
Polystyrène (PS)	<i>Pleurotus ostreatus</i> , <i>Phanerochate Chrysosporium</i> , <i>Trametes Versicolor</i> , <i>Gloeophyllum Trabeum</i>	na	Danso et al. (2019)
	<i>Corynebacterium</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Rhodococcus</i> , <i>Xanthobacter</i>	Styrène monoxygénase, isomérase d'oxyde styrène, phénylacétaldéhyde déshydrogénase	Tischler et al. (2009)
	<i>Bacillesp.</i> Str-yo, <i>sphingobacterium</i> sp., <i>Xanthomonas</i> sp.		Ru et al. (2020) ru et al. (2020) Yang et al., 2015b AUTA et al., 2018 Jeon et Kim, 2016b
	<i>Azotobacter beijerinckii</i> hm121 <i>exiguobacterium</i> sp.	Hydroquinone peroxydase	Mohanan et al. (2020)
Polypropylène (PP)		na	
	<i>Bacillesp.</i> Souche 27, <i>Rhodococcus</i> sp. Souche 36		
	<i>Sténotrophomonas Panacihumi</i> PA3-2		
	<i>Bacille flexus</i> , <i>Pseudomonas</i> , <i>Vibrio</i> , <i>Aspergillus Niger</i>		Ali et al. (2014)
Chlorure de polyvinyle (PVC)	<i>Aspergillus Niger</i> ; <i>Aspergillus Sydowii</i> , <i>Lentinus Tiginus</i> ; <i>Phanerochète chrysosporium</i>		
	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i> ; <i>Pedis acanthopleurobacter</i> ; <i>Bacillus cereus</i> ; <i>Bacillus Aerius</i> ; <i>Bacille flexus</i> , <i>Chryseomicrobium imtechase</i> ; <i>Lysinibacillus fusiformis</i> ; <i>Sténotrophomonas Pavanii</i> , <i>Pseudomonas Otitidis</i> ; <i>Pseudomonas citronellolis</i>		Latorre et al. (2012)
			GiaComeucci et al. (2019)
			Anwar et al. (2016)

Na = information non disponible.

I.2.1.3 Dégradation des polymères biodégradables :

La biodégradation des BP a été étudiée dans différentes conditions environnementales, telles que le sol, le compost, les milieux marins et aquatiques (Emadian *et al.*, 2017).

Un aperçu des études récentes liées à la dégradation des BP principalement utilisés pour la conception de produits commerciaux est présenté dans cette section, ainsi que les méthodes d'essai standard actuellement disponibles pour évaluer la biodégradation des matières plastiques dans le milieu marin.

Selon l'environnement auquel les BP sont exposés, ils peuvent présenter des comportements et des taux de dégradation différents (Manfra *et al.*, 2021).

En effet, en milieu marin, les plastiques ne sont pas exposés aux conditions favorables à une biodégradation rapide, alors que sur les rivages, ils sont exposés aux UV, à la température, aux actions mécaniques, etc. (Fig. 15), une illustration schématique de la biodégradation du plastique par les micro-organismes est rapportée.

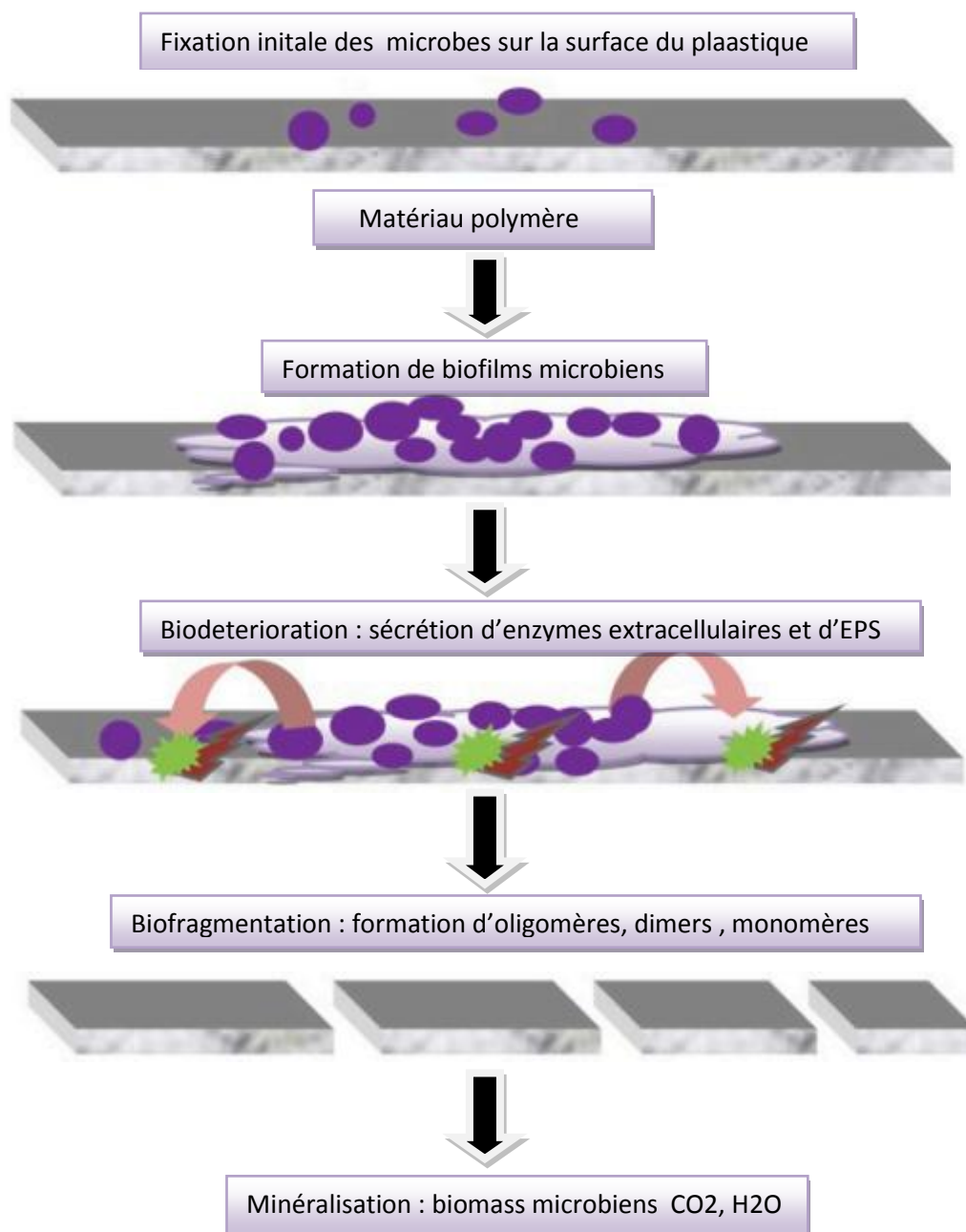


Figure 15. Illustration schématique de la biodégradation du plastique par les microorganismes (reproduite de Kumar *et al.*, 2020)

Des micro-organismes dégradant le PCL ont été trouvés dans un large éventail d'environnements marins, comme des bactéries appartenant au genre *Pseudomonas* (Molitor *et al.*, 2020). Malgré une bonne biodégradabilité dans les environnements marins signalée pour le PCL, certains fragments de PCL ont été identifiés comme des micro- et mésoplastiques polluant la mer Méditerranée (Suaria *et al.*, 2016).

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

(Thellen *et al.*, 2008) ont étudié la biodégradation en milieu marin de films de PHB et de copolymères de PHBV, dans le but d'évaluer leur applicabilité en tant qu'emballages et produits finaux en plastique couramment utilisés à bord des navires, au lieu de matériau thermoplastique non biodégradable. La biodégradation a été examinée par respirométrie (ASTM 6691, 2017) et pendant l'incubation statique et dynamique des matériaux avec et sans sédiment. Les résultats ont démontré que trois échantillons de film de PHB et trois de PHBV ont atteint plus de 80 % et 90 % de minéralisation, respectivement, après 100 jours d'incubation conformément à ASTM 6691 (2017).

Ces matériaux se sont avérés hautement biodégradables à la fois en laboratoire statique (eau de mer, 21 °C) et incubations dynamiques (système ouvert avec écoulement continu d'eau de mer 12–22°C) (Thellen *et al.*, 2008).

La dégradation des BP tels que le PLA, le PCL, le PHB et le PBSA enfouis dans le sable a été étudiée par (Coca *et al.*, 2018). Les polyesters biodégradables étaient susceptibles de se dégrader à des vitesses différentes. Même si le temps d'enfouissement court a été analysé, tous les échantillons ont montré des signaux de dégradation initiaux. En effet, des observations morphologiques d'échantillons après 35 jours d'enfouissement dans le sable ont montré que des phénomènes de dégradation de départ apparaissaient sur la surface du PLA tandis que la formation de nombreux trous d'épingle, fissures et rainures hétérogènes était observable sur les surfaces PCL, PHB et PBSA, suggérant que le taux de dégradation est différent.

Parmi les polymères testés. En fait, les auteurs ont observé que le PHB avait la perte de poids la plus élevée (15 %) après 71 jours d'inhumation, suivi du PBSA (6 %), du PCL (1,8 %) et du PLA (0,15 %) (Coca *et al.*, 2018).

I.2.1.4 Les microorganismes et la biodégradation du plastique en milieu marin :

Les microorganismes poussent sur le plastique comme une fine couche de biofilm qui s'appelle 'plastisphère' (Kirstein *et al.*, 2019).

Le plastisphere est représenté par des cyanobactéries, des bactéries, des champignons et des protozoaires. La dégénérescence physique et chimique des plastiques est améliorée par les enzymes extracellulaires sécrétées par les microbes dans le plastisphere (Zettler *et al.*, 2013).

Ensuite, ils sont convertis en acide benzoïque, alcool benzylique, benzaldéhyde, acide carboxylique, éthylène, éthylbenzène, propylène benzène, phénol, poly-β-hydroxybutyrate,

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

cétones, styrène et chlorure de vinyle, etc. qui leurs servent comme source d'énergie (Zettler *et al.*, 2013).

La formation de biofilms bactériennes sur la surface en plastique induit l'adsorption, la désorption et la dégradation du microplastique. Dans les écosystèmes marins, les microplastiques ou les particules nanoplastiques sont formés de la grande taille de plastique par l'action de facteurs biotiques et abiotiques. Plusieurs facteurs tels que la rugosité, la topographie, les interactions électrostatiques et l'hydrophobicité de plastique influent sur la fixation de microbes aux plastiques pour la formation de biofilm (Urbanek *et al.*, 2018).

Les facteurs environnementaux tels que le niveau d'oxygène, la température et la salinité contribuent également au développement du biofilm (Tender *et al.*, 2015).

Les microorganismes obtiennent une accessibilité à coloniser sur des plastiques dégradés formés en raison de l'altération (Rummel *et al.*, 2017).

Le carbone organique dissous qui est formé en raison de la libération de plastique dans l'eau de mer induit la croissance des microbes hétérotrophes (Romera-Castillo *et al.*, 2018).

Les microplastiques sont considérées comme une niche écologique de micro-organismes dans l'écosystème marin. Les exopolysaccharides (EPS) des micro-organismes induisent la fixation du biofilm à la surface du plastique et sa dégradation (Ahmed *et al.*, 2018).

Agrobacterium spp.; *Chrysobacterium spp.*, et *Flavobacterium spp.* Sont plus prédominants dans les biofilms microplastiques en polyéthylène basse densité. Les *Stramenopiles* se trouvent principalement sur les biofilms en polystyrène et en polyéthylène téréphtalate, tandis que les *viridiflantanes* et les *straménopiles* sont exclusivement trouvés sur des biofilms de polyéthylène.

Pseudomonas sp. qui a été isolé de l'eau de mer profonde de la baie de Toyama a été impliquée dans la dégradation de PCL (Sekiguchi *et al.*, 2009).

Les genres bactériens de sédiment de la mer profonde telles que *Moritella*, *Shewanella*, et *Psychrobactera* ont montré la biodégradation de Polyester PCL (Sekiguchi *et al.*, 2010).

La colonisation bactérienne du plastique de polyéthylène basse densité (LDPE) commence en début dans l'eau de mer. Ils peuvent s'adhérer à la surface de LDPE en quelques heures. (Tiwari *et al.*, 2020).

I.2.1.5 Les essais de la biodégradation du plastique par le biofilm marin :

Les bactéries et les champignons impliqués dans la biodégradation de plastique sont généralement observés dans les biofilms des sédiments marins, des décharges, des installations de traitement des eaux usées. Les plastiques biodégradables tels que les polyhydroxyalcananoates (PHA), la poly (ϵ -caprolactone) (PCL), le poly (sucome de butylène) (PBS), poly (succinate de butylène) co-butylène adipate) (PBSA) et acide polylactique (PLA) qui ont des groupes fonctionnels tels que l'amide, l'ester et l'uréthane subissent une dégradation par des enzymes microbiennes (Hou et Majumder, 2021 ; Pathak et Navnett, 2017).

La biodégradation des plastiques comprend la biohétérité ou la biotransformation, la biofragmentation et l'assimilation. La biotransformation se caractérise par des altérations du produit chimique et des propriétés physiques du plastique en raison de la croissance des microorganismes en plastique. La biofragmentation implique la transformation des polymères vers des oligomères et des monomères. Dans l'étape d'assimilation, les microorganismes transforment le carbone du plastique en CO_2 , eau et biomasse (Jacquin *et al.*, 2019).

Les biofilms formés sur des spécimens de PHA lors de leur immersion en mer de Chine méridionale ont révélé la présence d'une grande variété de bactéries hétérotrophes et de microflore fongique (Volova *et al.*, 2010).

À partir des biofilms, des micro-organismes dégradant les PHA ont été isolés (*Enterobacter sp.* (Quatre souches), *Bacillus sp.*, et *Gracili bacille sp.*). Ces espèces présentaient une activité PHA dépolymérase et la capacité de se développer en utilisant PHA comme seule source de carbone et d'énergie (Volova *et al.*, 2010).

(Deroiné *et al.*, 2015) ont observé le vieillissement naturel de films de PHBV dans l'eau de mer naturelle de la rade de Lorient (France). Des études de biodégradation du PHBV ont été réalisées dans un inoculum solide avec du sable d'estran et de l'eau de mer et, pour comprendre l'influence de la concentration bactérienne sur la cinétique de biodégradation, dans un inoculum liquide avec de l'eau de mer à deux concentrations (5% et 10%) de biofilms collectés sur les parois des bassins d'élevage. Après 180 jours d'immersion en milieu naturel, les films PHBV présentaient une perte de poids de 36% et des trous larges et profonds à leur surface.

L'érosion de surface et une diminution de l'épaisseur de l'échantillon ont mis en évidence la survenue d'attaques de micro-organismes au cours du vieillissement. La

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

dégradation enzymatique, responsable d'une dégradation plus rapide des régions amorphes. Après seulement 9 mois d'immersion dans l'eau de mer naturelle, les films de PHBV se sont complètement désintégrés. La biodégradation dans l'inoculum solide a indiqué que le polymère était presque complètement biodégradable dans le sable de l'estran après 600 jours.

L'incubation en milieu solide/ liquide a induit 90% de biodégradation du PHBV après seulement 210 jours, confirmant que les micro-organismes naturellement présents dans l'eau de mer favorisent la biodégradation du PHBV après une courte période de retard, nécessaire pour que les micro-organismes colonisent et se développent à la surface du PHBV. (Deroiné *et al.*, 2015).

L'amélioration du contact entre les microorganismes et la surface du PHBV atteinte en présence de phase liquide, a accentué la cinétique de dégradation. (Deroiné *et al.*, 2015).

Le récent rapport SAPEA (2020) sur la « biodégradabilité des plastiques en milieu ouvert », fait état d'un schéma de test à trois niveaux affiné par le projet européen Open-Bio (Lott *et al.*, 2020).

Le système comprend trois étapes :

- 1.** Une première étape, dans laquelle la biodégradabilité de la matière plastique est testée à l'échelle du laboratoire, éventuellement en utilisant de l'eau ou des sédiments réels ;
- 2.** Une deuxième étape, où le matériau subit un test de terrain dans des conditions naturelles réelles ;
- 3.** Une dernière étape, dans laquelle les tests sur la biodégradation de la matière plastique sont effectués dans des réservoirs qui simulent les conditions environnementales réelles dans des volumes plus importants par rapport aux tests en laboratoire.

Les résultats des trois étapes fournissent un ensemble de données complet sur la biodégradation des matériaux testés (SAPEA, 2020).

Une classification des méthodes d'essai de biodégradation disponibles est présentée dans le tableau suivant.

Tableau 5. Méthodes d'essai de biodégradation standard actuelles pour l'environnement marin (Manfra *et al.*, 2021)

Type d'épreuve	Type de scénario marin		
	Colonne d'eau	Fond marin	Intertidale plage
Laboratoire	ASTM D6691-17	ISO 18830:2016	ASTM D7991- 15
	ISO/FDIS 23977-1	ISO 19679:2016	ISO 22404:2019
	ISO/FDIS 23977-2		
Domaine	ISO 15314:2018	ISO 22766:2020	ISO 22766:2020
Réservoir	ISO/DIS 23832a	ASTM D7473-12 et	ISO/DIS 23832a
		WK71923, 2020a	
		ISO/DIS 23832a	

I.2.2 Dégradation du plastique par les algues :

I.2.2.1 Biodégradation du plastique par les algues et mécanisme :

Une approche possible pour atténuer la "pollution blanche" est d'identifier les algues potentielles et leurs toxines qui pourraient effectivement décomposer biologiquement les matériaux polymères. (Bhuyar *et al.*, 2018). Par rapport aux systèmes bactériens qui peuvent être considérés comme un polluant biologique en raison des endotoxines et de l'exigence d'une source riche en carbone pour leur croissance, les microalgues sont un candidat potentiel car elles ne contiennent pas d'endotoxines et les sources de carbone organique ne sont pas nécessaires dans des conditions photoautotrophes. (Yan *et al.*, 2016)

De plus, *I. sakaiensis* et d'autres microorganismes utilisés pour la génération de PETase ne s'adaptent pas bien aux habitats marins où se produit l'accumulation de la plupart des déchets plastiques. (Tanasupawat *et al.*, 2016).

Les algues sont connues pour coloniser les substrats artificiels comme les surfaces en polyéthylène dans les eaux usées (Tableau 6) et ces algues colonisatrices se sont révélées moins dangereuses et non toxiques. (Sharma *et al.*, 2014)

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

Tableau 6. Colonisation d'algues sur une surface en plastique (Yi Chia *et al.*, 2020)

Espèces d'algues	Plastique	Plan d'eau	Référence
<i>Scenedesmus dimorphus</i> (algue verte), <i>Anabaena spiroïdes</i> (algue bleu-vert) et <i>Navicula pupula</i> Déchets déversés (diatomée)	Sacs en polyéthylène Submergé	Eaux usées domestiques dans la ville de Chennai, Tamil Nadu, Inde	Kumar, et al., (2017)
<i>Oscillatoria princeps</i> , <i>O. acuminata</i> , <i>O. subbrevis</i> , <i>O. willei</i> , <i>O. amoena</i> , <i>O. splendida</i> , <i>O. vizagapatensis</i> , <i>O. limnetica</i> , <i>O. earlei</i> , <i>O. peronata</i> , <i>O. formosa</i> , <i>O. okeni</i> , <i>O. geitleriana</i> , <i>O. limosa</i> , <i>O. chalybea</i> , <i>O. salina</i> , <i>O. rubescens</i> , <i>O. curviceps</i> , <i>O. tenuis</i> et <i>O. laete-virens</i>	Sacs en polyéthylène Submergé	Plans d'eaux usées domestiques de la ville de Silchar, Assam	Sarmah, et al., (2017)
<i>O. limnetica</i> , <i>P. lucidum</i> , <i>Phormidium calcicola</i> , <i>O. earlei</i> , <i>Lyngbya cinerascens</i> , <i>Nostoc carneum</i> , <i>Nostoc linckia</i> , <i>Spirulina major</i> , <i>Hydrocoleum sp.</i> , <i>Chlorella sp.</i> , <i>Pithophora sp.</i> , <i>Scenedesmus quadricauda</i> , <i>Calothrix fusca</i> , <i>Stigeoclonium tenue</i> , <i>Calothrix marchica</i> , <i>Anomoeoneis sp.</i> , <i>Oedogonium sp.</i> , <i>Arthrospira platensis</i> , <i>Navicula minuta</i> , <i>Nitzschia sp.</i> , <i>Navicula dicephala</i> , <i>Nitzschia intermedia</i> , <i>Spirogyra sp.</i> et <i>Synedra tabulata</i>	Transport en polyéthylène Sacs	Décharges d'eaux usées domestiques solides	Sarmah, et al., (2018a)
<i>Phormidium lucidum</i> , <i>Oscillatoria subbrevis</i> , <i>Lyngbya diguetii</i> , <i>Nostoc carneum</i> et <i>Cylindrospermum muscicola</i>	Déchets déversés	Drains d'eaux usées domestiques de la ville de Silchar, Assam	Sarmah, et al., (2018b).
<i>Phormidium tenue</i> , <i>Oscillatoria tenuis</i> , <i>Monoraphidium contortum</i> , <i>Microcystis aeruginosa</i> , <i>Closterium constatum</i> , <i>Chlorella vulgaris</i> , et <i>Amphora ovalis</i>	Sacs en polyéthylène	Divers étangs, lacs et plans d'eau de la ville de Kotadans l'État du Rajasthan	Sharma, et al., (2014).
<i>Coleochaete scutata</i> , <i>Coleochaete soluta</i> , <i>Chaetophora</i> , <i>Aphanochaete</i> , <i>Gloeotaenium</i> , <i>Oedogonium</i> , <i>Oocystis</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Phormidium</i> , <i>Chroococcus</i> , <i>Aphanothece</i> , <i>Fragilaria</i> , <i>Cocconis</i> , <i>Navicula</i> , et <i>Cymbella</i>	Déchets de polyéthylène matériaux Polyéthylène	Inde Plans d'eau oligotrophes de Lucknow, Uttar Pradesh	Suseela, et al., (2007).

L'adhésion des algues à la surface initiera la biodégradation et leur production d'enzymes ligninolytiques et exopolysaccharidiques est la clé de la biodégradation plastique. (Sarmah *et al.*, 2018).

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

Alors, les enzymes algales présentes dans le milieu liquide interagissent avec les macromolécules présentes à la surface du plastique et déclenchent la biodégradation. (Chinaglia, *et al.*, 2018).

Le polymère est utilisé par les algues comme source de carbone puisque les espèces qui poussent sur la surface du PE se sont révélées avoir des teneurs cellulaires plus élevées (protéines et glucides) et un taux de croissance spécifique plus élevé (Sarmah *et al.*, 2018).

De plus, une dégradation de la surface a été clairement observée sur la section transversale des feuilles de PE colonisées par les algues. (Kumar *et al.*, 2017).

Cinq méthodes de biodégradation comprenant l'encrassement, la corrosion, l'hydrolyse et la pénétration, la dégradation des composants de lixiviation ainsi que la coloration des pigments par diffusion dans les polymères ont été observées dans des travaux antérieurs.

Algue bleu-vert, *Anabaena spiroïdes* a montré le pourcentage le plus élevé de dégradation du LDPE (8,18 %), suivi par la diatomée *Navicula pupula* (4,44%) et l'algue verte *Scenedesmus dimorphus* (3,74%). (Kumar *et al.*, 2017).

Une étude de Sarmah et Rout (Sarmah *et al.*, 2018) ont également conclu que les cyanobactéries d'eau douce non toxiques (*Phormidium lucidum* et *Oscillatoria subbrevis*) qui sont facilement disponibles, à croissance rapide et facilement isolables, sont capables de coloniser la surface du PE et de biodégrader efficacement le LDPE sans aucun prétraitement ni additif pro-oxydant.

A côté de cela, (Gulnaz et Dincer, 2009) ont étudié la biodégradation du bisphénol A (BPA), qui est un polymère largement utilisé dans l'industrie du plastique, en utilisant la bactérie *Aeromonas hydrophilia* et la microalgue *Chlorella vulgaris*. Les résultats ont indiqué que le BPA était facilement dégradé par les algues et que ses concentrations étaient inférieures aux limites de détection après 168 h sans activité oestrogénique.

En dehors de cela, les microalgues peuvent être génétiquement modifiées en une usine de cellules microbiennes capable de produire et de sécréter des enzymes dégradant le plastique. Par exemple, les microalgues vertes *Chlamydomonas reinhardtii* a été transformé pour exprimer la PETase et le lysat cellulaire du transformant a été co-incubé avec du PET, ce qui a entraîné des bosses et des trous sur la surface du film PET ainsi que du TPA, qui est la forme entièrement dégradée du PET (Kim *et al.*, 2020).

Ces études ont fourni une solution prometteuse et respectueuse de l'environnement pour dégrader biologiquement le PET en utilisant des microalgues via la biologie synthétique.

I.2.2.2 Potentiel des algues comme source de bioplastiques :

Les algues sont apparues comme une nouvelle source potentielle de biomasse pour la fabrication de bioplastiques, car les algues peuvent être cultivées sur des terres non arables et ont un temps de récolte court, comme démontré dans la figure 16 (Chew *et al.*, 2017 ; Tang *et al.*, 2020).

En outre, les algues ne concurrencent pas la production alimentaire pour la consommation humaine, tolèrent les conditions environnementales difficiles, peuvent assainir les eaux usées et utiliser le dioxyde de carbone comme source de nutriments pour la production de biomasse (Zhang *et al.*, 2019).

Lors de la fabrication de plastique à base d'algues, l'encapsulation de polymère non biodégradable, par exemple la polyoléfine, dans les mélanges d'algues thermoplastiques peut capter et stocker en permanence le dioxyde de carbone sous forme de biomasse. Par conséquent, le dioxyde de carbone ne sera pas rejeté dans l'atmosphère, atténuant ainsi l'effet de serre (Shi *et al.*, 2012).

En résumé, les bioplastiques à base d'algues constituent une alternative prometteuse et non toxique qui peut réduire l'utilisation de combustibles fossiles, améliorer la qualité du plastique et minimiser les impacts environnementaux négatifs provoqués par l'utilisation excessive de plastiques à base de pétrole (Beckstrom *et al.*, 2020).

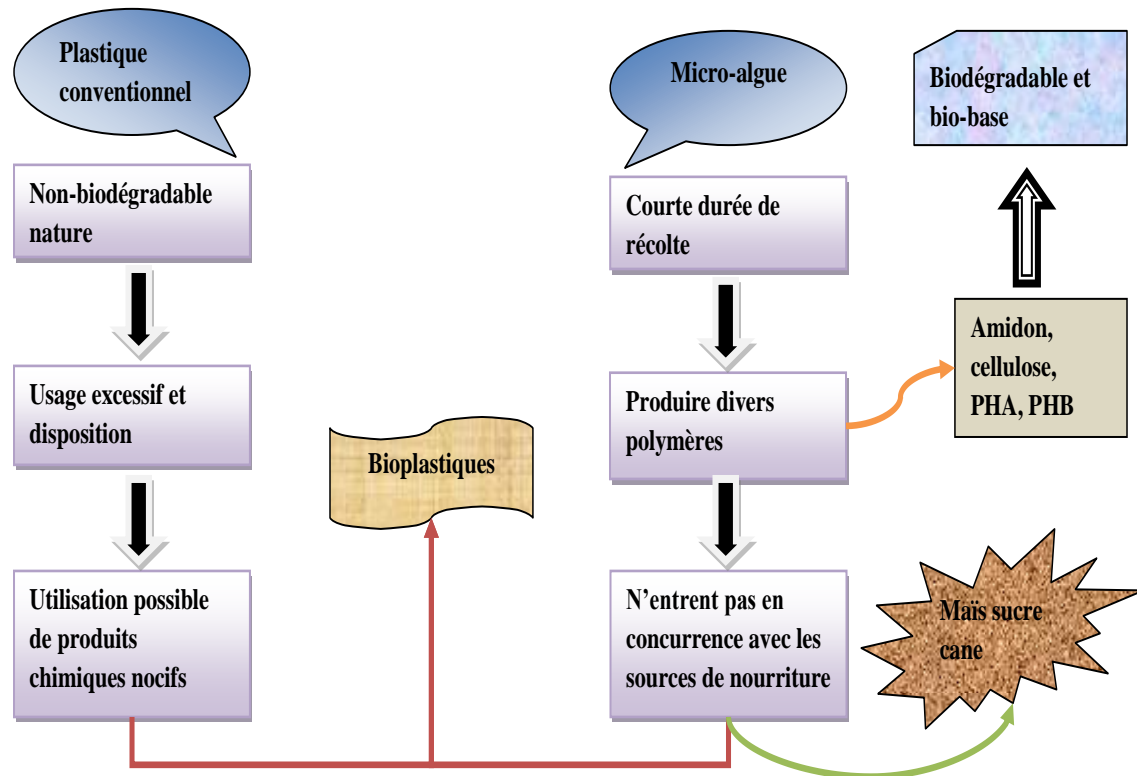


Figure 16. Potentiel des microalgues dans la production de bioplastiques.

Les bioplastiques à base de microalgues peuvent être produits par quelques approches, telles que l'utilisation directe de la biomasse de microalgues, le mélange avec d'autres matériaux, le traitement intermédiaire de bioraffinerie et le génie génétique pour créer des souches de microalgues productrices de polymères idéales (.Rahman *et al.* , 2017).

La biomasse algale comprend des polymères à base de protéines et de glucides qui peuvent être utilisés comme l'un des composants bioplastiques (Karan *et al.* , 2019)

Actuellement, l'amidon, la cellulose, le PHA, le PHB, le PLA, le PE, le PVC et les polymères à base de protéines sont quelques-uns des exemples de composés issus de la biomasse d'algues utilisés pour développer des plastiques biodégradables (Karan *et al.* , 2019)

Parmi ces polymères, le PHA est le plus recommandé pour produire des bioplastiques car il peut être biodégradé par action enzymatique. De plus, le PHB, un type de PHA, est récemment apparu comme un nouveau polymère pour produire des bioplastiques en raison de sa bonne barrière à l'oxygène (Hempel *et al.* , 2011 ; Rasul *et al.* ,2017)

Il y a eu quelques exemples de bioplastiques manufacturés par les concepteurs ou les chercheurs (Pownall, 2018).

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

Par exemple, Eric Klarenbeek et Maartje Dros, les designers néerlandais ont créé un produit bioplastique à base d'algues qui pourrait remplacer complètement les plastiques traditionnels. Ils ont également créé AlgaeLab pour cultiver des algues afin de produire de l'amidon comme matière première pour le bioplastique (Pownall, 2018).

En outre, (Austeja Platukyte ,2016) a développé des matériaux biodégradables à base d'algues, composés d'agar algal et de carbonate de calcium enrobé, qui pourrait remplacer les plastiques à base de pétrole. Bien que les produits finaux soient légers, ils sont imperméables, solides et durables (Chia ,2020)

De plus, les bioplastiques peuvent être compostés ou utilisés comme engrais pour aider à maintenir l'humidité du sol. De même, (Ari Jonsson ,2016) a mélangé la poudre des algues rouges avec de l'eau pour créer une bouteille alternative à la bouteille en plastique traditionnelle. La bouteille conservera sa forme lorsqu'elle sera pleine d'eau, mais elle commencera à se décomposer lorsqu'elle sera vide.

Les liquides conservés dans la bouteille sont sûrs à boire et les consommateurs peuvent également grignoter la bouteille elle-même.

En bref, les algues agissent comme une matière première de substitution prometteuse pour la production de bioplastiques pour remplacer les plastiques pétroliers conventionnels, résolvant ainsi la pollution plastique des mers. Lutte de la nature contre la pollution plastique : les algues pour la biodégradation du plastique et la production de bioplastiques (Chia *et al.*, 2020).

I.2.2.2.1 Mélanges avec d'autres matériaux :

D'autre part, la biomasse des microalgues peut être mélangée à d'autres matériaux, par exemple avec des plastiques pétroliers, des produits naturels (cellulose ou amidon) ou des polymères, tout en fabriquant des bioplastiques afin de prolonger leur durée de vie, d'améliorer leurs propriétés et d'augmenter leurs performances mécaniques (Rahman *et al.*, 2017).

Les matériaux de mélange peuvent être obtenus à partir de biomasse d'algues, par exemple, PLA, PHA, cellulose, amidon et protéines.

Une étude de (Shi *et al.*, 2012) ont rapporté que les propriétés mécaniques des films plastiques contenant des microalgues se sont avérées comparables aux films plastiques (polyuréthane ou PE) malgré l'inconvénient d'une faible résistance à la traction, en particulier l'allongement à la rupture.

I.2.2.2.2 Ingénierie génétique :

Le génie génétique s'avère être une voie prometteuse pour modifier les souches d'algues afin de synthétiser des composés pour la production de bioplastiques, tels que le PHB, un polyester thermoplastique et biodégradable produit par des bactéries. (Hempel, *et al.*, 2011).

Grâce au génie génétique, la production par les algues du PHB peut être rendue possible, en insérant la production bactérienne de PHB dans des microalgues ou des macroalgues pourraient réduire le coût de production car le système de fermentation bactérienne pour la fabrication de bioplastiques est coûteux (Hempel *et al.*, 2011 ; Rasul *et al.*, 2017).

Par conséquent, le génie génétique est l'approche prometteuse pour modifier les gènes d'une souche d'algue particulière afin d'améliorer la production des composés d'intérêt, par exemple, des polymères ou de l'amidon, en un temps plus court pour synthétiser des bioplastiques (Chun *et al.*, 2017).

Les algues sont génétiquement plus simples que les plantes, les cellules eucaryotes et d'autres organismes complexes. (Gimpel *et al.* ; Hlavova *et al.*, 2015).

Cependant, le processus de modification génétique nécessite le criblage de milliers de mutants avec les phénotypes souhaités, suivi de l'isolement de la nouvelle souche modifiée. Ce processus prend du temps pour sélectionner et isoler les mutants souhaités (Hlavova *et al.*, 2015).

Le coût du génie génétique est également élevé car il nécessite des équipements spécialisés, des kits et l'application du statut d'organisme génétiquement modifié (OGM) des souches nouvellement développées (Hlavova *et al.*, 2015).

Un autre problème avec le génie génétique est la stabilité et l'adéquation des souches d'algues génétiquement modifiées pour une culture à grande échelle qui a des conditions plus diverses car la souche génétiquement modifiée est développée et testée au stade précis du laboratoire. Pour la culture à grande échelle, la souche d'algue génétiquement modifiée subira les variations de température, d'intensité lumineuse, de pH et sera exposée au risque de contamination. (Hlavova *et al.*, 2015).

Une autre préoccupation est la sécurité et l'aspect éthique de la souche d'algues génétiquement modifiées. Il peut présenter un risque pour les écosystèmes, y compris les humains, les animaux et les plantes. Il existe une possibilité de migration de gènes, au cours de laquelle des gènes étrangers se propagent à d'autres plantes, si l'OGM est rejeté dans l'environnement ou cultivé à l'extérieur (Salles *et al.*, 2010).

De plus, les algues génétiquement modifiées peuvent provoquer des réactions allergiques chez certaines personnes, car les plastiques sont une source courante d'irritation

cutanée professionnelle ou de dermatite allergique de contact pendant le processus de production (Salles *et al.*, 2010).

I.2.2.2.3 Les défis des bioplastiques algaux :

Malgré les résultats accablants des bioplastiques à base d'algues à l'échelle du laboratoire, sa commercialisation et sa production à grande échelle sont encore entravées par quelques défis.

La sélection de polymères appropriés extraits d'algues est également un défi pour produire des bioplastiques durables avec une bonne résilience et résistance par rapport aux plastiques conventionnels. Quelques facteurs doivent être pris en compte lors de la sélection des polymères appropriés, tels que la biodégradabilité, la capacité de renouvellement de la matière première, le taux de dégradation, la fragilité, l'acceptabilité par le consommateur, la taille du polymère, le poids moléculaire et la teneur en humidité (Thakur *et al.*, 2018).

Un certain nombre d'études ont montré que la dégradation des bioplastiques a de graves conséquences pour l'environnement. La libération de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone et le méthane lors de la dégradation ou de la décomposition des bioplastiques a soulevé un problème. Il est également crucial de s'assurer que les bioplastiques peuvent être dégradés dans toutes les conditions environnementales et ne libèrent aucun gaz nocif (Rasul *et al.*, 2017).

Par ailleurs, une étude de (Beckstrom, 2019) ont découvert la présence d'odeurs désagréables dans les bioplastiques fabriqués à partir de lipides d'algues ainsi que le processus de production lent en raison des tendances à l'agglomération causées par les glucides dans la biomasse d'algues.

En dehors de cela, un rapport de (Blesin *et al.*, 2017) ont également mentionné qu'il y a un manque de sensibilisation des consommateurs à l'utilisation des bioplastiques ou qu'ils ne connaissent pas le terme « bioplastiques ». Certains consommateurs supposent que les bioplastiques devraient être plus chers en raison de l'utilisation de substances organiques.

Le système de culture des algues est un autre défi qui doit être surmonté avant la commercialisation des plastiques à base d'algues. Une culture à grande échelle est nécessaire pour cultiver en masse les algues afin de produire des polymères ou d'autres composés, tels que l'amidon (Tang *et al.*, 2020 ; Anto *et al.*, 2020 ; Tang et Yew *et al.*, 2020).

Les algues peuvent être cultivées en masse dans des bassins ouverts ou des systèmes de photobioréacteurs fermés, ces deux systèmes de culture ayant leurs propres avantages et inconvénients.

Bien que les coûts d'exploitation des systèmes ouverts soient faibles et faciles à entretenir et à développer, les systèmes ouverts sont confrontés aux problèmes de faible productivité, de risque de contamination élevé et d'infaisabilité pour la culture à grande échelle de souches spécifiques (Tang *et al.*, 2020 ; Anto *et al.*, 2020 ; Tang et Yew *et al.*, 2020).

D'autre part, un système de photobioréacteur fermé est moins sensible à la contamination, favorise la croissance d'espèces d'algues sélectionnées et a une productivité élevée en raison d'un taux de photosynthèse élevé (Tang *et al.*, 2020 ; Anto *et al.*, 2020 ; Tang et Yew *et al.*, 2020).

Compte tenu de la quantité prévue de bioplastique à base d'algues en 2050, la culture de macroalgues nécessite une superficie de plus de 0,6 million d'hectares pour synthétiser des composés pour le développement de bioplastiques ainsi que pour atteindre 100% de réduction des émissions de dioxyde de carbone (Abdul-Latif *et al.*, 2020).

I.2.3 Dégradation enzymatique :

La biodégradation des plastiques devrait être réalisable grâce à une combinaison de divers biocatalyseurs, y compris des enzymes et des micro-organismes, pour éliminer les plastiques de l'environnement via des méthodes vertes et durables (Amobonye *et al.*, 2021).

Le processus général de biodégradation enzymatique des polymères peut être divisé en quatre étapes :

La biodétérioration, la biofragmentation, l'assimilation et la minéralisation (Haider *et al.*, 2019).

❖ La première étape commence par la fixation initiale des microbes et la formation de biofilms microbiens conduit à une dégradation superficielle. A titre exemple : le PE a une hydrophobicité de surface élevée, les biofilms sont nécessaires pour augmenter l'interaction de surface du polymère avec les bactéries (Schwibbert, *et al.*, 2019). Les exopolysaccharides sécrétés par les micro-organismes assurent une forte adhésion du biofilm aux surfaces plastiques.

❖ Ensuite, les micro-organismes des biofilms sécrètent des enzymes extracellulaires qui catalysent la dépolymérisation de la chaîne polymère en oligomères, dimères ou monomères. Les composés de poids moléculaire inférieur produits lors de la biofragmentation sont transportés dans le cytoplasme du microbe aux étapes d'assimilation et de minéralisation.

❖ Enfin, des produits comme le CO₂, CH₄, H₂O et N₂ se forment et se libèrent dans l'environnement.

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

L'absorption par les cellules bactériennes du PE en vrac est un grand défi en termes de dépassement de la limite de taille de l'absorption (~ 500 Da). Cette limitation peut être surmontée en affichant les enzymes de dégradation cibles à la surface bactérienne pour un accès direct au PE (Figure 17) (Quehl *et al.*, 2017) ; Han *et al.*, 2015).

De plus, il existe de nombreux défis liés à la sécrétion d'enzymes dans la membrane externe de la cellule (Burdette *et al.*, 2018).

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

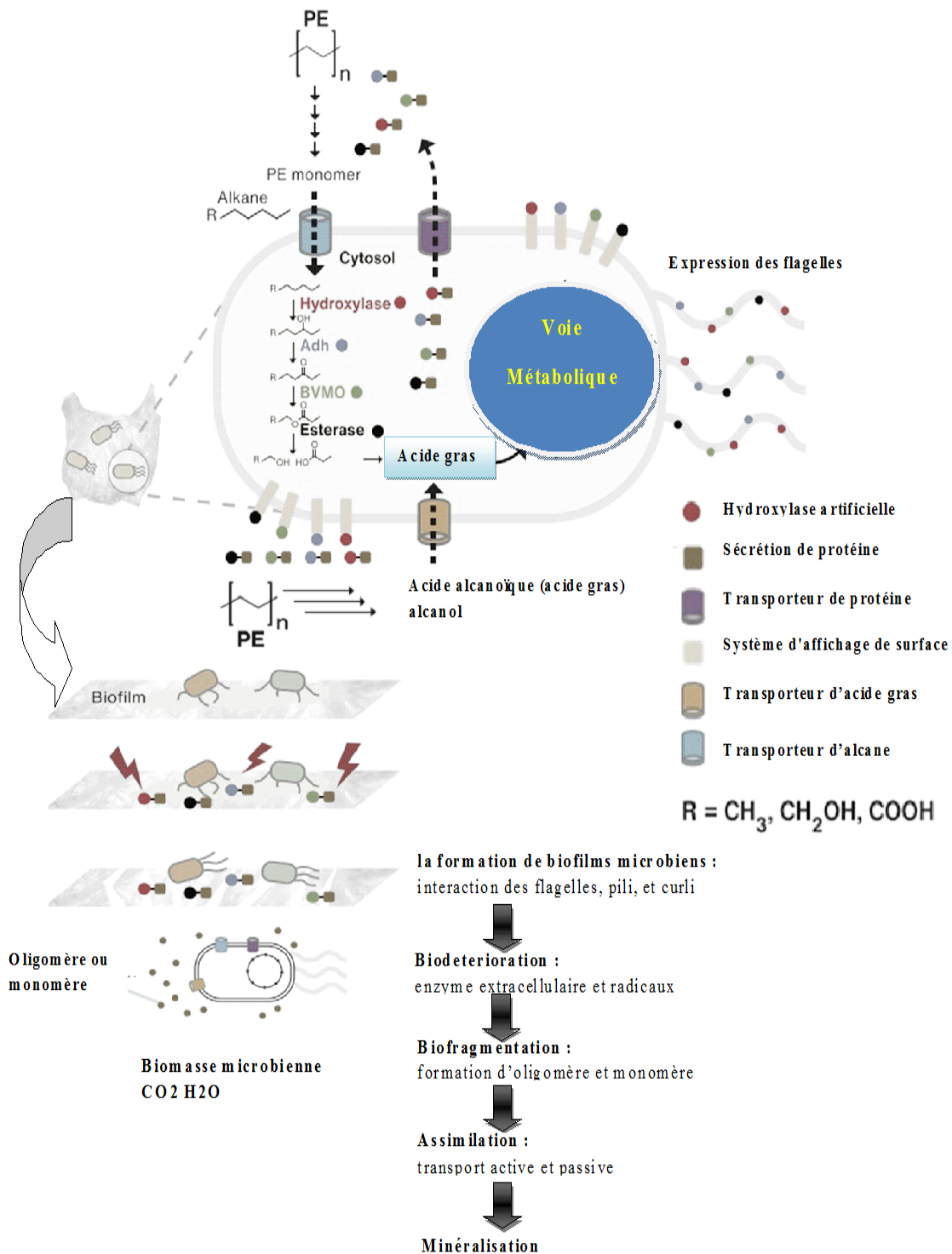


Figure 17 .Les hydroxylases hypothétiques seraient la P450, l'AlkB, la peroxygénase non spécifique (UPO) et d'autres classes d'hydroxylases capables d'activer la liaison C-H. La voie métabolique synthétique avec quatre enzymes dépolymérise le PE, puis les petits produits de dépolymérisation dérivés de la voie seraient acheminés vers les cellules en tant que matières premières. Abréviation : CYP, cytochrome P450.

I.3 Les méthodes d'élimination du plastique :

I.3.1 Gestion des déchets de plastique :

Les systèmes conventionnels largement adoptés pour l'élimination du plastique dans le scénario existant sont le recyclage, l'incinération et les décharges. Cependant, les méthodes, telles que le recyclage, ont des limites car au-delà d'une certaine limite, les plastiques ne peuvent pas être recyclés. L'incinération des plastiques produit d'importants polluants atmosphériques, tels que les dioxines et les furanes; ces polluants atmosphériques sont très dangereux et peuvent entraîner des risques majeurs pour la santé, notamment affections cancérogènes (Commission européenne, 2011).

La méthode la plus largement adoptée pour l'élimination des plastiques est de les jeter dans des décharges, cette méthode bien que largement utilisée mais est source de nombreux problèmes, tels que le gaspillage des terres, la pollution des eaux souterraines, la pollution de l'air, entre autres. Ces méthodes courantes d'élimination du plastique sont en proie à des limitations, et il existe donc un besoin croissant de développement de méthodes plus appropriées et respectueuses de l'environnement pour l'élimination du plastique. Parmi ces nouvelles méthodes, le traitement biologique est considéré comme l'option la plus lucrative. La voie biologique de traitement utilise diverses populations microbiennes pour la dégradation des plastiques persistants (Seneviratne *et al.*, 2006).

I.3.2 L'utilisation des bioplastiques :

L'étude du Nova Institute prévoit que les capacités mondiales de production de bioplastiques en 2019 étaient estimées à 2,11 millions de tonnes et pourraient atteindre environ 2,43 millions de tonnes en 2024. (European Bioplastics, nova-Institute, Données du marché des bioplastiques 2019).

L'analyse de l'impact technico-économique et du cycle de vie par (Beckstrom *et al.*, 2020) a révélé que les bioplastiques pouvaient être vendus pour aussi peu que 970 \$ la tonne-let réduire simultanément les émissions de gaz à effet de serre de 67 à 116 %. On peut dire que le marché potentiel des bioplastiques devrait augmenter et éventuellement remplacer les plastiques conventionnels.

Les matériaux bioplastiques durables sont actuellement en cours de développement et il est essentiel d'explorer des matériaux ou des polymères innovants issus de sources renouvelables pour la fabrication durable de plastiques biosourcés et biodégradables.

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

En effet, bien que certains types de bioplastiques soient d'origine biologique, ils ne sont pas entièrement biodégradables et peuvent avoir un impact environnemental négatif grave. Les matériaux utilisés pour la fabrication des bioplastiques doivent être biodégradables et de préférence fabriqués à partir de ressources naturelles renouvelables comme la biomasse, les plantes, les déchets, les microalgues et les bactéries (Sidek *et al.*, 2019).

Ces matières renouvelables ne doivent pas entrer en concurrence avec les sources traditionnelles utilisées comme aliments tout en étant capables de réduire l'utilisation de ressources non renouvelables à long terme (Sidek *et al.*, 2019).

De plus, les bioplastiques produits doivent être respectueux de l'environnement et du consommateur, par exemple être sans odeur tout au long de leur durée de vie. Ces types de bioplastiques auront d'excellentes propriétés thermiques qui conviennent comme matériau d'emballage dans l'industrie alimentaire et des boissons (Chia *et al.*, 2020).

En outre, il existe une autre préoccupation concernant la politique et la certification sur l'utilisation des bioplastiques. Le processus de certification est un processus complexe, long et fastidieux car tous les tests effectués impliquent le même matériau et sont effectués par le même laboratoire d'essais, de sorte qu'il n'y a pas d'écart entre les résultats du laboratoire et les conditions réelles. (Chia *et al.*, 2020).

Actuellement, il n'existe pas de politiques et de spécifications standard concernant la qualité des bioplastiques, bien qu'il existe plusieurs systèmes de certification pour la compostabilité des bioplastiques (Niaounakis *et al.*, 2014 ; Briassoulis *et al.*, 2017).

Selon (European Bioplastics ,2020), l'un des tests de certification des bioplastiques est la norme EN 13432 (test de compostabilité) qui consiste à s'assurer que le produit et ses autres composants sont compostables ou peuvent être compostés industriellement.

I.3.3 L'utilisation des algues :

Les microalgues contribuent à la biodégradation des déchets plastiques avec ses enzymes qui affaiblissent les liaisons chimiques des polymères plastiques (Khoo *et al.*, 2020)

La tentative d'utiliser des microalgues pour convertir ces plastiques en métabolites tels que le dioxyde de carbone, l'eau et la nouvelle biomasse est d'un grand intérêt. Cependant, ce domaine est relativement nouveau et d'autres études sont nécessaires. (Khoo *et al.*, 2020) Compte tenu de la variété des plastiques étudiés, davantage d'études de biodégradation utilisant des algues doivent être menées et l'efficacité doit être évaluée. (Khoo *et al.*, 2020)

De plus, il reste encore à faire des recherches sur la façon dont les microalgues dégradent les microplastiques. Il existe un énorme vide dans la recherche sur la question de

Chapitre 3 : la dégradation des plastiques

savoir si les microplastiques tueront les microalgues ou le contraire car les recherches existantes ne sont pas concluantes (Khoo *et al.*, 2020).

Un autre problème sérieux est que les microalgues qui contiennent des hydrocarbures, des protéines, des lipides et d'autres composés à haute valeur ajoutée sont principalement utilisées pour les produits alimentaires et doivent être exemptes de polluants, y compris les microplastiques (Khoo *et al.*, 2020)

Il est essentiel d'étudier les implications des microplastiques sur la santé des organismes aquatiques et humains. Avec le souci de ses effets nocifs sur la santé, des purifications des produits de microalgues doivent être effectuées pour assurer la sécurité des microalgues qui sont destinées à l'ingestion (Chew *et al.*, 2019).

Les déchets plastiques de toutes tailles doivent être étudiés pour une meilleure compréhension en termes d'impacts sur la santé et l'environnement. (European Bioplastics, 2019)

D'un autre côté, les algues sont le candidat prometteur pour synthétiser des polymères pour la production durable de bioplastiques et d'autres coproduits grâce au concept de bioraffinerie. (Chew *et al.*, 2017 ; Chia *et al.* , 2019).

La synthèse de bioplastiques de consommation à base de monomères ou de polymères dérivés de résidus de déchets d'algues est également réalisable, résolvant les problèmes d'élimination des déchets. (Ramesh *et al.*, 2020).



Conclusion

En conclusion, avec l'augmentation des activités humaines et une mauvaise gestion, les plastiques et leurs produits fragmentés (microplastiques, nanoplastiques) sont omniprésents dans les écosystèmes marins du monde entier, des grandes quantités de plastiques entrent chaque année dans les mers, où ils se transforment et s'accumulent pour y rester des temps non encore définis.

Leur cycle est encore mal connu. Ceux qui restent en surface sont les plus dégradés car on les retrouve essentiellement sous forme de microplastiques. Ces plastiques voyagent vite et loin, emmenant polluants et micro-organismes divers, contaminer tous les compartiments de l'environnement aquatique.

Toutes les espèces de l'environnement aquatique, quels que soient leur taille ou leur lieu de vie, rencontrent ces plastiques et s'y enchevêtrent ou les ingèrent.

La dégradation des polymères, ses types, les problèmes associés au traitement, à l'élimination et les manières relatives de traiter les plastiques. Divers défis sont à relever lors de la sélection des méthodes de traitement appropriées de la pollution plastique.

Le traitement biologique est le seul traitement respectueux de l'environnement et sans danger pour l'environnement : Étant donné que les traitements physiques et chimiques ont leurs limites, les sous-produits générés par le traitement physique posent un problème majeur à la société humaine, tandis que dans le traitement chimique, les produits chimiques utilisés peuvent avoir des effets nocifs et des problèmes d'élimination par rapport au traitement biologique. Par conséquent, le traitement biologique peut être considéré comme l'une des solutions les plus viables pour la dégradation des polymères. Ce traitement utilise une voie respectueuse de l'environnement pour dégrader le polymère sans générer de sous-produits nocifs.

La promotion de l'utilisation des BP dans des applications spécifiques. Leur présence dans l'environnement marin peut empêcher toute conclusion univoque quant à leur pertinence en tant que solution à la pollution plastique marine.

L'utilisation des microalgues pour la biodégradation du plastique offre plusieurs avantages, elle est donc présentée comme une solution potentielle.

Traitements des déchets plastiques par les microorganismes tels que les bactéries et les champignons en sécrétant des enzymes qui entraînent la décomposition du polymère.

Aanesen C. Armstrong M .Czajkowski J. Falk-Petersen N. Hanley S.Navrud (2015) Willingness to pay for unfamiliar public goods: preserving cold-water coral in Norway, *Ecol.Econ.*112, and 53e67

Abdul-Latif M.Y.Ong S.Nomanbhay B.Salman P.L.Show (2020) Estimation Of carbondioxide(CO₂)reduction by utilization of algalbiomassbio plastic in Malaysia using carbonemission pinchan alysis (CEPA),*Bioengineered*11 154e164.

Acampora H., Lyashevskva O., Van Franeker J.A., O'Connor (2016).Theuse of beached Bird surveys for marine plastic litter monitoring in Ireland.*Mar.Environ.Res.*120, 122–129.

Ahmed T., Shahid M., Azeem F., Rasul, I., Shah A.A., Noman M., Hameed A., Manzoor N., Manzoor I., Muhammad S (2018). Biodegradation of plastics: current scenario and future prospects for environmental safety. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 25 (8), 7287–7298.

Ali M.I., Ahmed S., Robson G., Javed I., Ali N., Atiq N., Hameed A(2014). Isolation and molecular characterization of polyvinyl chloride (PVC) plastic degrading fungal isolates. *J. Basic Microbiol.* 54 (1), 18–27.

Amobonye A. et al (2021) Plastic biodegradation: frontline mi-crobes and their enzymes. *Sci. Total Environ.* 759,143536

Andrady A.L (2011). Microplastic in the marine environment.*Mar.Pollut.Bull.*62, 1596–1605.

Andrew William (2018).Shrivastava, Introductionto Plastics Engineering

Anto S. S. Mukherjee R. Muthappa T .Mathimani G.Deviram S.S.Kumar T.N. Verma A. Pugazhendhi (2020) Algaeas green energy reserve: technological outlook on biofuel lproduction, *Chemosphere*242, 125079.

Anwar M.S., Kapri A., Chaudhry V., Mishra A., Ansari M.W., Souche Y., Nautiyal C.S., Zaidi M.G., Goel R (2016). Response of indigenously developed bacterial consortia in progressive degradation of polyvinyl chloride. *Protoplasma* 253 (4), 1023–1032.

Ari Jonsson (2016)

ASTM D6691-17 (2017). Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in the Marine Environment by a Defned Microbial Consortium or Natural Sea Water Inoculum. ASTM International, West Conshohocken, PA. (www.astm.org).

Austeja Platukyte (2016)

Auta H.S., Emenike C .U. Fauziah S.H (2017). Distribution and importance of micro-Plastics in the marine environment: areview of the sources, fate, effects ,and po-tentialsolutions.*Environ.Int.*102, 165–176.

Auta H.S., Emenike C.U., Jayanthi B., Fauziah S.H (2018). Growth kinetics and biodeterioration of polypropylene microplastics by *Bacillus* sp. and *Rhodococcus* sp. isolated from mangrove sediment. *Mar. Pollut. Bull.* 127, 15–21.

Avio C.G., Gorbi S., Regoli F (2017).Plastics and microplastics in the oceans: From Emerging pollutants to emerged threat.*Mar.Environ.Res.*128, 2–11.

- Avolio R., Castaldo R., Avella M., Cocca M., Gentile G., Fiori, S., Errico M.E (2018).** PLA-based plasticized nanocomposites: effect of polymer/plasticizer/filler interactions on the time evolution of properties. *Compos. B Eng.* 152, 267–274. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.07.011>.
- Barboz L .G.A., Gimenez B.C.G (2015).**Microplastics in the marine environment: current Trends and future perspectives.*Mar.Pollut.Bull.*97, 5–12.
- Barletta M., Lima A.R.A., Costa M.F (2019).**Distribution, sources and consequences of nutrients, persistent organic pollutants, metals and microplastics in South American estuaries.*Sci.TotalEnviron.*651, 1199–1218.
- Barnes D.K.A., Galgani F.,Thomson R.C.,Barlaz M(2009).**Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments.*Philos.Trans.R.Soc.B*364,1985–1998.
- Bastos Lima (2018)** toward multipurpose agriculture: food, fuels, flexcrops, and Prospects for a bioeconomy, *Global Environ.Polit.*18, 143e150.
- Baulch S., Perry C (2014).**Evaluating the impacts of marine debris on cetaceans.*Mar.Pollut.Bull.*80, 210–221.
- Beck CA Barros NB (1991).** the impact of debris on the Florida Manatee. *Mar Pollut Bull* 22:508–510 Biological and Ecological Impacts of Plastic Debris in Aquatic Ecosystem
- Beckstrom (2019).** Bioplastic Production from Microalgae with Fuel Co-products: A Techno-Economic and Life-Cycle Assessment, Colorado State University, Libraries.
- Beckstrom M. H. Wilson M. Crocker J. C .Quinn (2020).**Bioplastic feedstock Production from microalgae with fuel co-products: a techno-economic and life cycle impact assessment, *Algal Res*46, 101769.
- Bellas J.,Martínez-Armental J.,Martínez-Cámara A.,Besada V.,Martínez-Gómez C (2016).**Ingestion of microplastics by demersal fish from the Spanish Atlantic and Mediterranean coasts.*Mar.Pollut.Bull.*109,55–60.
- Bellis M (2018).** A Brief History of the Invention of Plastics.Jun.14, 2018.ThoughtCo.
<https://www.thoughtco.com/history-of-plastics-1992322>.
- Besseling E. Wegner A. Foekema E.M. Vanden Heuvel-Greve M.J. Koelmans A.A (2013).**Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the Lugworm *Arenicola marina* (L.).*Environ.Sci.Technol.*47 (1), 593–600.
- Biginagwa F.J. Mayoma B.S. Shashoua Y. Syberg K. Khan F.R (2016).**First evidence of microplastics in the African Great Lakes: recovery from Lake Victoria Nile perch and Nile tilapia.*J.GreatLakesRes.*42 (1), 146–149.
- Bird P.M (1978).**Tissue regeneration in three Carcharhinid sharks encircled by embedded straps.*Copeia*2, 345–349.
- Bhuyar (2018),** Biodegradation of plastic waste by using microalgae and their toxins, in: *Biopolymers & Bioplastics & Polymer Science and Engineering Conferences*, (Las Vegas, USA).
- Bioplastiques européens (2018).**
- Blesin M. Jaspersen W.M€ ohring (2017).** Boosting plastics' image? Communicative challenges of innovative bioplastics, *e-plastory-Journal of Plastics History*1,2.

- Bogaert J.C., Coszac P.P (2015).** Poly (lactic acids): a potential solution to plastic waste dilemma. *Macromol. Symp.* 153 (1), 287–303. [https://doi.org/10.1002/1521-3900\(200003\)153:1<287: AID-MASY287>3.0.CO; 2-E](https://doi.org/10.1002/1521-3900(200003)153:1<287: AID-MASY287>3.0.CO; 2-E).
- Bour A. Avio C.G. Gorbi S. Regoli F (2018).** Presence of microplastics in benthic and epibenthic organisms: influence of habitat, feeding mode and trophic level. *Environ. Pollut.* 243, 1217–1225.
- Botterell ZLR., Beaumont N., Dorrington T (2019)** Bioavailability and effects of Microplastics on marine zooplankton: a review. *Environ Pollut* 245:98–110
- Bravo Rebolledo E.L.B., VanFraneker J.A., Jansen O.E., Brasseur S.M.J.M. (2013).** Plastic ingestion by harbor seals (*Phoca vitulina*) in the Netherlands. *Mar. Pollut. Bull.* 67, 200–202.
- Browne M.A. Dissanayake A. Galloway T.S. Lowe D.M. Thompson R.C (2008).** Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.). *Environ. Sci. Technol.* 42, 5026–5031. doi:10.1021/es0312008.
- Browne MA., Crump P., Niven SJ (2011).** Accumulation of microplastic on shorelines Worldwide: sources and sinks. *Environ Sci Technol* 45 (21):9175
- Brigham (2018).** Chapter 3.22-biopolymers: biodegradable alternatives to Traditional plastics, in: B. T. E. Oréok, T. Dransfield (Eds.), *Green Chem*, Elsevier, pp. 753–770.
- Bueno-Ferrer C. Garrigos M.C. Jimenez A (2010).** Characterization and thermal stability of poly (vinyl chloride) plasticized with epoxidized soybean oil for food Packaging. *Polym. Degrad. Stabil.* 95, 2207–2212. <https://doi.org/10.1016/j. polymdegradstab.2010.01.027>.
- Burdette L. A (2018).** Developing Gram-negative bacteria for the secretion of heterologous proteins. *Microb. Cell Factories* 17, 196
- Campani T. Bains M. Giannetti M. Cancelli F. Mancusi C. Serena F. Marsili L. Casini S. Fossi M C (2013).** Presence of plastic debris in loggerhead turtle stranded along the Tuscany coasts of the Pelagos Sanctuary for Mediterranean Marine Mammals (Italy). *Mar. Pollut. Bull.* 74, 225–230. doi:10.1016/j.marpolbul.2013.03.011
- Canniff T.C. Hoang (2018).** Microplastic ingestion by *Daphnia magna* and its enhancement on algal growth, *Sci. Total Environ.* 633, 500–507.
- Carmen S (2021).** Microbial capability for the degradation of chemical additives present in petroleum-based plastic products: a review on current status and perspectives. *J. Hazard Mater.* 402, 123534.
- Carpenter E., Smith K (1972).** Plastics on the Sargasso Sea surface. *Science* 175, 1240–1241.
- Cassoff RM., Moore KM., McLellan WA et al., 2011.** Lethal entanglements syndrome in baleen whales. *Dis Aquat Org* 96:175–185
- Chae DH. Kim IS. Kim S K (2015).** Abundance and distribution characteristics of Microplastics in surface seawaters of the Incheon/Kyeonggi coastal region. *Arch Environ Contam Toxicol* 69:269–278
- Chae D. Kim Y.-J. An (2019).** Effects of micro-sized polyethylene spheres on the marine microalga *Dunaliella salina*: focusing on the algal cell to plastic Particle size ratio. *Aquat. Toxicol.* 216, 105296.
- Chamas A. et al., 2020.** Degradation rates of plastics in the environment. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 8, 3494–3511

Chang M (2013).Microplastics in Facial Exfoliating Cleansers.Spring.

Chen N. Yan A (2020).brief overview of renewable plastics, Mater.Today Sus-Trainability 7e8, 100031.

Chew J.Y. Yap P.L. Show N.H.S uan J.C .Juan T.C.Ling D.-J.Lee J.-S. Chang (2017).Microalgae biorefinery: high value products perspectives, Bio-resour.Technol.229, 53e62.

Chew S.R.Chia R.Krishnamoorthy Y.Tao D.-T.Chu P.L.Show (2019a).Liquid biphasic flotation for the purification of c-phycoocyanin from Spirulina pla-tensismicroalga, Bioresour. Technol.288, 121519.

Chinaglia M. Tosin F. Degli-Innocenti (2018).Biodegradation rate of biodegrad-Able plastics at molecular level, Polym.Degrad.Stabil.147, 237e244.

Chun D .Mulcahy L.Zou I.S.Kim (2017).A short review of membrane fouling in for ward osmosisprocesses, Membranes7, 30.

Cocca M., Di Lorenzo M.L., Malinconico, M., Frezza, V (2011). Influence of crystal polymorphism on mechanical and barrier properties of poly (L-lactic acid). Eur. Polym. J. 47, 1073–1080. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.02.009>.

Cocca M., Avolio R., Gentile G., Di Pace E., Errico M.E., Avella, M(2015). Amorphized cellulose as filler in biocomposites based on poly (ε-caprolactone). Carbohydr. Polym. 118, 170 182. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.11.024>.

Cocca M. De Falco F. Gentile G. Avolio R. Errico M.E. Di Pace E. Avella M(2018). Degradation of biodegradable plastic buried in sand. In: Cocca, M., Di Pace, E., Errico, M., Gentile, G., Montarsolo, A., Mossotti, R. (Eds.), Proceedings of the International Conference on Microplastic Pollution in the Mediterranean Sea, Springer Water. Springer, Cham, pp. 205–209. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71279-6_28.

Cole M. Lindeque P. Halsband C. Galloway T.S (2011).Microplastics as contaminants in the marine environment: areview.Mar.Pollut.Bull.62, 2588–2597.

Colton J.B. Knapp F.D. Burns B.R (1974).Plastic particles in surface waters of the North western Atlantic.Science185, 491–497.

Commission européenne (2019)

Cosgrove R. Gosch M. Reid D. Sheridan M. Chopin N. Jessopp M. Cronin M (2016). Seal bycatch in gillnet and entanglingnet fisheries in Irish waters. Fish. Res.183, 192–199.

Cózar A. Sanz Martín M. Martí E. González Gordillo J.I. Ubeda B. Gálvez J.Á. Irigoien X.DuarteC.M (2015)

Plastic accumulation in the Mediterranean sea.PLoS One10, e0121762.

Daiwile A.P. Naoghare P.K. Giripunje M.D. Rao P.D.P. Ghosh T.K. Krishnamurthi K. Alimba C.G. Sivanesan S (2015).Correlation of melanophore index with a battery of functional genomic stress indicators for measurement of environmental stress In aquatic ecosystem.Environ.Toxicol.Pharmacol.39,489–495.

D’Alesaandro M. Esposite V. Porporato E.M.D. Berto D. Renzi M. Giacobbe S. Scotti G. Consoli P. Valastro G. Andaloro F. Romeo T (2018).Relation ships between plastic litter and chemical pollutants on benthic biodiversity.Environ.Pollut.242, 1546–1556.

- Danso D., Chow J., Streit W.R (2019).** Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Appl. Environ. Microbiol.* 85 (19), 19 e01095.
- Dawson A. Huston W. Kawaguchi S. King C. Cropp R. wild S. Eisenmann P. Townsend K. Nash S.B (2018a).** Uptake and depuration kinetics influence microplastic bioaccumulation and toxicity in Antarctic Krill (*Euphausia superba*). *Environ. Sci. Technol.* 52 (5), 3195–3201.
- Dawson A.L. Kawaguchi S. King C.K. Townsend K.A. King R. Huston W.M. Bengtson Nash S.M (2018b).** Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat. Commun.* 9, 1001–1008.
- Degli Innocenti F., Breton T(2020).** Intrinsic biodegradability of plastics and ecological risk in the case of leakage. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 8, 9239–9249 <https://dx.doi.org/10.1021>.
- Denuncio P., Bastida R., Dassis M., Giardino G., Gerpe M., Rodríguez D (2011).** Plastic Ingestion in Franciscana dolphins, *Pontoporia blainvillei* (Gervais and Orbigny, 1844), from Argentina. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 1836–1841.
- Derraik J.G (2002).** The pollution of the marine environment by plastic debris: a review. *Mar. Pollut. Bull.* 44 (9), 842–852.
- Deroiné M., César G., Le Duigou A(2015).** Natural degradation and biodegradation of poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) in liquid and solid marine environments. *J. Polym. Environ.* 23, 493–505. <https://doi.org/10.1007/s10924-015-0736-5>.
- Desforges J.W. Galbraith M. Dangerfield N. Ross P.S (2014).** Widespread distribution of microplastics in subsurface sea water in the NE Pacific Ocean. *Mar. Pollut. Bull.* 7 (1), 94–99.
- Desforges JP, Galbraith M, Ross PS (2015).** Ingestion of microplastics by zooplankton in the North east Pacific Ocean. *Arch Environ Contam Toxicol* 69:320
- De Stephanis R. Giménez J. Carpinelli E. Gutierrez-Exposito C. Cañadas A (2013d).** Asma in meal for sperm whales: plastics debris. *Mar. Pollut. Bull.* 69, 206–214.
- De Tender C.A., Devriese L.I., Haegeman A., Maes S., Ruttink T., Dawyndt P(2015).** Bacterial community profiling of plastic litter in the Belgian part of the North Sea. *Environ. Sci. Technol.* 49 (16), 9629–9638.
- Di Benedetto A.P.M., and Ramos, and R.M.A (2014).** Marine debris in gestation by coastal dolphins: What drive differences between sympatric species? *Mar. Pollut. Bull.* 83, 298–301.
- Di Lorenzo M.L. Rubino P. Cocca M (2014).** Isothermal and non-isothermal crystallization of poly (L-lactic acid)/poly (butylene terephthalate) blends. *J. Appl. Polym. Sci.* 131 (12), 40372. <https://doi.org/10.1002/app.40372>.
- Domb A.J. Kumar N. Ezra A (2011).** *Biodegradable Polymers in Clinical Use and Clinical Development.* Wiley-VCH, Weinheim, Germany.
- Edlund U. Albertsson A.C (2003).** Polyesters based on diacid monomers. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 55, 585–609. [https://doi.org/10.1016/s0169-409x\(03\)00036-x](https://doi.org/10.1016/s0169-409x(03)00036-x).
- Edmondson S. and Gilbert M (2017).** The chemical nature of Plastics polymerization. In *Brydson's plastics materials (8th edn)*, pp.19–37, Elsevier

- Emadian M.S. Onay T.T. Demirel B (2017)**. Biodegradation of bioplastics in natural environments. *WasteManag.* 59, 526e536. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.006>.
- Eriksson C. Burton H (2003)**. Origins and biological accumulation of small plastic particles in fur seals from Macquarie Island. *Ambio* 32 (6), 380–384.
- Eriksen M. Lebreton L.C.M. Carson H.S. Thiel M. Moore C.J. Borerro J.C. algani F. Ryan P.G. 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.
- Erni-Cassola G Zadjelovic V Gibson MI (2019)**. Distribution of plastic polymer types in the marine environment; a meta-analysis. *J Hazard Mat* 369:691–698
- European Bioplastics, nova-Institute, Bioplastic market data. (2019)**. https://docs.europeanbioplastics.org/publications/market_data/Report_Bioplastics_Market_Data_2019.pdf, 2020. (Accessed 30 August 2020)
- European Bioplastics, What are bioplastics? (Accessed 15 September 2020)** https://docs.europeanbioplastics.org/publications/fs/EuBP_FS_What_are_bioplastics.pdf,2018.
- Eyheraguibel B. Leremboure M. Traikia M. Sancelme M. Bonhomme S. Fromageot D. Delort A.M. (2018)**. Environmental scenario for the degradation of oxo-polymers. *Chemosphere* 198, 182–190.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.153>.
- Faris J. Hart K (1995)**. Seas of Debris: a Summary of the Third International Conference on Marine Debris. Seattle, National Oceanographic and Atmospheric Administration. North Carolina Seagrass College programme UNC-SC-95-01.
- Ferreira L.M. Falcao A.N. Gil M.H (2005)**. Modification of LDPE molecular structure by gamma radiation for bio applications. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* 236 (1e4), 513e520. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2005.04.030>.
- Fischer EK, Paglialongo L, Czech E (2016)**. Microplastic pollution in lakes and Lake Shoreline sediments – a case study on Lake Bolsena and Lake Chiusi (Central Italy). *Environ Pollut* 213:648–657
- Fossi MC, Panti C, Guerranti C (2012)**. Are baleen whales exposed to the threat of Microplastics? A case study of the Mediterranean fin whale (*Balaenoptera physalus*). *Mar Pollut Bull* 64 (11):2374–2379
- Fujimaki T (1998)**. Processability and properties of aliphatic polyesters, 'BIONOLLE', synthesized by polycondensation reaction. *Polym. Degrad. Stab.* 59, 209–214. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00220-6](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00220-6).
- Gago J, Henry M. Galgani F (2015)**. First observation on neustonic plastics in waters off NW Spain (spring 2013 and 2014). *Mar. Environ. Res.* 111, 27–33.
- Galgani F, Hanke G, Maes T (2015)**. Global distribution, composition and abundance of marine litter. Chapter 2. pp 29 – 56. In: Bergmann M., Gutow L., Klages M. (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Published by Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht, London.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3>.

- Galloway M. Cole C. Lewis (2017)**. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem, *Nat.Ecol.Evol.*1, 1e8.
- Galloway T.S, Cole M, Lewis C (2017)**. Interactions of microplastic debris throughout the marine ecosystem. *Nat.Ecol.Evol.*1 (5), 0116. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0116>.
- Gall S.C, Thompson R.C (2015)**. The impact of debris on marine life. *Mar.Pollut.Bull.*92, 170–179.
- Ganesh Kumar A, Anjana K, Hinduja, M, Sujitha, K, Dharani G (2020)**. Review on plastic wastes in marine environment - biodegradation and biotechnological Solutions. *Mar. Pollut. Bull.* 150, 110733.
- Gardon T, Reisser C, Soyeux C, Quillien V, Le Moullac G (2018)**. Microplastics affect energy balance and gamete genesis in the Pearl Oyster *Pinctada margaritifera*. *Environ.Sci.Technol.*52(9),5277–5286.
- Garcia J M, Jones G.O, Virwani K. Mc Closkey B.D, Boday D.J, terHurne G.M, Horn H.W, Coady D.J, Bintaleb A.M, Alabdulrahman A.M (2014)**. Recyclable, strong thermosets and organogels via paraformaldehyde condensation with diamines. *Science*344, 732–735. <https://doi.org/10.1126/science.1251484>.
- Gewert B, Plassmann M.M, MacLeod M (2015)**. Pathways for degradation of plastic Polymers floating in the marine environment. *Environ. Sci. Process Impacts* 17, 1513–1521. <https://doi.org/10.1039/c5em00207a>.
- Geyer J.R. Jambeck K.L. Law (2017)**. Production, use, and fate of all plastic ever made, *Sci .Adv.* 3, e1700782.
- Ghavimi S.A.A, Ebrahim zadeh M.H, Solati-Hashjin M, Osman N.A.A (2015)**. Polycaprolactone/starch composite: fabrication, structure, properties, and applications. *J. Biomed. Mater. Res. A* 03 (7), 2482–2498. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.35371>.
- Giacomucci L, Raddadi N, Soccio M, Lotti N, Fava F (2019)**. Polyvinyl chloride biodegradation by *Pseudomonas citronellolis* and *Bacillus flexus*. *N. Biotech.* 52, 35–41.
- Gimpel V .Henríquez S.P (2015)**. Mayfield, in metabolic engineering of Eukaryotic microalgae: potential and challenges come with great diversity, *Front.Microbiol.*6, 1376.
- Glas D, Hulsbosch J, Dubois P, Binnemans K, De Vos D.E (2014)**. End-of-life treatment of poly (vinyl chloride) and chlorinated polyethylene by dehydrochlorination in ionic liquids. *Chem. Sus. Chem.* 7, 610–617. <https://doi.org/10.1002/cssc.201300970>.
- Grassie N, Scott G (1985)**. *Polymer Degradation and Stabilization*, vol.222. Cambridge University Press, Cambridge. ISBN0-521-24961-9. <https://doi.org/10.1002/pi.4980180422>.
- Gregory M.R (1996)**. Plastic ‘scrubbers’ in hand cleansers: a further (and minor) source for marine pollution identified. *Mar.Pollut.Bull.*32, 867–871.
- Green DS, Colgan TJ, Thompson R C (2019)**. Exposure to microplastics reduce attachment strength and alters the haemolymph proteome of blue mussels (*Mytilus edulis*). *EnvironPollut*246:423–434
- Gross R.A, Kalra B (2002)**. Biodegradable polymers for the environment. *Science* 297 (5582), 803–807. <https://doi.org/10.1126/science.297.5582.803>.

Guidelines for safe recreational water environments (2003) in: Coastal and Fresh Waters, vol.1, World Health Organization, Geneva

GU J.D., Ford T.E., Mitchell R (2000a). Microbial Corrosion of Metals. The Uhlig Corrosion Handbook, seconded. , pp.915e927

GU J.D., Ford T.E., Mitton D.B., Mitchell R (2000b). Microbial Degradation and Deterioration of Polymeric Materials. The Uhlig Corrosion Handbook, seconded, pp.439e460

Gulnaz S. Dincer (2009). Biodegradation of bisphenol a by *Chlorella vulgaris* and *Aeromonas hydrophilia*, *J.Appl.Biol.Sci.*3, 79e84.

Haernvall K, Zitzenbacher S, Wallig K, Yamamoto M, Schick M.B, Ribitsch D, Guebitz G.M (2017). Hydrolysis of ionic phthalic acid based polyesters by wastewater microorganisms and their enzymes. *Environ. Sci. Technol.* 51 (8), 4596 4605.

Haider T.P (2019). Plastics of the future? The impact of Biodegradable polymers on the environment and on society. *Angew.Chem.Int.Ed.Engl.* 58, 50–62

Haji ghasemi M, Tchigvintsev A, Nocek B, Flick R, Popovic A, Hai T, Khusnutdinova A.N, Brown G, Xu X, Cui H, Anstett J, Chernikova T.N, Brüls T, Le Paslier D, Yakimov M.M, Joachimiak A, Golyshina O.V, Savchenko A, Golyshin P.N, Edwards E.A, Yakunin A.F (2018). Screening and characterization of novel polyesterases from environmental metagenomes with high hydrolytic activity against synthetic polyesters. *Environ. Sci. Technol.* 52 (21), 12388–12401.

Hameed N, Salim N.V, Walsh T.R, Wiggins J.S, Ajayan P.M, Fox B.L (2015). Ductile Thermoset polymers via controlling network flexibility. *Chem.Commun. (Camb.)*51, 9903–9906. <https://doi.org/10.1039/c4cc10192h>.

Hamer D.J. Goldsworthy S.D, Costa D.P, Fowler S.L, Page B, Sumner M.D (2013). The endangered Australian sea lion extensively over laps with and regularly becomes by-catch in demersal shark-gill-nets in South Australian helf waters. *Biol.Conserv.*

Han M.J .and Lee S.H (2015). An efficient bacterial surface display system based on a novel outer membrane anchoring element from the *Escherichia coli* protein YiaT. *FEMS Microbiol. Lett.* 362, 1–7

Harrison J.P, Schratzberger M, Sapp M, Osborn A.M (2014). Rapid bacterial Colonization of low-density polyethylene microplastics in coastal sediment Microcosms. *BMC Microbiol.* 14, 232–246. <https://doi.org/10.1186/s12866-014- 0232-4>.

Hartley S. Pahl R, Thompson (2013). Baseline Evaluation of stakeholder perceptions and attitudes towards issues surrounding marine litter, Deliverable D21

Hempel A.S. Bozarth N. Lindenkamp A, Klingl S, Zauner U Linne A (2011). Steinbüchel U.G. Maier, Microalgae bioreactors for bioplastic production, *Microb. Cell Factories* 10, 81.

Huesker: microplastique.auteur: anonyme (2018)

Hlavova Z. Turoczy K. Bisova (2015). Improving microalgae for biotechnology from genetics to synthetic biology, *Biotechnol .Adv.*331194e1203.

Holmes L.A, Turner A, Thompson R.C (2012). Adsorption of trace metals to plastics in pellets in the marine environment. *Environ. Pollut.* 160, 42–48.

Hoornweg D, Bhada-Tata P (2012). What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management. TheWorldBank, Washington, DC. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>.

Horton A.A, Walton A, Spurgeon D.J, Lahive E, Svendsen C (2017). Microplastic in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Sci. Total Environ.* 586, 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.190>.

Hou L, Majumder E.L (2021). Potential for and distribution of enzymatic biodegradation of polystyrene by environmental microorganisms. *Materials* 14 (3), 503.

Hung C.S, Zingarelli S, Nadeau L.J, Biffnger J.C, Drake C.A, Crouch A.L, Barlow D.E, Russell Jr, J.N, Crookes-Goodson W.J (2016). Carbon catabolite repression and imipranil polyurethane degradation in *Pseudomonas protegens* strain pf-5. *Appl. Environ. Microbiol.* 82 (20), 6080–6090.

International Coastal Clean up Report (2017). Ocean conservancy.

https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2017/06/International-CoastalCleanup_2017-Report.pdf. Accessed 20 Jan 2020

Inderthal H (2021). Non-hydrolyzable plastics – an interdisciplinary look at plastic bio-oxidation. *Trends Biotechnol.* 39, 12–23

Isobe A, Kubo K, Tamura Y, Kako S, Nakashima E, Fujii N (2014). Selective Transport of microplastics and mesoplastics by drifting in coastal waters. *Mar. Pollut. Bull.* 89, 324–330.

Isobe A, Uchida K, Tokai T, Iwasaki S (2015). East Asian seas : a hot spot of pelagic microplastics. *Mar. Pollut. Bull.* 101 (2015), 618–623.

Jacobsen J.K, Massey L, Gulland F (2010). Fatal ingestion of floating net debris by two Sperm whales (*Physeter macrocephalus*). *Mar. Pollut. Bull.* 60, 765–767.

Jacquin J, Cheng J, Odobel C, Pandin C, Conan P, Pujo-Pay M, Barbe V, Meistertzheim A.L, Ghiglione J.F (2019). Microbial ecotoxicology of marine plastic debris: a review on colonization and biodegradation by the "plastisphere". *Front. Microbiol.* 10, 865.

Jambeck R, Geyer C, Wilcox T.R, Siegler M, Perryman A, Andrady R, Narayan K.L, Law (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science* 347, 768e771.

Jasna M, Jelena L, Pero T, Dubravka B.V, Jasna S, Josko P (2018). Levels of trace metals on microplastic particles in beach sediments of the island of Vis, Adriatic Sea, Croatia. *Mar. Pollut. Bull.* 137, 231–236.

Jeon H.J., Kim, M.N (2016b). Isolation of mesophilic bacterium for biodegradation of polypropylene. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 115, 244–249.

Jeong C., Kang H., Lee Y.H., Kim M., Lee J., Seo J.S., Wang M., Lee J (2018). Nanoplastic ingestion enhances toxicity of persistent organic pollutants (POPs) in the Monogonont Rotifer *Brachionus koreanus* via multi-xenobiotic resistance (MXR) disruption. *Environ. Sci. Technol.* 52(19), 11411–11418.

- Jobstvogt N. Hanley S. Hynes J. Kenter U (2014).**Witte, Twenty thousand Sterling under the sea: estimating the value of protecting deep-seabiodiversity, *Ecol.Econ.*97, 10e19
- Kaiser D, Kowalski N Waniek J (2017).**Effects of biofouling on the sinking behavior of microplastics.*EnvironResLett*12:124003
- Kale S.K., Deshmukh A.G., Dudhare M.S., Patil V.B (2015).**Microbial degradation of plastic: a review. *J.Biochem.Technol.*6 (2), 952e961.
- Karaduman A (2002).**Pyrolysis of polystyrene plastic wastes with some organic compounds for enhancing styreneyield.*EnergySources*24, 667e674. <https://doi.org/10.1080/00908310290086590>.
- Karan C .Funk M. Grabert M.Oey B. Hankamer (2019).**Green bioplastics as part of acircular bioeconomy, *TrendsPlantSci.*24, 237e249.
- Karthik R, Robin RS, Purvaja R (2018) .**Microplastics along the beaches of southeast coast of India. *SciTotal Environ*645:1388–1399
- Kasuya K., Takagi K., Ishiwatari S., Yoshida Y., Doi Y(1998).** Biodegradabilities of various aliphatic polyeters in natural waters. *Polym. Degrad. Stab.* 59, 327–332. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(97\)00155-9](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(97)00155-9).
- Kim S.-B. Park Q.-G. Tran D.-H.Cho D.-Y.Choi Y.J.Lee H.-S .Kim (2020).**Functional expression of polyethylene terephthalate-degrading enzyme (PETase) in green microalgae, *Microb.CellFactories*19, 97.
- Kirstein S .Kirmizi A. Wichels A .Garin-Fernandez R.Erler M (2016).**L€ Oder, G.Gerds, Dangerous hitchhikers? Evidence for potentially pathogenic Vibriospp. On micro plastic particles ,*Mar .Environ.Res.*120,1e8
- Kirstein I.V., Wichels A., Gullans E., Krohne G., Gerds G(2019).** The Plastisphere - uncovering tightly attached plastic "specific" microorganisms. *PLoS One* 14 (4), e0215859.
- Kawai F (1995).**Break down of plastics and polymers by microorganisms.*Adv.Biochem.Eng.Biotechnol.*52, 151e194.
- Khoironi S .Anggoro (2019).**Evaluation of the interaction among microalgae *Spirulina* sp, plastics polyethylene terephthalate and polypropylenein fresh water environment, *J.Ecol.Eng.*20.
- Khoo K.W.Chew G.Y.Yew W.H.Leong Y.H.Chai P.L.Show W.H.Chen (2020a).**Recent advances in downstream processing of microalgae lipid recovery for biofuel production, *Bioresour. Technol.*304, 122996
- Kühn S Bravo Rebolledo EL, van Franeker JA (2015).**Deleterious effects of litter on marine life.In: Bergmann M, Gutow L, Klages M (Eds) *Marine a thropogenic litter*. Springer, Cham
- Kukulka T.,Proskurowski G.,Moret-Ferguson S.,Meyer D.W.,Law K.L(2012).**The effect mixing on the vertical distribution of buoyant plastic debris.*Geophys.Res.Let.*39,L07601.
- Kumar R., Kanna G., Elumalai S (2017).** Biodegradation of polyethylene by green photosynthetic microalgae. *J. Biorem. Biodegrad.* 8, 2.
- Kunststoff Swiss: simplyscience: le bioplastique auteur: anonyme (2020)**

Laist D.W (1997). Impacts of marine debris: entanglement of marine life in marine debris Including a comprehensive list of species with entanglement and ingested records. In: Coe, J.M., Rogers, D.B. (Eds.), *Marine Debris: Sources, Impacts and Solutions*. SpringerVerlag, New York, pp.99–140.

Lambert S., Wagner M (2017). Environmental performance of bio-based and biodegradable plastics: the road ahead. *Chem. Soc. Rev.* 46, 6855. <https://doi.org/10.1039/c7cs00149e>. *Technol.* 47, 11278–11283.

Land mark treaty on plastic pollution (2022). must put scientific evidence front and Centre, nature, vol.603, n° 7900, 10 mars 2022

Latorre I., Hwang S., Montalvo-Rodriguez, R (2012). Isolation and molecular identification of landfill bacteria capable of growing on di-(2-ethylhexyl) phthalate and deteriorating PVC materials. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng* 47 (14), 2254–2262.

Law (2017). Plastics in the marine environment, *Ann.Rev.Mar.Sci.* 9, 205e229

Lawson T.J., Wilcox C., Johns K., Dann P., Hardesty B.D (2015). Characteristics of Marine debris that entangle Australian fur seals (*Arctocephalus pusillus doriferus*) in Southern Australia. *Mar. Pollut. Bull.* 98, 354–357.

Lee K.-W., Shim W.J., Kwon O.Y., Kang J.-H (2013). Size-dependent effects of 469 micro polystyrene particles in the marine copepod *Tigriopus japonicus*. *Environ. Sci.*

Leja K., Lewandowicz G (2010). Polymer biodegradation and biodegradable. *Polym. Rev. Pol. J. Environ. Stud.* 19 (2), 255–266. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/137/1/012003>.

Lei L., Wu S., Lu S., Liu M., Song Y., Fu Z., Shi H., Raley-Susman K.M., He D (2018). Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebra fish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*. *Sci. Total Environ.* 619–620, 1–8.

Leon V.M., Garcia I., Gonzalez E., Sampler R., Fernandez-Gonzalez V., Muniategui Lorenzo S (2018). Potential transfer of organic pollutants from littoral plastics debris to the marine environment. *Environ. Pollut.* 236, 442–453.

Les microplastiques contaminant les poissons, les fruits de mer et le sel marin. Photo//DR Greenpeace (2018)

L'homme contre la mer : tortue filet de pêche Auteur : anonyme (2010)

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>.

Liu Y., Zhang W., Xu H (2013). Influence of enumeration time periods on detecting Community parameters of periphytic diatoms using an artificial substratum in coastal waters. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 93, 2067–2073.

Liu R. Jiang J. You D. C. G. Muir E.Y. Zeng (2020). Microplastic impacts on Microalgae growth: effects of size and humic acid, *Environ. Sci. Technol.* 54, 1782e1789.

Lobelle D., Cunliffe M (2011). Early microbial biofilm formation on marine plastic debris. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 197–200. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.10.013>.

- Lodish A. Berk S .Zipursky P.M atsudaira D. Baltimore ,J .Darnell (2000).** The Dynamic Plant Cell Wall, WHFreeman, New York.
- Lott C., Eich A., Unger B., Makarow D., Battagliarin G., Schlegel K., Lasut mt., Weber M(2020).** Field and mesocosm methods to test biodegradable plastic flm under marine conditions. PLoS One 15, e0236579. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236579>.
- Lusher AL, McHugh M, Thompson RC (2013).** Occurrence of microplastics in the gastroin-testinal tract of pelagic and demersal fish from the English Channel.MarPollutBull67:94–99
- Lu Y.,Zhang Y.,Deng Y.,Jiang W.,Zhao Y.,Geng J.,Ding L.,Ren H(2016).**Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in Zebra fish(Daniorerio) and toxic effects in liver.Enviro.Sci.Technol.50,4054–4060.
- Machmud R.Fahmi R.Abdullah C.Kokarkin (2013).** Characteristics of red algae bioplastics /latex blends under tension, Int.J.Eng.Sci.5, 81e88.
- Mailhot B., Morlat S., Gardette J.L (2000).**Photo oxidation of blends of polystyrene andPoly (vinylmethylether):FTIRandAFMstudies.Polymer41, 1981–1988.
- Matsuguma Y.,Takada H.,Kumata H.,Kanke H.,Sakurai S.,Suzuki T.,Itoh M.,Okazaki Y.,Boonyatumanond R.,Zakaria M.P.,Weerts S.,Newman B(2017).**Microplastics in sediment coresfrom Asia and Africa as indicators of temporal trends inplasticpollution.Arch.Enviro.Contam.Toxicol.73,230–239.
- Meereboer K.W., Misra M., Mohanty A.K (2020).** Review of recent advances in the biodegradability of polyhydroxyalkanoate (PHA) bioplastics and their composites. Green Chem. 22, 5519. <https://doi.org/10.1039/d0gc01647k>.
- Mekonnen P. Mussone H.Khalil D. Bressler (2013).**Progress in bio-based plastics and plasticizing modifications, J.Mater.Chem.A1, 13379e13398.
- Mohanan N. et al (2020).**Microbial and enzymatic degradation of synthetic plastics. Front.Microbiol. 11,580709
- Molitor R., Bollinger A., Kubicki S., Loeschcke A., Jaeger K.E., Thies S(2020).** Agar plate-based screening methods for the identifcation of polyester hydrolysis by Pseudomonas species. Microb. Biotechnol. 13, 274–284. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13418>.
- Montazer Z., Habibi Najaf M.B., Levin D.B (2019).** Microbial degradation of low-density polyethylene and synthesis of polyhydroxyalkanoate polymers. Can. J. Microbiol. 65 (3), 224–234.
- Montazer Z., Habibi Najaf M.B., Levin D.B (2020).** Challenges with verifying microbial degradation of polyethylene. Polymers 12 (1), 123.
- Mouat J., LopezLozano R., Bateson H (2010).**Economic Impacts of Marine Litters. Kommunenes Internasjonale Milooganisasjon (KMOInternational), UK.
- Mutha N.H., Patel M., Premnath V (2006).**Plastics materials flow analysis for India. Resour. Conserv .Recycl.47 (3), 222e244. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.09.003>.
- Naidoo T., Glassom D., Smit A.J (2015).**Plastic pollution in five urbane stuaries of KwaZulu-Natal, SouthAfrica.Mar.Pollut.Bull.101, 473–480.

Nair L.S., Laurencin C.T(2007). Biodegradable polymers as biomaterials. *Prog. Polym. Sci.* 32, 762. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.05.017>.

Nakashima E., Isobe A., Kako S.,Itai T.,Takahashi S(2012).Quantification of toxic Metals derived from macroplastic litter on Ookushi Beach, Japan.*Environ.Sci.Technol.*46 (18), 10099–10105.

Oberbeckmann S., Löder M.G.J., Labrenz M (2015).Marine microplastic-associated biofilms – are view.*Environ.Chem.*12 (5), 551–562.

Oberbeckmann S., Osborn A.M., Duhaim M.B (2016). Microbes on a bottle: substrate, Season and geography influence community composition of microbes colonizing marine plastic debris. *PloS One* 11, e0159289. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159289>.

O’Brine T., Thompson R.C (2010).Degradation of plastic carrier bags in the marine environment. *Mar.Pollut. Bull.*60, 2279–2283.

Oceanic and Atmospheric Administration Marine Debris Program (2014). Report on the Entanglement of marine species in marine debris with an emphasis on species in the United States .NOAA, Silver Spring, 28p

Olayan H.B., Hami H.S., Owen E.D (1996).Photochemical and thermal crosslinking of polymers. *J.Macromol.Sci.Polym.Rev.*36 (4), 671e719. <https://doi.org/10.1080/15321799608014858>.

Oprea S., Potolinca V.O., Gradinariu P., Oprea V (2018). Biodegradation of pyridine-based polyether polyurethanes by the *Alternaria tenuissima* fungus. *J. Appl. Polym. Sci.* 135, 46096.

Ostle Thompson RC, Broughton D (2019).the rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series.*NatCommun*10:1622

Page B.,McKenzie J.,McIntosh R.,Baylis A.,Morrissey A.,Calvert N.,Haase T.,Berris M.,Dowie D.,Shaughnessy P.D.,Goldsworthy S.D(2004).Entanglement of Australian sea lion sand New Zealand fur seals in lost fishing gear and other marine debris before and after Government and industry attempts to reduce the problem.*Mar.Pollut.Bull.*49, 33–42.

Palmisano A.C., Pettigrew C.A (1992).Biodegradability of plastics. *Bioscience*42 (9), 680e685. <https://doi.org/10.2307/1312174>.

Pathak V.M., Navnett (2017). Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach. *Bioresour. Bioprocess* 4, 15.

Pauli N.C., Petermann J.S., 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.

Penco M., Sartore L., Bignotti F., D’Antone S., Di Landro L (2000). Thermal properties of a new class of block copolymers based on segments of poly (D, L-lactic-glycolic acid) and poly (epsilon-caprolactone). *Eur. Polym. J.* 35 (5), 901–908. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(99\)00155-X](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(99)00155-X).

Peng Y.H., Shih Y.H., Lai Y.C., Liu Y.Z., Liu Y.T., Lin N.C (2014). Degradation of polyurethane by bacterium isolated from soil and assessment of polyurethanolytic activity of a *Pseudomonas putida* strain. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 21 (16), 9529–9537.

Plastique dans la chaine alimentaire : SISL.auteur : anonyme (2018)

Pham CK, Rodríguez DA (2017). Plastic ingestion in oceanic-stage loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*) off the North Atlantic subtropical gyre. *Mar Pollut Bull* 121:222–229

Pinto M., Langer T.M., Hüffer T., Hofmann T., Herndl G.J (2019). The composition of bacterial communities associated with plastic biofilms differs between different polymers and stages of biofilm succession. *PLoS One* 14 (6), e0217165.

Plastic Europe (2017). *Plastics.TheFacts2017: an Analysis of European Plastics Production, Demand and Waste Data.* pp.1–44.

Plastics Europe (2019). *Plastics – the facts 2019.* In: *Plastics Europe*, vol. 2019. Polo, A., Cappitelli, F., Brusetti, L., Principi, P., Villa, F., Giacomucci, L., Ranalli, G., Sorlini, C., 2010. Feasibility of removing surface deposits on stone using biological and chemical remediation methods. *Microb. Ecol.* 60, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00248-009-9633-6>.

Plastics Europe (2020) *Plastics – the facts 2020.* An analysis of European plastics production. Published on line June 21, 2020.

Poisson plein de plastique : les microplastiques. auteur : anonyme (2018)

Pospisil J., Nespurek, S (1997). Highlights in chemistry and physics of polymer Stabilization. *Macromol. Symp.* 115 (1), 143e163. <https://doi.org/10.1002/masy.19971150110>.

Pospisil J., Horak Z., Krulis Z., Nespurek S (1998). The origin and role of structural inhomogeneities and impurities in material recycling of plastics. *Macromol. Symp.* 135 (1), 247e263. <https://doi.org/10.1002/masy.19981350127>.

Pownall (2018). 10 bioplastic projects made from algae, corn starch and other natural materials. <https://www.dezeen.com/2018/10/09/bioplasticprojectsalgaeandcornstarchbeetleshells/>, (Accessed 20 August 2020)

Priestland E, Sherrington C, Darrah C (2017). Single-use plastics and the marine Environment: leverage points for reducing single-use plastics. Report produced for Seas at Risk

Provencher J.F., Bond A.L., Hedd A., Montevecchi W.A., Muzaffar S.B., Courchesne S.J., Gilchrist H.G., Jamieson S.E., Merkel F.R., Falk K., Durinck J., Mallory M.L (2014). Prevalence of marine debris in marine birds from the North Atlantic. *Mar. Pollut. Bull.* 84(2014), 411–417.

Purohit J., Chattopadhyay A., Teli B (2020). Metagenomic exploration of plastic degrading microbes for biotechnological application. *Curr. Genom.* 21 (4), 253–270.

Quehl P. et al (2017). Improving the activity of surface displayed Cytochrome P450 enzyme by optimizing the outer membrane linker. *Biochim. Biophys. Acta Biomembr.* 1859, 104–116

Quel plastique se recycle auteur : anonyme (2018)

Raghul S.S., Bhat S.G., Chandrasekaran M., Francis V., Thachil E.T (2014). Biodegradation of polyvinyl alcohol-low linear density polyethylene-blended plastic film by consortium of marine benthic vibrios. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11 (7), 1827–1834.

- Rahman C. D. Miller (2017)**. Chapter 6—microalgae as a source of bioplastics, in: R.P. Rastogi, D. Madamwar, A. Pandey (Eds.), *Algal Green Chemistry*, Elsevier, Amsterdam, pp. 121–138.
- Rainieri S., Conlledo N., Larsen B.K., Granby K., Barranco A (2018)**. Combined effects of microplastics and chemical contaminants on the organ toxicity of zebra fish (*Danio rerio*). *Environ. Res.* 162, 135–143.
- Rani M., Shim J.W., Han M.G., Jang M., Song Y.K., Hong H.S (2017)**. Benzotriazole-Type ultra violet stabilizers and antioxidants in plastic marine debris and their new products. *Sci. Total Environ.* 579, 745–754.
- Rasul, F. Azeem, M.H. Siddique, S. Muzammil, A. Rasul, A. Munawar, M. Afzal, M.A. Ali, H. Nadeem (2017)**
Chapter 8—algaebiotechnology: a green light for engineered algae, in: K.M. Zia, M. Zuber, M. Ali (Eds.), *Algae Based Polymers, Blends, and Composites*, Elsevier, pp. 301–334.
- Reddy M.S., Yamaguchi T., Okuda T., Tsai T.Y., Nakai S., Nishijima W., Okada M (2010)**. Feasibility study of the separation of chlorinated films from plastic packaging wastes. *Waste Manag.* 30, 597–601.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.11.028>.
- Restrepo-Florez J.M., Bassi A., Thompson M.R (2014)**. Microbial degradation and deterioration of polyethylene—a review. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 88, 83–90.
- Reisser J., Shaw J., Hallegraeff G., Proietti M., Barnes D.K.A., Thums M., Wilcox C., Hardesty B.D., Pattiaratchi C (2014)**. Millimeter-Sized Marine Plastics: a new Pelagic Habitat for microorganisms and invertebrates. *PLoS One* 9(6), e100289. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100289>.
- Rochman CM, Browne MA, Halpern BS (2013)**. Policy: classify plastic waste as hazardous. *Nature* 494:169–171
- Rochman C.M., Lewison R.L., Eriksen M., Allen H., Cook A.M., the S.J (2014b)**. Poly brominated diphenyl ethers (PBDEs) in fish tissue may be an indicator of plastic contamination in marine habitats. *Sci. Total Environ.* 476–477, 622–633.
- Rochman A. Tahir S.L. Williams D.V. Baxa R. Lam J.T. Miller F.-C. Teh S.W. Perilangi S.J. (2015)** Teh, Anthropogenic debris in sea food: plastic debris and fibers from textiles in fish and bivalves sold for human consumption, *Sci. Rep.* 5, 14340.
- Romera-Castillo C., Pinto M., Langer T.M., Alvarez-Salgado X.A., Herndl G.J (2018)**. Dissolved organic carbon leaching from plastics stimulates microbial activity in the ocean. *Nat. Commun.* 9 (1), 1430.
- Rosevelt C., LosHuertos M., Garza C., Nevins H.M (2013)**. Marine debris in central California: quantifying type and abundance of beach litter in Monterey Bay, CA. *Mar. Pollut. Bull.* 71 (1–2), 299–306.
- Romeo T., Pietro B., Pedà C., Consoli P., Andaloro F., Fossi M (2015)**. First evidence of presence of plastic debris in stomach of large pelagic fish in the Mediterranean Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 95, 358–361.
- Roy P.K., Hakkarainen M., Varma I.K., Albertsson A.C (2011)**. Degradable polyethylene: fantasy or reality. *Environ. Sci. Technol.* 45, 4217–4227. <https://doi.org/10.1021/es104042f>.
- Rummel C.D., Jahnke A., Gorokhova E., Kühnel D., Schmitt-Jansen M (2017)**. Impacts of biofilm formation on the fate and potential effects of microplastic in the aquatic environment. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 4 (17), 258–267.

- Ru J., Huo Y., Yang Y(2020).** Microbial degradation and valorization of plastic wastes. *Front. Microbiol.* 11, 442.
- Ryan P.G (1987b).**The effects of ingested plastics on sea birds: correlations between plastic load and body condition.*Environ.Pollut.*46, 119–125.
- Salles F.J (2010).** Deschamps, Allergic contact dermatitis due to a PVC table cover, *Occup. Med.* 60,662e664.
- Santo M., Weitsman R., Sivan A (2013).** The role of the copper-binding enzyme–laccase–in the biodegradation of polyethylene by the actinomycete *Rhodococcus ruber*. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 84, 204 210.
- SAPEA, Science Advice for Policy by European Academies (2020).** Biodegradability of Plastics in the Open Environment. SAPEA, Berlin. https://doi.org/10.26356/biodegradability_plastics
- Saravanan A., Kumar P.S., Vo D.N., Jeevanantham S., Karishma S., Yaashikaa P.R (2021).** A review on catalytic-enzyme degradation of toxic environmental pollutants: microbial enzymes. *J. Hazard Mater.* 419, 126451.
- Sarmah J .Rout (2017).**Colonization of *Oscillatoria* on submerged polythenes in domestic sewage water of Silchartown, Assam (India), *J.Algal BiomassUtln.*8, 135e144.
- Sarmah J .Rout (2018a).** Algal colonization on polythene carry bags in a domestic solid waste dumping site of Silchar town in Assam, *Phykos*48, and 67e77.
- Sarmah J. Rout (2018b).**Biochemical profile of five species of cyanobacteria iso-Lated from polythene surface in domestic sewage water of Silchar town, Assam (India), *Curr.Trends Biotechnol.Pharm.*12.
- Sarmah J. Rout (2018c).**Efficient biodegradation of low-density polyethylene by cyanobacteria isolated from submerged polyethylene surface in domestic sewage water, *Environ.Sci.Pollut.Res.*25, 33508e33520.
- Savoldelli J., Tomback D., Savoldelli H (2017).** Breaking down polystyrene through the application of a two-step thermal degradation and bacterial method to produce useable by products. *Waste Manag.* 60, 123–126. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.04.017>.
- Sekiguchi T., Ebisui A., Nomura K., Watanabe T., Enoki M., Kanehiro H (2009).** Biodegradation of several fbers submerged in deep sea water and isolation of biodegradable plastic degrading bacteria from deep ocean water. *Nippon Suisan Gakkaishi* 75 (6), 1011–1018.
- Sekiguchi T., Sato T., Enoki M., Kanehiro H., Uematsu K., Kato C (2010).** Isolation and characterization of biodegradable plastic degrading bacteria from deep-sea environments. *JAMSTEC-R* 11, 33–41.
- Shi G. Wideman J.H.Wang (2012).**A new approach of BioCO₂ fixation byther-moplastic processing of microalgae, *J.Polym.EnvIRON.*20, 124e131.
- Schmidt C., Krauth T., Wagner S (2017).** Export of plastic debris by rivers into the sea. *Environ. Sci. Technol.* 51, 12246–12253. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>.
- Shah A.A., Hasan F., Hameed A., Ahmed, S(2008).**Biological degradation of plastics: a comprehensive review.*Biotechnol.Adv.*26(3),246e265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>.

- Sharma A. Dubey A. Pareek (2018).** Algal flora on degrading polythene waste, *CIBTechJMicrobiol*3 (2014)43e47.
- Schwibbert K. et al (2019).** Bacterial adhesion on femtosecond laser-modified polyethylene. *Materials* 12, 3107
- Sidek S.F.S. Draman S.R.S. Abdullah N. Anuar (2019).** Current development on bioplastics and its future prospects: an introductory review, *INWASCON Technology Magazine (i-TECHMAG)* 1, 03-08.
- Silva-Cavalcanti JS, Diego J Silva Betal (2017).** Microplastics in gestion by a common Tropical fresh water fishing resource. *Environ Pollut*221:218–226
- Singh B., Sharma N (2008).** Mechanistic implications of plastic degradation. *Polym. Degrad. Stab.*93, 561–584.
- Son, year and body weight. *Mar. Environ. Res.*40 (2), 123e146. [https://doi.org/10.1016/0141-1136\(94\)00140-K](https://doi.org/10.1016/0141-1136(94)00140-K).
- Song Y.K., Hong H.S., Jang M., Han M.G., 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.
- Suaris G., Avio C., Mineo A., Lattin G.L., Magaldi M.G., Belmonte G., Moore C.J., Regoli F., Aliani S (2016).** The Mediterranean Plastic Soup: synthetic polymers in Mediterranean surface waters. *Sci. Rep.* 6, 37551. <https://doi.org/10.1038/srep37551>.
- Sudhakar M., Priyadarshini C., Doble M., Sriyutha Murthy P., Venkatesan R (2007).** Marine bacteria mediated degradation of nylon 66 and 6. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 60, 144–151.
- Suseela K. Toppo (2007).** Algal biofilms on polythene and its possible degradation, *Curr. Sci.*92, 285e287.
- Syranidou E., Karkanorachaki K., Amorotti F., Repouskou E., Kroll K., Kolvenbach B., Corvini PF-X., Fava F., Kalogerakis N (2017).** Développement de consortiums marins indigènes sur mesure pour la dégradation des films de polyéthylène naturellement altérés. *PloS One* 12, e0183984. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183984>.
- Syranidou E., Swift G (1997).** Non-medical Biodegradable Polymers: Environmentally Degradable Polymers. *Hand book of Biodegradable Polymers.* Harwood Academic, Amsterdam, pp.473e511.
- Talleg K., Huvet A., DiPoi C., Gonzalez-Fernandez C., Lambert C., Petton B., LeGoic N., Berchel M., Soudant P., Paul-Pont, I (2018).** Nanoplastics impaired oyster free living stages, gametes and embryos. *Environ. Pollut.*242 (PartB), 1226–1235.
- Tanasupawat T. Takehana S. Yoshida K. Hiraga K. Oda, Ideonella sakaiensis sp. nov (2016).** Isolated from a microbial consortium that degrades poly (ethyleneterephthalate), *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*66, 2813e2818.
- Tang J., Ni, X., Zhou Z., Wang L., Lin S (2018).** Acute micro plastic exposure raises stress response and suppresses detoxification and immune capacities in the scleractin in an coral, *Pocillopora damicornis*. *Environ. Pollut.*243, 66–74.
- Tang G. Y. Yew A.K. Koyande K.W. Chew D.-V. N. VO P. L. Show (2020b).** Green Technology for the industrial production of biofuels and bioproducts from microalgae: are view, *Environ. Chem. Lett.*

- Tang K. S. Khoo K.W. Chew Y. Tao S.-H. Ho P.L. Show (2020a)**. Potential Utilization of bioproducts from microalgae for the quality enhancement of natural products, *Bioresour. Technol.*304, 122997.
- Tang X. et al (2018)**. Challenges and opportunities for alkane functionalisation using molecular catalysts. *Chem.Sci.* 9,288–299
- Takehara I., Kato D.I., Takeo M., Negoro S (2017)**. Draft genome sequence of the nylon oligomer-degrading bacterium *arthrobacter* sp. strain KI72. *Genome Announc.* 5 (17), 17 e00217.
- Teuten E.L., Saquing J.M., Knappe D.R., Barlaz M.A., Jonsson S., Bjorn A., Rowland S.J., Thompson R.C., Galloway T.S., Yamashita R(2009)**. Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wild life. *Philos.Trans.Biol.Sci.*B364,2027–2045.
- Thakur J. Chaudhary B. Sharma A. Verma S. Tamulevicius V.K. Thakur (2018)**. Sustainability of bioplastics: opportunities and challenges, *Curr .Opin .Green SustainableChem.*13, 68e75.
- Thellen C., Coyne M., Froio D., Auerbach M., Wirsén C., Ratto J.A (2008)**. Processing, characterization and marine biodegradation study of melt-extruded polyhydroxyalkanoate (PHA) films. *J. Polym. Environ.* 16, 1–11. [https://doi.org/ 10.1007/s10924-008-0079-6](https://doi.org/10.1007/s10924-008-0079-6).
- Thompson R.C., Olsen Y., Mitchell R.P., Davis A., Rowland S.J., John A.W.G., McGonigle D., Russel A.E (2004)**. Lost at Sea: where is all the plastic? *Science*304 (5672), 838.
- Thompson R.C (2006)**. Plastic debris in the marine environment: consequences and solutions. In: Krause, J.C., Nordheim, H., Bräger, S. (Eds.), *Marine Nature Conservation in Europe*. Federal Agency for Nature Conservation, Stralsund, Germany, pp.107–115.
- Thompson R.C., Swan S.H., Moore C.J., Saal F.S.vom (2009)**. Our plastic age, 364. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, pp. 1973–1976. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0054>.
- Thompson, R.C., 2015**. Microplastics in the marine environment: sources, consequences and solutions. Chapter 7, Pp185–200. In: Bergmann M., Gutow, L., Klages, M. (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Published by Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht, London. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16510-3>.
- Tischler D., Eulberg D., Lakner S., Kaschabek S.R., van Berkel W.J., Schlömann, M(2009)**. Identification of a novel self-sufficient styrene monooxygenase from *Rhodococcus opacus* 1CP. *J. Bacteriol.* 191 (15), 4996–5009.
- Tiwari N., Santhiya D., Sharma J.G (2020)**. Microbial remediation of micro-nano plastics: current knowledge and future trends. *Environ. Pollut.* 265 (Pt A), 115044.
- Topçu E.N., Tonay A.M., Dede A., Öztürk A.A., Öztürk B(2013)**. Origin and abundance of marine litter along sandy beaches of the Turkish Western Black Sea Coast. *Mar. Environ. Res.*85,21–28.
- Tserki V., Matzinos P., Pavlidou E., Vachliotis D., Panayiotou C(2006)**. Biodegradable aliphatic polyesters. Part I. Properties and biodegradation of poly (butylene succinate-co-butylene adipate). *Polym. Degrad. Stab.* 91, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.04.035>.

- Turner A (2018)**. Black plastics: linear and circular economies, hazardous additives and marine pollution. *Environ.Int.*117, 308–318.
- Udyawer V., Read M.A., Hamann M., Simpfendorfer C.A., Heupel M.R (2013)**. First record of sea snake (Hydrophiselegans, Hydrophiinae) entrapped in marine debris. *Mar.Pollut.Bull.*73, 336–338.
- UNEP (2016)**. Marine Plastic Debris and Microplastics – Global Lessons and Research to Inspire Action and Guide Policy Change. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- UNEP/MAP/MEDPOL (2009)**. Results of the assessment of the status of marine litter in the Mediterranean. In: Meeting of MED POL Focal Points No.334, (91pp).
- United Nation Environmental Programme (UNEP) (2011)**. UNEP Year Book 2011: Emerging Issues in Our Global Environment. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- Unger B., Rebolledo E.L., Deaville R., Gröne A., Jsseldijk L.L., Leopold M.F., Siebert Yurtsever T. Ongun Sevindik, H. Tunca (2017)**. The impact of PS micro plastics on Green algae *Chlorella vulgaris* growth, in: 15th International Conference on Environmental Science and Technology. Rhodes, Greece.
- Urbanek A.K., Rymowicz W., Mirończuk A.M (2018)**. Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats. *Appl. Microbial. Biotechnology.* 102 (18), 7669–7678.
- Urbanek A.K., Mirończuk A.M., García-Martín A., Saborido A., de la Mata I., Arroyo M (2020)**. Biochemical properties and biotechnological applications of microbial enzymes involved in the degradation of polyester-type plastics. *Biochimic. Biopsies. Acted Protein Proteomics* 1868 (2), 140315.
- U., Spitz J., Wohlsein P., Herr H (2016)**. Large amounts of marine debris found in Sperm whales stranded along the North Sea coast in 2016. *Mar.Pollut.Bull.*112, 134–141.
- Vaughan R, Turner SD, Rose NL (2017)**. Microplastics in the sediments of a UK urban lake. *Environ Pollut* 229:10–18
- Van Franeker J.A (1985)**. Plastic ingestion in the North Atlantic Fulmar. *Mar.Pollut.Bull.*16, 367–369.
- Volova A.N., Boyandina T.G., Vasiliev A.D., Karpov V.A., Prudnikova S.V., Mishukov O.V., Boyarskikh M.L., Filipenko V.P., Xu'an B.B., D'ung V.V., Gitelson I.I (2010)**. Biodegradation of polyhydroxyalkanoates (PHAs) in tropical coastal waters and identification of PHA-degrading bacteria. *Polym. Degrad. Stab.* 95 (12), 2350–2359. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.08.023>.
- Wagner M., Scherer C., Alvarez Munoz D., Brennholt N., Bourrain X., Buchinger S., Fries E., Grosbois C., Klasmeier J., Marti T., Rodriguez Mozaz S., Urbatzka R., Vethaak A.D., Winther Nielsen M., Reifferscheid G (2014)**. Microplastics in fresh-water ecosystems: what we know and what we need to know. *Environ.Sci.Eur.*26, 12–20.
- Waller H.J., Griffiths C.M., Waluda S.E., Thorpe I., Loaiza B., Moreno C.O., Pachterres, K.A., 2017**. Hughes Microplastics in the Antarctic marine system: an Emerging area of research, *Sci.Total Environ.*598, 220e227.
- Waluda C.M., Staniland I.J (2013)**. Entanglement of Antarctic fur seals at Bird Island, South Georgia. *Mar. Pollut.Bull.*74, 244–252.
- Wang J., Tan, Z., Peng J., Qiu, Q., Li M (2016)**. The behaviors of micro plastics in the marine environment. *Mar. Environ. Res.* 113, 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.10.014>.

- Wang J.,Peng J.,Tan Z.,Gao Y.,Zhan Z.,Chen Q.,Cai,L(2017).**Microplastics in the Surface sediments from the Beijiang River littoral zone: composition, abundance, Surface textures and interaction with heavy metals.Chemosphere171,248–258.
- Wei R., Oeser T., Then J., Kühn N., Barth M., Schmidt J., Zimmermann W (2014).** Functional characterization and structural modeling of synthetic polyester- degrading hydrolases from Thermomonospora curvata. Amb. Express 4, 44.
- Weng Y.-X., Wang Y., Wang, X.-L. Wang Y.-Z (2010).** Biodegradation behavior of PHBV films in a pilot-scale composting condition. Polym. Test. 29, 579–587. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2010.04.002>.
- Willis KA, Eriksen R ,Wilcox Cetal (2017).**Microplastic distribution at different sediment depths in an urbane estuary.FrontMarSci4:419
- Windsor FM, Tilley RM, Tyler CR (2019).** Microplastic in gestion by riverine Macroin vertebrates. Sci Total Environ 646:68–74
- Woodall L C Sanchez-Vidal A ,Canals Metal(2014).**the deep sea is a majorsink for Microplastic debris.RSocOpenSci1 (4):140317
- Wright SL, Rowe D Thompson R Cetal (2013).**Microplastic in gestion decreases energy reserves in marine worms. CurrBiol 23(23):1031–1033
- Wyles S.Pahl K.Thoma S R.C. Thompson (2016).** Factors that can undermine thepsychological benefits of coastal environments: exploring the effect of tidal State, presence, and type of litter, Environ.Behav.48, 1095e1126.
- Yan C. Fan Y .Chen Z.Hu (2016).** The potential for microalgae as bioreactors to produce pharmaceuticals, Int. J.Mol.Sci.17, 962.
- Yang Y., Chen J., Wu W.M., Zhao J., Yang J (2015a).** Complete genome sequence of Bacillus sp. YP1, a polyethylene-degrading bacterium from waxworm’s gut. J. Biotechnol. 200, 77–78.
- Yang Y., Yang J., Wu W.M., Zhao J., Song Y., Gao L., Yang R., Jiang L(2015b).** Biodegradation and mineralization of polystyrene by plastic-eating Mealworms: Part 2. Role of gut microorganisms. Environ. Sci. Technol. 49 (20), 12087–12093.
- Ye S., Andrady A.L (1991).**Fouling of floating plastic debris under Biscayne Bay ex-posure conditions.Mar.Pollut.Bull.22, 608–613.
- Yin C.-F., Xu Y., Zhou N.-Y(2020).** Biodegradation of polyethylene mulching flms by a co-culture of Acinetobacter sp. strain NyZ450 and Bacillus sp. strain NyZ451 isolated from Tenebrio molitor larvae. Int. Biodeterior. Biodegrad. 155, 105089.
- 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). Science 351 (6278), 1196 1199.
- Zhang P.-L.Show S.-H.Ho (2019).** Progress and perspective on algal plastics e a critical review, Bioresour. Technol.289 121700.

Références bibliographiques

Zhangv X. Chen J.Wang L.Tan (2017).Toxic effects of microplastic on marine Microalgae Skeletonema costatum: interactions between microplastic and algae, Environ.Pollut.220, 1282e1288.

Zettler E.R., Mincer T.J., Amaral-Zettler L.A (2013). Life in the “Plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. Environ. Sci. Technol. 47, 7137–7146. <https://doi.org/10.1021/es401288x>.