

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 – TLEMCEM
كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم الأرض والكون
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et des Sciences de la Terre et de
l'Univers
Département Biologie
Laboratoire de Lamaabe



MÉMOIRE

Présenté par

M^{elle} BERKAT Meriem et M^{elle} BENGUEDIH Chahinez

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Microbiologie et contrôle de qualité

Thème

**Biodégradation du plastique par les microorganismes
des eaux douces**

Soutenu le 16 juin 2022, devant le jury composé de :

Président	M ^{me} Mkedder Ilham	MCA	Université de Tlemcen
Encadrant	M ^{me} Brahimi Kholkhal Wahiba	MCB	Université de Tlemcen
Examinatrice	M ^{me} Bensalah Fatéma	MCB	Université de Tlemcen

Année universitaire 2021/2022

Remerciement

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

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

On tient à remercier M^{me} Mkedder Ilham Maitre de conférences Classe A au département de Biologie, université Abou bekr Belkaid -Tlemcen pour nous avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury, Qu'elle trouve ici notre sincères impressions de gratitude et de respect.

Nos remerciements vont aussi à M^{me} Bensalah Fatéma Maitre de Conférences Classe B à l'Université Abou-bekr Belkaid -Tlemcen, d'avoir ménagé son temps pour juger et critiquer ce travail, qu'elle trouve ici toutes nos expressions respectueuses.

Enfin, nous adressons nos remerciements particuliers à tous les enseignants du département de biologie et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Au nom de Dieu le tout puissant ;

J'ai le plaisir à dédier ce modeste travail :

*A mes très **chers parents** qui m'ont donné la vie et qui m'ont fourni au quotidien un soutien et une confiance sans faille. Aucune dédicace ne pourrait exprimer notre respect.*

A mes frères et à mes sœurs.

*A tous la famille **BERKAT**.*

*A tous la famille **BRAHIMI**.*

À mon encadrante, pour sa générosité et son soutien, je lui exprime mon plus profond respect et ma sincère considération.

A mes chères amies.

A tous qui me connaisse de près ou de loin.

Merci à tous.

BERKAT MERIEM

Dédicace

*Après Allah, je veux dédier ce projet de fin d'études
à mes chers parents : Mon cher père **FOUZI**, mon adorable mère et amie
BADIAA et*

*ma grande mère qui m'ont toujours poussé et motivé dans
mes études. Sans leur patience, leur sacrifice
et leur confiance en moi, je n'aurais pas atteint ce jour.*

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

Qu'ils soient remerciés pour ce très humble dévouement.

*Il me fait grand plaisir de dédier ce travail à ma petite sœur : **Amel**
et mon frère : **Akram***

*En signe d'appréciation, de gratitude et d'amour pour le dévouement
et le sacrifice qu'ils m'ont toujours donnés.*

*Enfin à tous mes amis qui n'ont jamais cessé de
me soutenir.*

BENGUEDIH CHAIHINEZ

Résumé

La dépendance à l'égard du plastique pour un grand nombre de produits de consommation, dont beaucoup sont à usage unique, entraîne leur consommation continue.

Dès l'entrée dans les milieux aquatiques, les déchets plastiques peuvent se fragmenter en débris plus petits, certains d'un diamètre de 5 mm (micro plastiques). Les microplastiques sont une préoccupation croissante, mais la recherche sur ce type de pollution s'est principalement concentrée sur les milieux marins, en partie parce que les chercheurs ont pensé que les stations d'épuration pourraient éliminer tous les débris de plastique.

Bien qu'ils soient relativement inertes, ils s'avèrent causer des effets sur les organismes aquatiques.

La dégradation des polymères synthétiques peut généralement être classée comme biotique ou abiotique, suivant des mécanismes différents, selon une variété de facteurs physiques, chimiques ou biologiques

Ensuite, La biodégradation du plastique comporte plusieurs étapes au cours desquelles le polymère est clivé enzymatiquement en oligomères et monomères assimilables par les micro-organismes .

De nombreux taxons microbiens peuvent dégrader les biopolymères, notamment polyhydroxybutyrate (PHB) et polyhydroxybutyrate-polyhydroxyvalérate (PHBV).

Mots clés : le plastique, l'eau douce, la pollution, la dégradation, Biodégradation

Abstract

The reliance on plastic for a large number of consumer products, many of which are single-use, drives their continued consumption.

As soon as it enters aquatic environments, plastic waste can fragment into smaller debris, some with a diameter of 5 mm (micro plastics). Microplastics are a growing concern, but research into this type of pollution has mostly focused on marine environments, in part because researchers thought sewage stations could remove all plastic debris.

Although relatively inert, they have been shown to cause effects on aquatic organisms.

The degradation of synthetic polymers can generally be classified as biotic or abiotic, following different mechanisms, depending on a variety of physical, chemical or biological factors.

Then, the biodegradation of plastic involves several stages during which the polymer is enzymatically cleaved into oligomers and monomers that can be assimilated by microorganisms.

Many microbial taxa can degrade biopolymers, including polyhydroxybutyrate (PHB) and polyhydroxybutyrate-polyhydroxyvalerate (PHBV).

Keywords: plastic, freshwater, pollution, degradation, biodegradation

المخلص

يؤدي الاعتماد على البلاستيك في عدد كبير من المنتجات الاستهلاكية ، والعديد منها للاستخدام الفردي ، إلى استمرار استهلاكها.

بمجرد دخولها إلى البيئات المائية ، يمكن أن تتفتت النفايات البلاستيكية إلى حطام أصغر ، يبلغ قطر بعضها 5 مم (لدائن دقيقة). تشكل اللدائن الدقيقة مصدر قلق متزايد ، لكن البحث في هذا النوع من التلوث ركز في الغالب على البيئات البحرية ، ويرجع ذلك جزئيًا إلى أن الباحثين اعتقدوا أن محطات الصرف الصحي يمكن أن تزيل جميع الحطام البلاستيكي.

على الرغم من أنها خاملة نسبيًا ، فقد ثبت أنها تسبب تأثيرات على الكائنات المائية.

يمكن تصنيف تحلل البوليمرات الاصطناعية عمومًا على أنه حيوي أو غير حيوي ، باتباع آليات مختلفة ، اعتمادًا على مجموعة متنوعة من العوامل الفيزيائية أو الكيميائية أو البيولوجية.

بعد ذلك ، يتضمن التحلل البيولوجي للبلاستيك عدة مراحل يتم خلالها تقطيع البوليمر إنزيميًا إلى أوليغومرات ومونومرات يمكن استيعابها بواسطة الكائنات الحية الدقيقة.

(PHB) يمكن للعديد من الأصناف الميكروبية أن تتحلل من البوليمرات الحيوية ، بما في ذلك بولي هيدروكسي بوتيرات polyhydroxybutyrate-polyhydroxyvalerate (PHBV).

الكلمات المفتاحية: بلاستيك ، مياه عذبة ، تلوث ، تدهور ، تحلل حيوي

Liste des abréviations

NTC: Nanotubes de carbone.

PP: Polypropylène.

PVC: Polychlorure de vinyle.

PET: Polyéthylène téréphtalate.

PUR: Polyuréthane .

HDPE: Polyéthylène haute densité.

PHA: Polyhydroxyalcanoates .

PLA: Polylactides.

NTC: Nanotubes de carbone.

PP: Polypropylène.

PVC: Polychlorure de vinyle.

PET: Polyéthylène téréphtalate.

PUR: Polyuréthane .

HDPE: Polyéthylène haute densité.

PHA: Polyhydroxyalcanoates .

PLA: Polylactides.

UV : Ultraviolet.

PE: Polyéthylène.

PP: Polypropylène.

PS: Polystyrène.

PM : Microplastique

PET: Polyéthylène téréphtalate.

PVC: Polychlorure de vinyle.

PA : Poly amide

PUR : Polyuréthane.

ASTM: American Society for testing and materials .

ISO: Organisation internationale pour Normalisation.

MEB: Microscope électronique à balayage.

UV-A : Ultra-Violet classe A **UV-B :** Ultra-Violet classe B

Liste des figures

Figure 1 : La pollution des microplastiques en l'eau douce.....	10
Figure 2 : Carte de distribution des microplastiques dans les systèmes d'eau douce (basée sur les données du tableau).....	16
Figure 3 : un schéma schématique du processus général impliqué dans la dégradation du plastique.....	23
Figure 4 : Un diagramme schématique des paramètres et des méthodologies utilisées pour la caractérisation de la dégradation du plastique et de la formation de microplastiques au cours des processus de dégradation.....	29
Figure 5 : Textures de surface d'échantillons de plastique typiques caractérisés à l'aide d'un microscope optique (a), SEM (b) et AFM (c).....	30
Figure 6 : Initiatives pour réduire ou valoriser les déchets d'emballages. (a) ¼ magasin « Unverpackt » en Allemagne où les clients peuvent acheter de la nourriture en vrac, en apportant leurs propres contenants.©Martin Thiel. (b)¼Inverse distributeurs automatiques acceptant les bouteilles en verre et en plastique et les canettes en aluminium dans un supermarché du États-Unis.	36

Liste des tableaux

Tableau 1 : La liste sélective des composés additifs utilisés pour rendre les plastiques adaptés à l'usage (Lambert et Wagner, 2018).....	5
Tableau 2 : Un bref profil du développement plastique basé sur (Lambert ,2013).....	8
Tableau 03 : Concentrations et tailles de microplastiques trouvés dans des échantillons provenant d'environnements d'eau douce (Li et al., 2020).....	15
Tableau04 : Sources, mesures et stratégies d'atténuation en amont des microplastiques.(Wagner et Lambert,2018).....	35

Table des matières

Résumé /Abstract/ملخص

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Chapitre I : Le plastique

I. Généralité5

I.1. Définition5

I.2. Les types de plastique7

I.2.1. Les grands types de plastiques7

I.2.2. Types de plastique selon la dégradation9

Chapitre II : La pollution des eaux douces par le plastiques

I. Sources de pollution par les microplastiques.....10

I.1. Passage via les stations d'épuration.....11

I.2. Application de bio solide des stations d'épuration vers les terres agricoles.....12

I.3. Tempête ou orage des eaux pluviales.....13

I.4. rejet de produits industriels ou processus.....13

I.5. le dépôt atmosphérique de fibres.....14

I.6. Les films plastiques.....14

I.7. Autres.....14

II. Distribution des plastiques en eau douce15

III. Les effets de la pollution plastique des eaux douces.....18

III.1. Les Effets biologiques des plastiques sub micrométriques18

III. 2. Absorption et effets biologiques19

VI. Interactions du plastique avec d'autres composés20

CHAPITRE III :La dégradation du plastique

I-Dégradation du plastique22

I.1. Définition22

I.2. Mécanismes de dégradations du plastique22

I.2.1. Dégradation abiotique des plastiques23

I.2.1.1. Photo dégradation des plastiques24

I.2.1.2. Dégradation thermique	24
I.2.1.3. Dégradation chimique des plastiques.	25
I.2.1.4. Dégradation mécanique des plastiques.....	25
I.2.2. Dégradation biotique.....	25
I.3. Facteurs influençant la dégradation du plastique	28
I.4. Caractérisation du plastique dégradé	28
I.4.1. Composition chimique	29
I.4.2. Apparence et texture	30
I.4.4. Propriétés mécaniques.....	31
I.4.5. perte de poids et dégagement de gaz.....	31
II. Biodégradation	32
II.1. Biodégradabilité in situ des plastiques et composés associés au plastique.....	33
II.2. Le Plastisphère d'eau douce.....	34
III. Moyen d'élimination de la pollution plastique	35
III.1. Réduire les déchets plastiques	36
III.2. Gestion des déchets de plastiques	37
Conclusion Générale	40
Références et bibliographies.....	43

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les plastiques sont des matériaux polymères synthétiques à longue chaîne qui sont largement utilisés dans de nombreux aspects de la vie en raison de leurs excellentes caractéristiques telles que la légèreté, la forte plasticité, la flexibilité, l'isolation thermique et électrique, la résistance à la corrosion et le faible coût. **(Plastics Europe, 2007 ; 2019).**

La production mondiale de plastiques (hors fibres) est passée de 1,3 million de tonnes en 1950 à 359 millions de tonnes (dont les fibres de Polypropylène (PP)) en 2018 **(Plastics Europe, 2007 ; 2019).**

Basé sur leur production de masse et utilisation, les produits en plastique pénètrent inévitablement dans le milieu aquatique **(Jambeck *et al.*, 2015 ; Geyer *et al.*, 2017).**

En raison de pratiques de gestion et d'élimination inappropriées, une grande quantité de déchets plastiques pénètrent dans l'environnement par divers voies d'accès et causent de graves problèmes de pollution de l'environnement **(Jambeck *et al.*, 2015 ; Geyer *et al.*, 2017).**

Une fois dans l'environnement, les déchets plastiques peuvent se décomposer lentement et générer de nombreux petits débris plastiques sous l'action de facteurs physiques, chimiques et processus biologiques **(Plastics Europe 2019).**

La dégradation des déchets plastiques dans l'environnement est considérée être un processus majeur contribuant à la formation de micro plastiques **(Ivleva *et al.*, 2017).**

Ces derniers sont distribués dans le monde entier dans les environnements aquatiques. Cependant, la connaissance des impacts de la pollution microplastique dans les environnements d'eau douce est encore balbutiante par rapport à celui des milieux marins, malgré le fait que l'eau douce est une source d'eau potable **(Ivleva *et al.*, 2017).**

L'objectif de notre étude est d'évaluer l'ampleur de la pollution plastique dans les milieux d'eau douce, fournir des informations compilées à partir de recherches récentes associés aux sources, à la présence, au devenir, aux effets, dégradation abiotique, biodégradation par les microorganismes et moyens d'éliminations des déchets de plastiques dans les milieux d'eau douce.

Pour cela, nous avons analysés les dix articles ci-dessous :

- Microplastics Are Contaminants of Emerging Concern in Freshwater Environments: An Overview: Lambert S et Wagner M (2018). In M. Wagner, S. Lambert (eds.), Freshwater Microplastics. The Handbook of Environmental Chemistry 58.
- Analysis, Occurrence, and Degradation of Microplastics in the Aqueous: Lambert S et Wagner M (2018). In M. Wagner, S. Lambert (eds.), Freshwater Microplastics. The Handbook of Environmental Chemistry 58.
- Microplastic-Associated Biofilms: A Comparison of Freshwater and Marine Environments : Lambert S et Wagner M (2018). In M. Wagner, S. Lambert (eds.), Freshwater Microplastics. The Handbook of Environmental Chemistry 58.
- Microplastic: What Are the Solutions? : Lambert S et Wagner M (2018). In M. Wagner, S. Lambert (eds.), Freshwater Microplastics. The Handbook of Environmental Chemistry 58.
- Microplastics in freshwater sediment : review on methods ,occurrence ,and sources Yang L ,Zhang Y , Kang S, Wang Z , Wu C, Science of the Environment 754(2021)141948.
- Assessment of microplastics in freshwater systems: A review Li C a, Busquets R., Campos L C, Science of the Total Environment 707 (2020) 135578.
- Microplastics in freshwater and terrestrial environments: Evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. Horton, A A, Walton A, Spurgeon D J, Lahive E, Svendsen C ,Science of the Total Environment 586 (2017) 127–141.
- Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality Koelmans A A, Nor N H M, Hermesen E, Kooi M,Mintenig S M, Jennifer De France Water Research 155 (2019) 410e422.
- Interaction of freshwater microplastics with biota and heavy metals: a review/ Naqash1 N · Prakash2 S · Kapoor3 D·Singh1 R ,Environmental Chemistry Letters (2020) 18:1813–1824.
- Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment: A review* Zhang k , Hamidian A H, Tubi A, Zhang Y,James K.H. Fang, Wu C ,Paul K.S. Lam Environmental Pollution 274 (2021) 116554.

En plus du résumé et d'Introduction, ce manuscrit fera appel à trois parties principales, le premier chapitre exposera et décrira des généralités sur les plastiques. Le second chapitre sera consacré à la pollution des eaux douces par le plastique et le troisième chapitre donne l'essentiel sur la dégradation du plastique dans les eaux douces.

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

Chapitre I

Le plastique

I. Généralité

I.1. Définition

Les plastiques sont des matériaux polymères synthétiques à longue chaîne. Ils sont largement utilisés dans de nombreux aspects de la vie en raison de leurs excellentes caractéristiques telles que la légèreté, la forte plasticité et la flexibilité, l'isolation thermique et électrique, la résistance à la corrosion et le faible Coût (**Plastics Europe, 2007; 2019**).

Afin de les transformer en matériaux adaptés à l'usage, ils sont généralement traités avec une gamme de produits chimiques additifs (**tableau 1**). Ces composés sont utilisés afin d'ajuster les propriétés de matériaux et les rendre adaptés à l'usage auquel ils sont destinés. Par conséquent, au sein des classifications des polymères les matériaux plastiques peuvent encore différer en termes de structure et de performances et selon le type et la quantité d'additifs avec lesquels ils sont composés (**Lambert et Wagner, 2018**).

Tableau 1 : La liste sélective des composés additifs utilisés pour rendre les plastiques adaptés à l'usage (**Lambert et Wagner, 2018**).

Composés additifs	Fonction
Plastifiants	Rendent le matériel souple
Retardateurs de flamme	Réduisent l'inflammabilité
Additifs de réticulation	Relient les chaînes polymères
Antioxydants et autres stabilisants	Augmentent la durabilité des plastiques en ralentissant la vitesse à laquelle l'oxygène, la chaleur et la lumière dégradent le matériel
Sensibilisants (ex. transition pro-oxydante, complexes métalliques)	Utilisés pour donner des propriétés de dégradation accélérée
Tensioactifs	Utilisés pour modifier les propriétés de surface pour permettre l'émulsion de substances normalement incompatibles
Charges inorganiques	Utilisées pour renforcer le matériel pour améliorer l'impact de la résistance
Pigments	Pour la couleur

Récemment, les progrès technologiques ont vu le développement de nouvelles applications d'éléments basés sur des nano échelles qui produisent maintenant des nano composites plastiques. L'industrie des plastiques devrait être un domaine majeur d'innovation dans les nanotechnologies. Ces nano composites comprennent des matériaux renforcés avec des nano-charges (nano-argile et nano-silice) pour la réduction de poids, des nanotubes de carbone (NTC) pour une résistance mécanique améliorée, et le nano-argent utilisé comme agent antimicrobien dans les matériaux d'emballage alimentaire en plastique (Roes *et al.*, 2012).

Par ailleurs, la production mondiale de plastiques (hors fibres) est passée de 1,3 million de tonnes en 1950 à 359 millions de tonnes (y compris les fibres de polypropylène (PP) en 2018 (Plastics Europe, 2007 ; 2019).

Cependant, les données de production des tissus synthétiques, y compris le polyester, les fibres de nylon, acryliques, cellulosiques et PP ne sont pas facilement disponibles (Reimschuessel, 1977 ; Woodings, 2001).

En effet, la première production commerciale de fibres cellulosiques a commencé en 1892, mais le nylon n'a été découvert que dans les années 1930 et la production de fibres artificielles a rapidement augmenté depuis (Reimschüssel, 1977 ; Woodings, 2001). Il a été rapporté qu'un total de 60,4 millions tonnes de fibres synthétiques étaient demandées en 2014, et la production du polyester a dépassé le coton en 2002 avec un rythme nettement plus rapide que ceux de toutes les autres fibres et atteindra environ 50 millions de tonnes en 2020 (Carmichael, 2015).

I.2. Les types de plastique

Les plastiques sont nombreux et variés, dont ils sont répartis en fonction de leur mode de fabrication et de leurs durabilités. Ils existent plusieurs grandes catégories (Roes *et al.*, 2012).

I.2.1. Les grands types de plastiques

Le premier polymère synthétique à entrer dans la production de masse a été la bakélite, une résine phénol-formaldéhyde, développée par le chimiste belge Leo Baekeland en 1909 (Vlachopoulos *et al.*, 2003). Plus tard, vers les années 1930, des formes modernes de PVC, de polyéthylène téréphtalate (PET), polyuréthane (PUR) et un PS plus transformable ont été développés (Brandsch *et al.*, 2008).

Le début des années 1950 a vu le développement du polyéthylène haut densité (**HDPE**) et le polypropylène (PP) (**tableau 2**). Dans les années 1960, les progrès de la science des matériaux ont conduit au développement de plastiques produits à partir d'autres ressources (Lambert S (2015)), tels que la fermentation bactérienne des sucres et des lipides qui comprend les polyhydroxyalcanoates (PHA), les polylactides (PLA), les polyesters aliphatiques et les polysaccharides (**CSK *et al.*, 2003**). Le PLA est sur le point d'entrer dans la production en vrac, tandis que la production de PHA se situe entre l'usine pilote et le stade commercial (**Amulya *et al.*, 2015 ; Mohan, 2016**).

I.2.2. Types de plastique selon la dégradation

Le terme « microplastiques » fait généralement référence aux particules de plastique dont le diamètre le plus long est <5 mm et correspond à la définition utilisée par la plupart des auteurs. Il a été suggéré que le terme microplastiques soit redéfini comme des articles <1 mm pour inclure uniquement les particules dans le gamme de taille micrométrique (**Andrady, 2011; Browne *et al.*, 2011**), et le terme «mésoplastique» introduit pour tenir compte de objets entre 1 et 2 500 mm (**GESAMP, 2015**). Lambert et al.(2014) ont décrit les macroplastiques comme > 5 mm, mésoplastiques de 5 à > 1 mm, microplastiques de 1 mm à > 0,1 µm, et nanoplastiques à 0,1 µm. Cependant, la limite supérieure de 5 mm est généralement acceptée parce que cette taille est capable d'inclure une gamme de petites particules qui peuvent être facilement ingéré par des organismes (**GESAMP, 2015**).

Tableau 2 : Un bref profil du développement plastique basé sur Lambert (Lambert, 2013)

Année	Type de polymère	Inventeur/Notes
1839	Latex de caoutchouc naturel	Charles Goodyear
1839	Polystyrène	Eduard Simon
1862	Parkésine	Alexandre Parkes
1865	Cellulose acétate	Paul Schutzenberger
1869	Celluloïd	John Wesley Hyatt
1872	Chlorure de polyvinyle	Créé pour la première fois par Eugen Baumann
1894	Viscose rayonne	Charles Frederick Cross
1909	Bakélite	Leo Hendrik Baekeland
1926	PVC plastifié	Walter Semon
1933	Chlorure de polyvinylidène	Ralph Wiley
1935	Polyéthylène basse densité	Reginald Gibson et Eric Fawcett
1936	Acrylique ou poly méthacrylate de méthyle	/
1937	Polyuréthane	Otto Bayer et ses collaborateurs
1938	Polystyrène	En tant que polymère commercialement viable
1938	Polyéthylène téréphtalate	John Whinfield et James Dickson
1942	Polyester insaturé	John Whinfield et James Dickson
1951	Polyéthylène haute densité	Paul Hogan et Robert Banks
1951	Polypropylène	Paul Hogan et Robert Banks
1953	Polycarbonate	Hermann Schnell
1954	Styromousse	Ray McIntire
1960	L'acide poly lactique	Patrick Gruber
1978	Polyéthylène basse densité linéaire	Dupont

Chapitre II

Chapitre II

La pollution des eaux douce par le plastique

I. Sources de pollution par les microplastiques

Les plastiques pénétreront dans les environnements d'eau douce à partir de diverses sources par divers itinéraires. Les déchets sauvages sur les terres constituent un problème environnemental et public important (Njeru, 2006 ; Seco Pon Becherucci, 2012).

Il est un sujet de préoccupation croissante dans les aires protégées où les volumes sont influencés par densité de visiteurs ; par conséquent, des mesures sont maintenant nécessaires pour réduire et atténuer les conséquences sur l'environnement (Cierjacks *et al.*, 2012).

De plus, les pratiques de gestion des déchets dans différentes régions du monde varient également, et cela peut être une source plus importante dans une région géographique par rapport à une autre (Lambert *et al.*, 2014).

Comme les macros plastiques (Fig.1), les microplastiques peut pénétrer dans l'environnement par un certain nombre de voies. Par exemple, les microplastiques primaires utilisés dans les cosmétiques sont probablement plus importants dans les régions riches (Lambert *et al.*, 2014).

Une corrélation spatiale a été trouvée entre les types de les microplastiques trouvés sur des sites particuliers et les activités humaines dans les zones environnantes (Lechner *et al.*, 2014). De plus, le type de polymère et leur concentration peut être utilisée pour relier les microplastiques à leur origine.



Figure 1 : La pollution d'eau douce par les déchets de plastique (source geo.fr/environnement. Visité le 12 Avril 2022)

Par exemple, les microplastiques trouvés dans les Grands Lacs d'Amérique du Nord sont similaires en taille, forme, couleur et composition élémentaire à ceux trouvés dans les nettoyants pour le visage (**Eriksen *et al.*, 2013**).

Contrairement aux rivières, les masses d'eau stationnaires telles que les lacs peuvent accumuler davantage de microplastiques (**Imhof *et al.*, 2013 ; Free *et al.*, 2014**).

De grandes quantités de microplastiques secondaires (ou microplastiques dérivés de la fragmentation d'autres plastiques) ont été trouvés le long des rives de lacs des montagnes peu peuplées, où la pollution microplastiques primaire était rare (**Free *et al.*, 2014**).

En effet les microplastiques ont plusieurs voies potentielles de rejet dans l'environnement :

I.1. Passage via les stations d'épuration

Soit à partir de l'utilisation des MP dans les produits de soins personnels ou de la libération de fibres des textiles pendant le lavage des vêtements, aux eaux de surface.

Les particules qui ne sont pas retenues dans les boues d'épuration, ou retirées par écrémage pendant le processus de traitement, seront entrées dans l'environnement via l'apport d'effluents dans les rivières. Pour les microplastiques primaires et microfibrilles secondaires, on pense que les effluents du traitement des eaux usées être une source majeure de microplastiques pour les masses d'eau douce (**Zubris et Richards, 2005 ; Browne *et al.*, 2011 ; Dubaish et Liebezeit, 2013 ; Free *et al.*, 2014**).

Les microfibrilles synthétiques ont été identifiées par de nombreuses études comme les plus abondantes type de particules microplastiques que l'on trouve dans les eaux douces, terrestres et milieux marins (**Zubris et Richards, 2005 ; Browne *et al.*, 2011 ; Dubaish et Liebezeit, 2013 ; Free *et al.*, 2014**), avec des microfibrilles des produits de soins personnels sont également susceptibles de représenter un important contributeur à la pollution microplastique (**Castañeda *et al.*, 2014 ; Napper *et al.*, 2015 ; Murphy *et al.*, 2016**).

En même temps, des particules de microplastique dans les effluents d'une station d'épuration ont été très similaires en couleur, forme et taille à celles des formulations de dentifrice, révélant que les particules de plastique dans les produits de soins personnels peuvent

être parmi les sources de pollution microplastique dans les milieux d'eau douce (**Carr et al., 2016**).

Le nettoyage des tissus synthétiques tels que les vêtements (eaux grises) constitue une contribution majeure (**Browne, 2015 ; Peng et al., 2017**).

Les polymères utilisés dans les textiles synthétiques comprennent le polyester et le nylon, tandis que le polyéthylène ou le polypropylène sont couramment utilisés comme microbilles ou paillettes dans les cosmétiques (**Browne, 2015 ; Peng et al., 2017**).

I.2. Application de biosolides des stations d'épuration vers les terres agricoles

Comme traitement des eaux usées les travaux sont efficaces pour éliminer la majorité des particules microplastiques des eaux usées, bon nombre des particules éliminées seront retenus dans les boues (**Magnusson et Norén, 2014 ; Nizzetto et al., 2016 ; Mintenig et al., 2017**).

Un apport direct important de microplastiques primaires dans les environnements terrestres a été identifié comme étant l'application de boues d'épuration contenant des fibres synthétiques ou des microplastiques sédimentés. des soins personnels ou des produits ménagers à la terre (**Habib et al., 1996 ; Zubris et Richards, 2005**).

En Europe, il est courant de composter et de pasteuriser les boues d'épuration pour les utiliser comme engrais agricoles ainsi que d'éliminer de grandes quantités de boues produit par le traitement des eaux usées vers la terre (**DEFRA, 2012**). Compris entre quatre et cinq millions de tonnes de poids sec de boues d'épuration sont épandues chaque année sur des terres arables dans l'Union européenne (**Ciešlik et al., 2015 ; Willén et al., 2016**), bien que les taux d'application soient très variables entre pays (**Nizzetto et al., 2016b**).

Malgré la réglementation sur les substances nocives dans les boues épandues sur les terres, les microplastiques ne sont pas encore pris en compte par celles-ci et donc leur masse appliquée par inadvertance débarquer annuellement peut dépasser 400 000 tonnes – plus que la masse actuellement estimé être présent dans les eaux de surface océaniques du monde entier (**Nizzetto et al., 2016b**).

Zubris et Richards, (2005) ont découvert que les sols ayant des antécédents connus d'épandage de boues d'épuration contenaient des concentrations significativement plus élevées de microfibrilles synthétiques que les sols qui n'avaient pas reçu de boues d'épuration.

Dans certains sites de terrain, synthétique des microfibrilles ont été trouvées 15 ans après la dernière application de boues (**Zubris et Richards, 2005**). Cela suggère que les microplastiques et les fibres synthétiques sont susceptibles de s'accumuler dans les sols après des déversements répétés de boues applications.

I.3. Tempête ou orage des eaux pluviales

Le ruissellement via les fossés de drainage des terres agricoles ou les égouts pluviaux des routes contenant des matières plastiques telles que des particules d'usure de pneus, des débris dérivés de véhicules ou des fragments de peintures de marquage routier constituent une autre source importante de charges microplastiques fluviales (**Browne et al., 2010 ; Eriksen et al., 2013 ; Galgani et al., 2015 ; Tibbets, 2015 ; Horton et al., 2016**).

En outre, l'action du vent peut également transporter des objets en plastique plus légers dans les plans d'eau ou à travers la terre (**Zylstra, 2013**) et il existe des preuves suggérant qu'une fibre anthropique peut être transportée et déposée par Tomber. Cela semble être particulièrement important dans les zones urbaines, les dépôts augmentant pendant les périodes de pluie (**Dris et al., 2016**).

I.4. Rejet de produits industriels ou processus

Les sources industrielles de microplastiques peuvent également être identifiées même dans les grands fleuves tels que le Danube (**Lechner et al., 2014**).

Des particules et des microsphères de résine industrielle se sont avérées être abondantes dans le lac Érié près de la zone industrielle du lac Huron (**Zbyszewski et Corcoran, 2011 ; Eriksen et al., 2013**).

I.5. Le dépôt atmosphérique de fibres

Bien que les fibres trouvées dans les études atmosphériques n'étaient pas exclusivement synthétiques (63 % de fibres étaient des polymères purs), avec un dépôt estimé entre 3 et 10 tonnes de fibres déposées annuellement sur une surface d'environ 2500 km² (sur la base de la

région parisienne), cela peut donc encore représenter une voie importante des microplastiques des produits de consommation vers l'environnement (**Dris *et al.*, 2016 , 2017**).

Les particules en suspension dans l'air sont déterminés comme provenant de diverses sources, y compris les matériaux de construction, le gazon artificiel et la poussière domestique (**Magnusson *et al.*, 2016**).

I.6. Les films plastiques

Ils sont utilisés pour la production agricole et considérés comme une importante émission agricole et de contamination plastique des sols (**Xu *et al.* , 2006a ; Kyrikou, Briassoulis, 2007**).

Leurs avantages incluent la conservation de l'humidité (réduisant ainsi l'irrigation et la croissance des mauvaises herbes) ; l'augmentation de la température du sol (diminuant la compétition pour les éléments nutritifs et le coût de la fertilisation par les engrais) et protection contre les intempéries (**Klemchuk, 1990 ; Liu *et al.* , 2014**).

Cependant, les intempéries peuvent rendre les films cassants et difficiles à récupérer, entraînant la désintégration du matériau et, lorsqu'ils sont couplés à des précipitations successives, les résidus et les particules désintégrées peuvent être emportés dans le sol où ils s'accumulent (**Klemchuk, 1990 ; Xu *et al.* ,2006b ; Liu *et al.* , 2014**).

I.7. Autres

Elles comprennent les émissions de chantiers de fabrication et de construction. Les particules d'usure des pneus d'automobiles peuvent également libérer de grands volumes de particules synthétiques. Ils sont reconnus comme une source de Zn pour l'environnement, avec des concentrations anthropiques de Zn qui sont étroitement corrélés à la densité du trafic (**Council *et al.* , 2004**).

De plus, les zones proches des sites touristiques sont également particulièrement touchées par la pollution microplastique (**Xiong *et al.*, 2018**).

II. Distribution des plastiques dans l'eau douce

Le **tableau 1** compile des études récentes faisant état de microplastiques dans les environnements d'eau douce, et souligne qu'il est difficile de comparer les concentrations trouvées par chaque étude (**Li et al., 2020**).

D'après ce tableau, la concentration de microplastiques dans les sédiments est supérieure à celui de l'eau, cela peut être dû à une combinaison de facteurs y compris leur nature hydrophobe et leur densité, et par conséquent, ils ont tendance à s'accumuler dans les sédiments.

Tableau 3 : Concentrations et tailles de microplastiques trouvés dans des échantillons provenant d'environnements d'eau douce (**Li et al., 2020**).

Lat. , Lot	Pays	Emplacement	Concentration moyenne à partir des études	Estimé Unités MP• L-1	Echantillon	Taille	Méthode	Reference
55.367,-3.96142	UK	Rivière Kelvin	0.26685 g/L	296.5	sédiment	2.8 mm-11 μm	SEM-EDS	Blair et al
29.00896, 116.69785	China	Lac Poyang	0.2034 g/L	226	Sédiment et Surface	0.5 mm	Raman	Yuan et al.
44.37996, -108.03899	Europe	Bassin des Carpates	0.4716 g/L	524	Sédiment et Surface	0.3 mm	FTIR	Bordós et al.
37.27442, 9.87391	Tunisie	le lagon de Bizerte	2.106 g/L	2340	Sédiment	5 mm – 0.2 mm	FTIR	Toumi et al.
32.1058579, 115.9381508	Australie	Rivière Bloukrans	0.216 g/L	240	Sédiment	500 μm	Visuel Inspection	Nel et al.
52.13191, -97.26176	Canada	Lac Winnipeg	1.7397 g/	1933	Les eaux de surface	5 mm	SEM-EDS	Anderson et al. (2017)
42.64326, 11.98514	Italie	Lac de Chiusi et Lac de Bolsena	2.5 particles/m3	0.025	Sédiment et Surface	5 mm	Fischer et al., 2016	Fischer et al., 2016

La **figure 2** montre où la recherche sur les microplastiques se concentre et met en évidence les endroits où leur surveillance fait actuellement défaut, par ex : Amérique du Sud, Moyen Orient, Afrique et Russie. D'après les données de la carte, l'une des études les plus frappantes provient du Bassin des Grands Lacs d'Amérique du Nord, où l'abondance moyenne des microplastiques flottant à la surface atteignaient 43 000 unités km⁻² (**Eriksen *et al.*, 2013**).

La plus grande présence de microplastiques en Europe a été signalé dans le lac Léman, Suisse, atteignant 48 146 unités km⁻² (**Florian Faure *et al.*, 2012**).

Cependant, la pollution micros plastique dans les environnements d'eau douce d'Asie peuvent être plus graves que ceux d'autres parties du monde (**Wu *et al.*, 2018**).

Cependant, la contamination micros plastique des environnements d'eau douce a été trouvée même dans des régions éloignées; bien que les études soient limitées, cela suggère que les microplastiques sont distribués dans les systèmes d'eau douce à travers le monde. Par conséquent, d'autres systèmes devraient être étudiés pour combler le vide dans les connaissances sur la répartition de la pollution micros plastique dans les environnements d'eau douce à l'échelle mondiale (**Free *et al.*, 2014**).



Figure 2: Carte de distribution des microplastiques dans les systèmes d'eau douce (basée sur les données du tableau. (**Li *et al.*, 2020**).

III. Les effets de la pollution de plastique des eaux douces

Une fois dans le milieu aquatique, la mobilité et la dégradation des plastiques généreront un mélange de matériaux d'origine, de particules fragmentées de différentes tailles et d'autres produits de dégradation non polymères (**Lambert et Wagner, 2018**).

En conséquence, le biote sera exposé à un mélange complexe de plastiques et de produits chimiques associés au plastique qui change avec le temps et l'espace (**Lambert et Wagner, 2018**).

III.1. Les Effets biologiques des plastiques sub-micros métriques

Selon leur utilisation, les matières plastiques peuvent contenir des composés tels que des agents antimicrobiens et des nanomatériaux qui peuvent être toxiques pour les microorganismes (bactéries et champignons) qui jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement de l'écosystème (**Lambert et Wagner, 2018**).

De plus, Il est possible qu'une combinaison de particules microscopiques, d'additifs lessivés et d'autres produits de dégradations puisse avoir des effets subtils sur les organismes aquatiques et terrestres (**Lambert et Wagner, 2018**).

- Les nanoparticules manufacturées (ENP) sont capables de traverser la membrane cellulaire et s'intériorisent, dont leur absorption par endocytose ou phagocytose dépend de leur taille (**Nowack, Bucheli, 2007**).
- Une fois à l'intérieur de la cellule, ils sont stockés dans les vésicules et les mitochondries et capables d'exercer une réponse (**Nowack, Bucheli, 2007**).
- Les réponses cellulaires comprennent le stress oxydatif, l'activité antioxydante et la cytotoxicité (**Oberdorster et al., 2006**).

En termes d'évaluations de la toxicité, il est nécessaire de comprendre la structure moléculaire, les voies cellulaires, la cinétique d'absorption, de distribution, de métabolisme et les mécanismes d'excrétion qui peuvent être uniques aux MP dans la gamme nanométrique (**Lambert et Wagner, 2018**).

Desai et al.,(1997) ont montré que des particules de 100 nm d'un copolymère d'acide polyglycolique polylactique avaient une absorption intracellulaire dix fois plus élevée dans une culture cellulaire in vitro par rapport à des particules de 10 µm constituées du même matériau.

Les ENP ont également produit des réponses sur le stress cytotoxique, génotoxique, inflammatoire et oxydatif dans les systèmes de mammifères et de poissons (**Dhawan et al.,2011**).

III. 2. Absorption et effets biologiques

Les PM peuvent être prélevés dans la colonne d'eau et les sédiments par une gamme d'organismes. Cela peut se produire directement par ingestion ou par absorption cutanée, surtout par les voies respiratoires (branchies) (**Bern, 1990**).

Des enquêtes antérieures sur le zooplancton d'eau douce ont inclus *Bosmina coregoni* qui n'a pas fait de distinction entre PS des billes (2 et 6 µm) et des algues lorsqu'elles sont exposées à des combinaisons des deux (**Bern, 1990**).

La même étude a également révélé que *Daphnia cucullata*, lorsqu'elle est exposée à des billes de PS (2, 6, 11 et 19 µm) en combinaison avec des cellules d'algues de même taille, a été observé comme présentant des taux de filtrage similaires pour les trois classes de taille plus petite mais les algues préférées aux perles plus grosses (**Bern ,1990**).

Rosenkranz et al.,(2009) ont démontré que *D. magna* ingère des nano (20 nm) et micro billes de PS (1 µm).

Les auteurs notent que les deux types de billes de PS ont été excrétés dans une certaine mesure, mais les billes de 20 nm ont été retenues dans une plus grande mesure au sein de l'organisme. Donc, L'absorption dépend de la taille des particules (**Besseling et al., 2013**).

De plus, la forme des particules est également un paramètre important, car ceux qui ont une forme en aiguille peuvent s'attacher plus facilement sur les surfaces internes et externes (**Ogonowski et al., 2016**).

Par ailleurs les effets indirects des microplastiques peuvent comprennent une irritation physique. Par exemple, les particules angulaires peuvent être plus difficiles à déloger que les particules sphériques lisses et provoquent un blocage des branchies et du tube digestif du *D. magna* (**Ogonowski et al., 2016**).

Cependant, il est clair que MP sera certainement transféré de la proie à la prédateur et que celui-ci peut – dans certaines situations – être conservé plus longtemps dans le corps de ce dernier (Ogonowski *et al.*, 2016)..

IV. Interactions du plastique avec d'autres composés

La sorption des polluants hydrophobes sur les MP est considérée comme un problème environnemental important, car cela affectera la mobilité et la biodisponibilité de ces polluants. Il est bien connu que les PM en milieu marin concentrent les polluants organiques (POP) tels que le DDT, les PCB et les dioxines (Teuten *et al.*, 2009 ; Mato *et al.*, 2001).

En outre, (Ashton *et al.*, 2010) Dans l'environnement d'eau douce, les PM sont susceptibles de coexister avec d'autres contaminants émergents tels que les produits pharmaceutiques, les produits de soins personnels, retardateurs de flamme et autres produits chimiques industriels, qui pénètrent dans l'environnement en tant que parties de flux complexes de déchets solides et liquides.

Les processus de sorption se produiront également par adsorption physique et chimique comme processus de remplissage des pores. (Ashton *et al.*, 2010).

Les polluants de plus faible poids moléculaire se déplaceront plus facilement à travers une matrice polymère avec des pores plus grands. (Ashton *et al.*, 2010).

La cinétique d'adsorption dépendra du type de polymère, des caractéristiques du polymère telles que la densité et la cristallinité, le milieu environnant et les polluants présents. (Ashton *et al.*, 2010).

Par exemple ; la sorption et la diffusion des contaminants hydrophobes sont les plus susceptibles d'avoir lieu dans la zone amorphe d'une matière plastique. Les polymères qui ont des structures avec des unités courtes et répétitives, une symétrie élevée et une forte liaison hydrogène inter chaîne aura un potentiel de sorption plus faible. (Ashton *et al.*, 2010).

Chapitre III
Chapitre III

***La dégradation
du plastique***

I. Dégradation du plastique

I.1. Définition

L'une des raisons de la grande polyvalence de nombreux polymères synthétiques est leur grande résistance aux influences environnementales (**Plastics Europe, 2019**).

Cependant, ce fait conduit à des faibles dégradations et longs temps de séjour pour les polymères synthétiques une fois qu'ils entrent dans l'environnement (**Plastics Europe, 2019**).

Les matières plastiques conventionnelles sont très résistantes à la dégradation en général. La longévité des plastiques est estimée à des centaines ou même des milliers d'années selon les propriétés des plastiques comme ainsi que les conditions environnementales environnantes (**Plastics Europe, 2019**).

Bien qu'à un rythme très lent, l'altération de l'environnement provoque toujours la dégradation des plastiques, ce qui induit des changements dans propriétés des polymères dues à des processus biologiques et/ou abiotiques (**Eubeler et al., 2009**).

Au cours du processus de dégradation, les polymères sont convertis en unités moléculaires plus petites (par exemple, oligomères, monomères ou chimiquement versions modifiées) et éventuellement complètement minéralisées (**Eubeler et al., 2009**).

I.2. Mécanismes de dégradations du plastique

La dégradation des polymères synthétiques peut généralement être classée comme biotique ou abiotique, suivant des mécanismes différents, selon une variété de facteurs physiques, chimiques ou biologiques.

Le plus important des processus de dégradation des polymères synthétiques peuvent être divisés en :

- Photo dégradation (généralement par la lumière UV)
- Dégradation physique (thermique et mécanique)
- Dégradation chimique (oxydation ou hydrolyse)
- Dégradation biotique ou Biodégradation par des organismes (bactéries, champignons, algues)

Les processus généraux de dégradation du plastique sont illustrés à la **Fig. 3** (Gu, 2003 ; Shah *et al.*, 2008 ; Singh et Sharma, 2008 ; Debroas *et al.*, 2017).

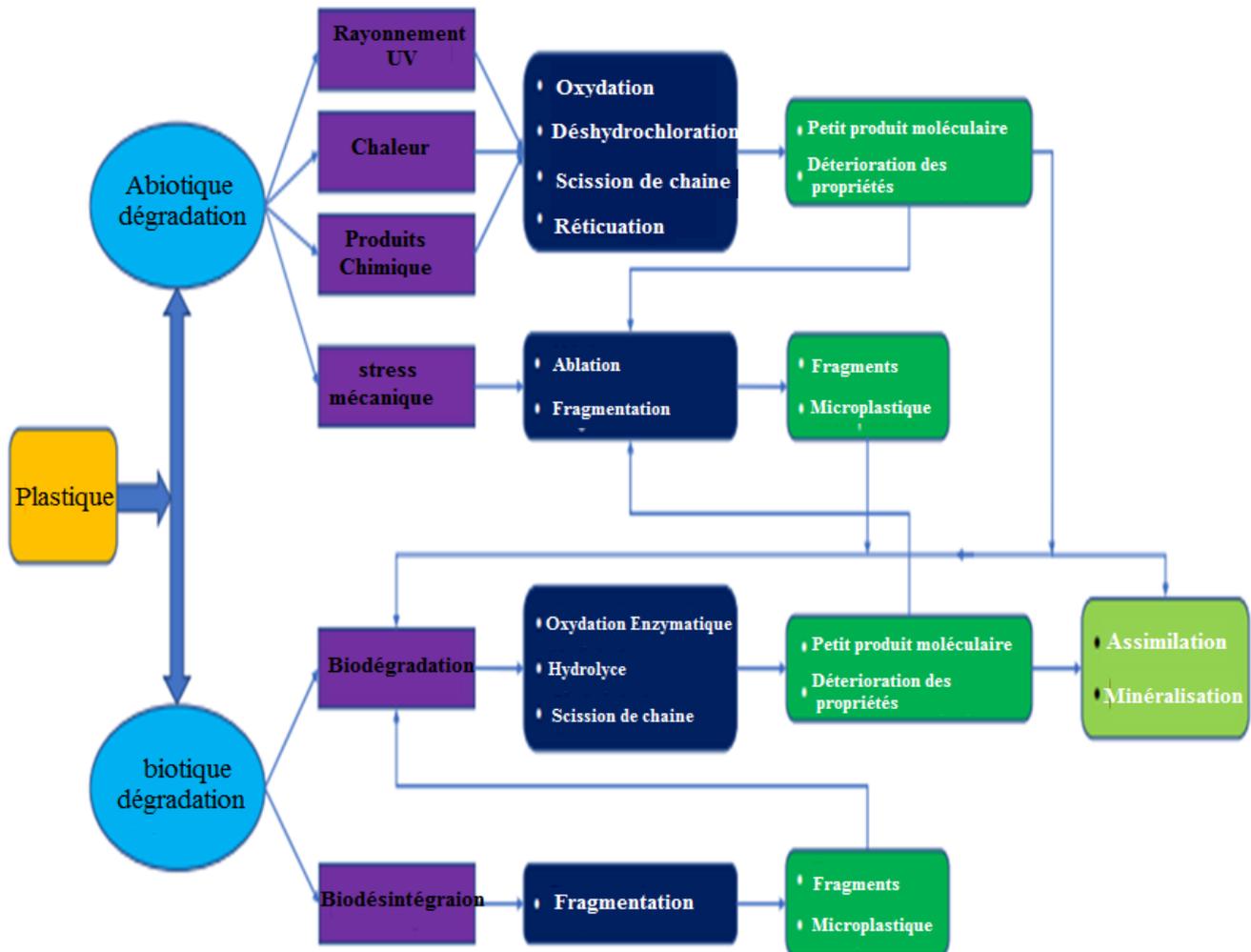


Figure 3 : Un diagramme schématisant les processus généraux impliqués dans la dégradation des plastiques.

I.2.1. Dégradation abiotique des plastiques

La dégradation abiotique des plastiques fait référence au changement de propriétés chimiques qui se produisent pour les plastiques en raison de facteurs abiotiques tels que la lumière, la température, l'air, l'eau et les forces mécaniques (Andrady 2015).

Généralement, la dégradation abiotique devrait précéder la biodégradation en raison d'une faible biodisponibilité des plastiques (Andrady 2015).

Cependant, la plupart des plastiques présents dans l'environnement sont insolubles dans l'eau, et bon nombre des matières synthétiques les polymères présents dans le milieu aquatique, tels que le PE, le polypropylène (PP), le PS, et PET, se dégradent très lentement ou pas du tout (Andrady, 2015).

I.2.1.1. Photo dégradation des plastiques

La dégradation des polymères synthétiques dans l'environnement sur une base moléculaire est généralement initiée par photo oxydation (avec rayonnement UV) (Andrady, 2011).

La photo dégradation des plastiques flottant dans le milieu aquatique est plus lente qu'à la dégradation lors de l'exposition terrestre (Andrady *et al.*, 1993).

Pour cette raison, de nombreux plastiques peuvent rester dans le milieu aquatique pendant des décennies ou des centaines d'années.

La photo dégradation des plastiques implique généralement des réactions méditées par les radicaux libres initiées par l'irradiation solaire. L'irradiation Ultraviolet (UV) à haute énergie UV-B (290 et 315 nm) et UV-A de moyenne énergie (315 et 400 nm) sont principalement responsables (Liu *et al.*, 2019).

I.2.1.2. Dégradation thermique

La dégradation thermique fait référence à la dégradation des plastiques due à un apport d'énergie dû à une température élevée.

Les plastiques peuvent subir des réactions thermo-oxydantes à haute température. Lorsque suffisamment de chaleur est absorbée par le polymère pour surmonter l'énergie barrière, les longues chaînes polymères peuvent être brisées en générant des radicaux (Pirsaheb *et al.*, 2020 ; Peterson *et al.*, 2001).

La température requise pour la dégradation thermique est liée aux propriétés thermiques des plastiques et à la disponibilité de l'oxygène (Crawford et Quinn, 2017).

Pendant ce temps, la température et le rayonnement UV peuvent avoir des effets synergiques sur la dégradation des plastiques et la vitesse des réactions oxydatives augmente également avec la température (Andrady *et al.*, 2003 ; Kamweru *et al.*, 2011).

De plus, l'augmentation de l'humidité s'est avérée réduire l'énergie d'activation pour la dégradation thermique des plastiques (**Kotoyori ,1972**).

I.2.1.3. Dégradation chimique des plastiques

La dégradation chimique des additifs, modifie la propriété du polymère et conduit à la fragilisation du polymère (**Duwez et Nysten , 2001**).

I.2.1.4. Dégradation mécanique des plastiques

La dégradation mécanique est un facteur important en ce qui concerne les plastiques dans l'environnement aquatique. Elle fait référence à son dégradation sous l'action des forces extérieures (**Zhang et al.,2021**).

Dans l'environnement, les forces externes peuvent provenir de la collision et de l'abrasion des plastiques avec des roches causés par le vent et les vagues (**Zhang et al.,2021**).

Congélation et décongélation des plastiques dans les milieux aquatiques peuvent également entraîner la dégradation mécanique des polymères (**Pal et al., 2018**).

Elle conduit généralement à des particules de plastique plus petites. Ces particules sont classées comme micro plastiques. Cependant, la dégradation mécanique ne s'arrête pas si les particules se trouvent dans la gamme de taille des micro plastiques(**Zhang et al.,2021**).

Ainsi, la formation de particules encore plus petites, appelées nano plastiques, est très probable (**Lambert et Wagner, 2016**).

Dans les deux cas, la dégradation mécanique conduit à une diminution de la taille des particules et par conséquent à une augmentation de la surface des particules de polymère (**Zhang et al.,2021**).

I.2.2. Dégradation biotique des plastiques

La biodégradation des polymères synthétiques peut se produire dans deux environnements différents (aérobie et anaérobie).

L'étendue de la dégradation des polymères en CO₂, H₂O, N₂, H₂, CH₄, sels, minéraux et biomasse (minéralisation) peuvent être complets ou partiels (**Müller ,2015**).

La dégradation partielle ou primaire de la chaîne polymère conduit à une stabilité temporaire. Elle fait référence à la détérioration des plastiques causés par des organismes. Les organismes peuvent dégrader les plastiques soit physiquement par morsure, mastication ou fragmentation digestive (Cadee , 2002 ; Dawson *et al.*, 2018 ; Jang *et al.*, 2018 ; Porter *et al.*, 2019 ; Cau *et al.*, 2020 ; Mateos-Cardenas *et al.*, 2020) ou biologiquement par des processus biochimiques (Danso *et al.*, 2019).

Les micro-organismes (les bactéries, les champignons) et les insectes, peuvent être principalement responsables de la dégradation biologique des plastiques (Crawford et Quinn, 2017).

Étant donné que la taille des polymères synthétiques est généralement trop grande pour pénétrer dans la membrane des micro-organismes. La première étape de la dégradation biotique est le clivage des chaînes latérales ou le squelette du polymère et la formation d'unités plus petites (monomères, oligomères) par des enzymes extracellulaires (Gu, 2005).

Dans la plupart des cas, cette première étape de dépolymérisation implique une hydrolyse catalysée enzymatique ment des amides, des esters ou des liaisons uréthane. Ces molécules plus petites peuvent ensuite être absorbées par les micro-organismes et métabolisés. Bien sûr, l'hydrolyse abiotique peut également entraîner des intermédiaires qui sont ensuite métabolisés par des micro-organismes (Müller *et al.*, 2001).

Les plastiques conventionnels ont généralement une capacité de biodisponibilité extrêmement faible en raison de leur nature solide, car seule une très petite fraction de polymère est exposé aux dégradeurs potentiels (Battin *et al.*, 2016).

De plus, les polymères macromoléculaires ne pourraient pas être directement utilisés par micro-organismes et des enzymes extracellulaires sont nécessaires initialement pour briser les polymères de macromolécules en petits produits moléculaires pour absorption cellulaire et métabolisation ultérieure (Chen *et al.*, 2019).

La dégradation abiotique des plastiques, qui produit des produits de dégradation de faible poids moléculaire et crée des fractures et des pores sur le surface polymère, peut accélérer les processus de biodégradation (Wu *et al.*, 2019).

Les plastiques peuvent être classés comme hydrolysables ou non hydrolysables selon la présence ou l'absence de groupements ester ou amide, qui peut être attaqué par diverses

hydrolases extracellulaires. La dégradation des polymères non hydrolysables tels que PE, PP et PVC par les enzymes extracellulaires peuvent être plus compliquées. Auparavant, la laccase jouait un rôle majeur dans la biodégradation du PE par l'actinomyète *Rhodococcus ruber* (Santo *et al.*, 2013).

L'hydroquinone peroxydase s'est avérée responsable de la biodégradation du PS par *Azotobacter beijerinckii* (Nakamiya *et al.*, 1997).

Il a également été suggéré que plusieurs enzymes excrétés par les champignons sont capables de diminuer la longueur des chaînes polymères PE (Sanchez, 2019).

Les polymères hydrolysables tels que PET, PA et polyuréthane (PUR) sont généralement plus sensibles à la biodégradation en raison de la présence des voies de biodégradation existantes telles que les hydrolases extracellulaires impliquées dans la dégradation de la cellulose et des protéines (Chen *et al.*, 2019).

Des enzymes telles que la cutinase, la lipase, la sérine estérase et la nitro-benzyl-estérase ont également été capable d'hydrolyser le PET, alors que la protéase, la cutinase, l'amidase et l'hydrolase sont impliquées dans l'hydrolyse du PA (Guebitz et Cavaco-Paulo, 2008).

Pendant ce temps, l'estérase et l'hydrolase de polyester de bactéries et de champignons pourraient être responsables l'hydrolyse du PUR (Akutsu *et al.*, 1998 ; Russell *et al.*, 2011).

I.3. Facteurs influençant la dégradation du plastique

Les variables importantes qui influenceront la dégradation et la fragmentation des PM sont :

- Les conditions d'exposition environnementales, dont les processus de dégradation impliqueront la fragmentation des PM en particules de plus en plus petites, y compris les nano plastiques, la transformation chimique des fragments de plastique, dégradation des fragments de plastique en non-polymère molécules organiques, et la transformation/dégradation de ces molécules non polymères dans d'autres composés (Müller *et al.*, 2001).
- Les propriétés des polymères telles que la densité et la cristallinité sont plus important car la région cristalline est constituée de chaînes polymères plus ordonnées et étroitement structurées. Par ailleurs, La cristallinité affecte les propriétés physiques

telles que la densité et la perméabilité. Cela affecte à son tour leur comportement d'hydratation et de gonflement, qui affecte l'accessibilité des sites de sorption pour micro-organismes (**Lambert et Wagner, 2018**).

- Le type et la quantité d'additifs chimiques : Les stabilisants tels que les antioxydants et les agents antimicrobiens agissent pour prolonger la durée de vie des plastiques, tandis que les ingrédients biologiques agissent pour décomposer le plastique dans des délais plus courts.
- Les caractéristiques moléculaires qui contrecarrent généralement la dégradation sont la complexité du polymère.

I.4. Caractérisation du plastique dégradé

La dégradation provoque l'oxydation et la scission de la chaîne des polymères, entraînant des modifications de la composition chimique, de l'apparence et texture, propriétés physico-chimiques et propriétés mécaniques du plastique (**Tosin et al., 2012**).

Par conséquent, les modifications de ces propriétés au cours de la dégradation peuvent être utilisées pour caractériser le degré de dégradation des plastiques (**Tosin et al., 2012**).

De plus, la dégradation des plastiques peut entraîner une perte de poids et un dégagement de gaz (p. ex., CO₂ et CH₄), ce qui peuvent également être déterminées pour refléter leur biodégradabilité (**Wu et al., 2012**).

Les paramètres et les méthodologies utilisées pour la caractérisation de la dégradation du plastique et la formation des microplastiques sont illustrés dans la **figure 4**.

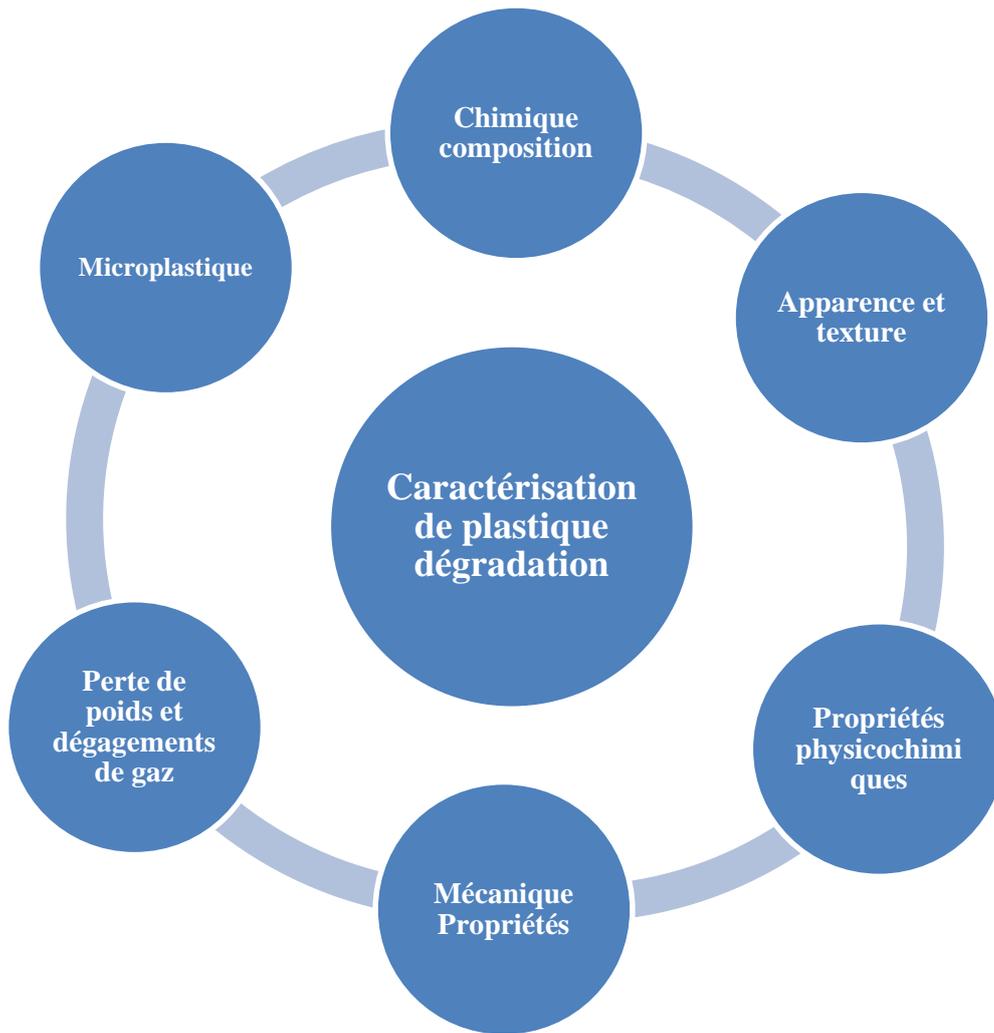


Figure 4 : Un diagramme schématisant des paramètres et des méthodologies utilisés pour la caractérisation de la dégradation du plastique et de la formation de microplastiques au cours des processus de dégradation (Zhang, *et al.*, 2021).

I.4.1. Composition chimique

La composition chimique du plastique dépend de celle des monomères et du degré de polymérisation. Pendant ce temps, les additifs chimiques tels que les plastifiants, les stabilisants, les antioxydants, les pigments et des retardateurs de flamme sont couramment ajoutés aux plastiques pour améliorer leurs performances et de faciliter leur fabrication (Wei *et al.*, 2015 ; Hermabessiere *et al.*, 2017).

Des réactions peuvent se produire dans la chaîne polymère ainsi qu'entre les additifs plastiques lors de la dégradation qui modifient sa composition chimique. La dégradation

provoque la scission de la chaîne et la réticulation des polymères, qui entraînent directement des modifications de leur poids moléculaire (Ebnesajjad ,2016).

Une diminution du poids moléculaire moyen des polymères a été observé par photo- et biodégradation (Jabarin et Lofgren ,1994 ; Tian *et al.*, 2017).

I.4.2.Apparence et texture

La modification de l'apparence et la texture des plastiques pendant la dégradation peut être observée plus facilement (McKeen, 2014).

Les propriétés d'apparences telles que la couleur, la brillance, le voile et le jaunissement des plastiques peuvent être mesuré instrumentalement selon la méthode standard développée principalement par des organisations standard telles que l'American Society for testing and materials (ASTM) et Organisation internationale pour Normalisation (ISO) (McKeen, 2014).

Des textures de fissures, d'écailles, de piqûres et de rainures peuvent être développées sur le surface des plastiques lors de la dégradation et sont généralement observées dans les échantillons de plastique collectés sur le terrain (Zbyszewski *et al.*, 2014 ; Xiong *et al.*, 2018b).

Ces textures de surface peuvent être examinées à l'aide du microscope optique, microscope électronique à balayage (MEB) et microscope à force atomique (AFM) (Fig. 5) (Blasing et Amelung, 2018).

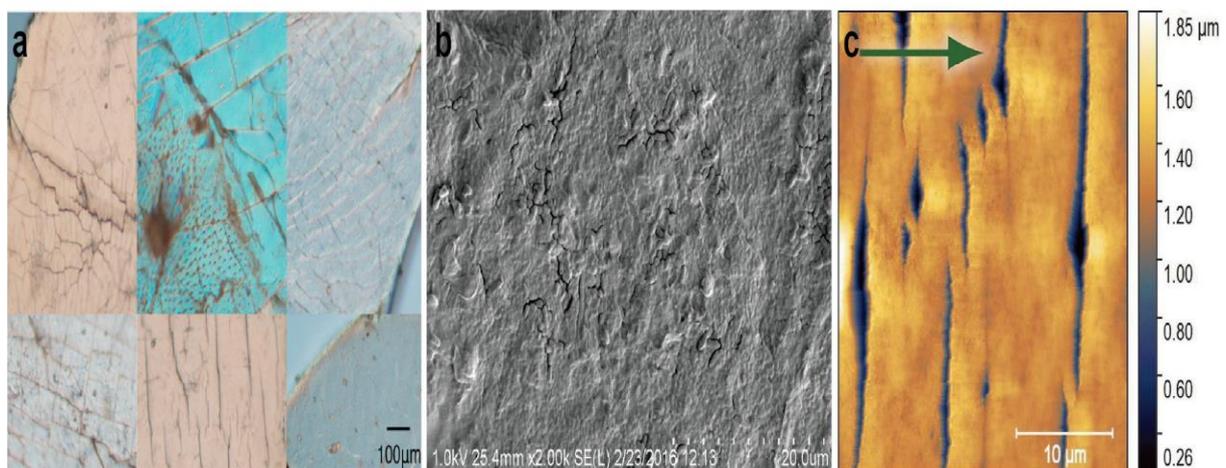


Figure 5 : Textures de surface d'échantillons de plastique typiques caractérisés à l'aide d'un microscope optique (a), SEM (b) et AFM (c) (Modifié de (Xiong *et al.*, 2018b ; Zhang *et al.*, 2016b ; Julienne *et al.*, 2019), (respectivement).

Les propriétés physicochimiques telles que la cristallinité, les propriétés thermiques et les propriétés de surface des plastiques peuvent être modifiées au cours de la dégradation (**Balani et al., 2014**).

Les propriétés de surface des plastiques telles que l'hydrophobicité, la charge, et la porosité sont liées à leurs interactions avec d'autres polluants et micro-organismes dans l'environnement (**Fotopoulou et Karapanagioti, 2015 ; Cai et al., 2019**).

Les plastiques tels que PE, PP, Le PS, le PET et le PVC sont hautement hydrophobes et leur dégradation peut réduire leur hydrophobicité en introduisant des groupes fonctionnels hydrophiles à la chaîne polymère (**Wilkes et Aristilde, 2017**).

I.4.3. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques sont généralement déterminées à l'aide d'une machine d'essai de matériaux universelle suivant les méthodes standard développées par l'ASTM et l'ISO (**McKeen, 2014**).

Les propriétés de traction, telles que l'allongement à la rupture et le module de traction (module de young), peut être dérivé d'une expérience de contrainte-déformation (**Andrady, 2017**).

Les propriétés mécaniques des plastiques sont liées à leur composition chimique et les propriétés physico-chimiques (**Andrady, 2017**).

Très dégradé les plastiques finiront par perdre leur intégrité lorsque les forces externes de l'environnement dépassent leur résistance mécanique, conduisant à leur fragmentation et la formation de micro plastiques (**Andrady, 2017**).

I.4.4. Perte de poids et dégagement de gaz

Les plastiques peuvent perdre leur masse totale lors de la dégradation et être converti en CO₂ ou CH₄ dans différentes conditions environnementales (**Oberbeckmann et Labrenz, 2020**). La perte de poids est couramment utilisée pour indiquer la dégradation de plastiques, qui peuvent être mesurés directement à l'aide d'une balance de haute précision. De plus, elle peut être reflétée indirectement grâce à la mesure du carbone organique total (COT) à l'aide d'un

COT analyseur qui détermine la concentration en carbone organique d'un échantillon en analysant le CO₂ produit par la combustion (**Zhang *et al.*, 2021**).

Cependant, elle peut résulter non seulement de la minéralisation des plastiques mais aussi de la libération d'additifs. Par conséquent, elle peut ne pas suffire à prouver la minéralisation (**Oberbeckmann et Labrenz, 2020**).

II. Biodégradation

La biodégradation du plastique comporte plusieurs étapes au cours desquelles le polymère est clivé enzymatiquement en oligomères et monomères assimilables par les micro-organismes (**Lucas *et al.*, 2008**).

De nombreux taxons microbiens peuvent dégrader les bios polymères, notamment le polyhydroxybutyrate (PHB) et le polyhydroxybutyrate-polyhydroxyvalérate (PHBV).

Les taux de biodégradation des biopolymères dans l'eau douce ont été trouvés dépasser ceux des environnements marins, et des taux plus élevés ont également été observés dans les eaux usées que dans les eaux douces naturelles (**Ohura *et al.*, 1999 ; Manna et Paul, 2000 ; Müller, 2015**).

Même ainsi, ces matériaux peuvent persister encore pendant des périodes de temps considérables dans les eaux douces, avec une durée de vie de ~10 ans ont été estimés pour les bouteilles de PHBV déposées sur les sédiments lacustres à une profondeur de 85 m (**Brandl et Püchner, 1991**).

En comparaison avec les bio polymères, les plastiques traditionnels (tels que le PE, le PET et le PP) persistera encore plus longtemps dans les milieux aquatiques (des décennies ou des siècles (**Harrison *et al.*, 2011 ; Müller, 2015 ; Krueger *et al.*, 2015**) avec une biodégradation généralement précédée d'une altération abiotique (**Müller *et al.*, 2001 ; Gewert *et al.*, 2015**).

La biodégradation est couplée à trois critères essentiels (**Klein et al., 2018**):

1. Des micro-organismes doivent être présents qui peuvent dépolymériser la substance cible et minéraliser les composés monomères avec des enzymes d'une voie métabolique appropriée.
2. Les paramètres environnementaux, tels que la température, le pH, l'humidité doit fournir les conditions nécessaires à la biodégradation.
3. La morphologie des particules de polymère doit rendre la fixation des micro-organismes et la formation d'un biofilm, tandis que la structure du polymère substrat, par exemple liaisons chimiques, degré de polymérisation, degré de ramification, et le paramètre, tel que l'hydrophobicité ou la cristallinité, ne doit pas entraver les actions microbiennes.

II.1. Biodégradabilité in situ des plastiques et composés associés au plastique

Les preuves récentes de l'assimilation du PET par *Ideonela sakaiensis* (**Yoshida et al., 2016**) suggèrent que, bien que les taux de dégradation du plastique dans l'environnement soient extrêmement faibles, plusieurs nouveaux taxons dégradant les polymères sont susceptibles d'être présents dans les écosystèmes d'eau douce.

La recherche dans ce domaine devrait se concentrer sur les habitats fonctionnant comme des puits pour l'accumulation de plastique, y compris les sédiments (**Barnes et al., 2009; Corcoran, 2015, Corcoran et al., 2015**).

Pour obtenir une compréhension complète de la biodégradabilité de différents matériaux, il est nécessaire de combiner des expériences en laboratoire avec des mesures sur le terrain de la dégradation du plastique dans l'environnement d'eau douce (**Harrison et al., 2018**).

La plupart des recherches sur la biodégradation du plastique ont été basées sur des mesures telles que la perte de masse (**Harrison et al., 2011**).

La toxicité de tout produit de dégradation, ou des composés libérés du polymère, nécessitera également une enquête (**Harrison et al., 2018**).

II.2. Le Plastisphère d'eau douce

Les processus fondamentaux impliqués dans la formation du biofilm sont bien établis, avec attachement initial suivi d'une maturation et du détachement éventuel des cellules (O'Toole *et al.*, 2000).

Bien qu'il ne soit pas clair si les membres de la plastisphère peuvent biodégrader les usines japonaises de recyclage de bouteilles (*Ideonella sakaiensis*) a récemment été trouvé assimiler la TEP (Yoshida *et al.*, 2016).

Étant donné que les contaminants organiques et les métaux se répartissent rapidement dans les biofilms (Headley *et al.*, 1998 ; Tien et Chen , 2013), les communautés de plastisphère peuvent également être supposées faciliter le transport des polluants entre les écosystèmes.

III. Moyens d'élimination de la pollution plastique

Compte tenu des nombreuses sources de micro plastiques, les différents secteurs de l'économie et la société qui les produisent et les connaissances relativement limitées à leur sujet.

Tableau 4 : Sources, mesures et stratégies d'atténuation des microplastiques en amont
(Wagner et Lambert ,2018)

Catégorie	La source	Atténuation potentielle
Production	Les microplastiques dans les cosmétiques	Les retirer des produits. Remplacer par des alternatives bénignes
	Pellets de présérie mal gérés	Réglementer la manipulation des granulés. Opération table rase.
Commerce	Abrasifs industriels	Améliorer le confinement et la récupération et nécessitent des alternatives
	Échappement de la laverie	Filtration améliorée
	Agriculture – films dégradés, pots et tuyaux	Améliorer la récupération, biodégradable plastiques
Consommateur	Poussière de pneus	progrès technologiques, revêtement routier
	Jeter des petits objets en plastique (cigarette filters, coins d'emballage déchirés, petits emballages sous film, etc.)	Application des amendes pour détritrus, éducation des consommateurs, REP sur le design
	Linge domestique. Effluents d'eaux usées	Laver avec des machines à chargement par le haut. Confinement des eaux usées, mono fibre textiles tissés .Revêtement textiles
Déchets la gestion	Fragmentation par les véhicules circulant déchets non valorisés	Amélioration de la gestion des déchets (
	UV et terrestre dégradé chimiquement Déchets plastiques	Amélioration de la gestion des déchets
	Effluent d'eaux usées (fibres synthétiques)	Filtration blanchisserie, industrie textile innovation
	Débordement d'eaux usées combinées (grande éléments)	amélioration de l'infrastructure
	Broyage mécanique des déchets en bord de route lors de la coupe régulière de la végétation (principalement de l'herbe).	Amélioration de la législation et de l'application de la loi ; valorisation des déchets

Il devient évident à quel point il serait difficile d'essayer de "boucher" les fuites de micro plastiques à l'environnement. Certaines des sources pourraient être stoppées par une législation (par exemple, interdiction des microbilles dans les produits cosmétiques), éducation et l'application de la réglementation (lois sur les déchets) et les avancées technologiques (filtres, polymères biodégradables)(Eriksen *et al.*, 2018).

III.1.Réduire les déchets plastiques

Éviter la production de nouveaux plastiques dans la mesure du possible est le moyen le plus fiable d'éviter la génération de micro plastique (Fig.6).

Parmi les innovations récentes populaires figurent la production de vêtements, de chaussures, de planches à roulettes, des lunettes de soleil et des engins de natation provenant d'engins de pêche abandonnés (Bureo.co, 2016, The Verge, 2016). Tel gammes de produits, faisant une déclaration pro-environnementale, sont susceptibles d'être particulièrement attractif pour les clients de la Génération Y/Millennials (Smith, 2010).



Figure 6 : Initiatives pour réduire ou valoriser les déchets d'emballages. (a) ¼ magasin « Unverpackt » en Allemagne où les clients peuvent acheter de la nourriture en vrac, en apportant leurs propres contenants. ©Martin Thiel. (b) ¼ Inverse distributeurs automatiques acceptant les bouteilles en verre et en plastique et les canettes en aluminium dans un supermarché du États-Unis.

Une autre façon de réduire les plastiques est d'interdire ou de taxer les produits en plastique qui peuvent être facilement remplacés, comme les microbilles dans les produits cosmétiques et de soins quotidiens et sacs en plastique pour l'épicerie.

Une enquête menée en Irlande a révélé que les frais/taxes sur les sacs en plastique semblent être bien accueillis par les clients (Convey *et al.*, 2007).

III.2. Gestion des déchets de plastiques

Certains efforts ont inclus une taxe initiale pour financer les efforts de nettoyage ou d'atténuation des impacts environnementaux, mais ceux-ci semblent peu pratiques en raison à la diffusion et à la difficulté de collecte des petits microplastiques (**Eriksen *et al.*, 2018**).

Selon, les fuites de microplastiques vers le milieu terrestre et finalement aquatique (primaire ou secondaire par entrée sous forme de gros objets qui plus tard se dégradent en microplastiques) se produisent tout au long de la chaîne d'approvisionnement, Il reste peu de matériel dans le système, et la plupart ne seraient pas aptes au recyclage (c.-à-d. réutilisation).

La prévention est aussi beaucoup plus rentable et respectueux de l'environnement que les programmes de nettoyage post-consommation, dont beaucoup sont économiquement ou technologiquement irréalisable.

(Zéro déchet vs. Waste-to-Energy) : Cette division pourrait être considérée comme la première où existent des divisions nettes. Que les plastiques soient incinérés pour récupération d'énergie ou triés pour le recyclage et la remise à neuf reflète les positions et les influences des parties prenantes.

Conclusion Générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce manuscrit, nous avons donné un bref aperçu des défis environnementaux associés à MP dans les systèmes d'eau douce. Les concentrations environnementales peuvent changer à long terme (qu'il soit positif ou négatif) du fait de l'urbanisation, l'augmentation de la population et les développements technologiques.

Aujourd'hui la littérature, avec une Résolution croissante sur l'éco toxicologie et la santé humaine. Comprendre le destin des micro- et nano plastiques est nécessaire pour une meilleure compréhension de la distribution et l'élimination de la pollution plastique.

Le micro plastique est dangereux pour le milieu aquatique au sens le plus large. Comme la littérature s'élargit, ces thématiques deviennent des repères, des outils pour les décideurs, pour atténuer les problèmes prévus de contamination micro plastique.

Nous savons que les microplastiques sont mondiaux, de plus en plus toxiques , et les impacts sur la faune sont omniprésents, ce qui conduit à la conclusion collective que le plastique dans l'environnement cause des dommages.

Une fois dans les plans d'eau naturels (rivières, lacs, océans), la récupération des microplastiques est impossible.

Et comme perspective de ce travail, nous proposons D'analysons d'autres articles de même sujets pour élargir la phase de comparaison , Prendre des échantillons de plusieurs type d'eaux douces et essayez des microorganismes qui dégradent le plastique .

References
REFERENCES

Bibliographies
BIBLIOGRAPHIES

1. Akutsu, Y., Nakajima-Kambe, T., Nomura, N., Nakahara, T., (1998). Purification and
2. Amulya K, Jukuri S, Venkata Mohan S (2015) Sustainable multistage process for enhanced productivity of bioplastics from waste remediation through aerobic dynamic feeding strategy: process integration for up-scaling. *Bioresour Technol* 188:231–239. doi:10.1016/j.biortech. 2015.01.070York.
3. analysis of alternative scenarios for waste treatment and/or disposal. Los Angeles, California.
4. Andrady AL (2011) Microplastics in the marine environment. *Mar Pollut Bull* 62(8): 1596–1605. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.
5. Andrady AL (2011) Microplastics in the marine environment. *Mar Pollut Bull* 62 (8):1596–1605. doi:10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.
6. Andrady AL, Pegram JE, Song Y (1993) Studies on enhanced degradable plastics.
7. Andrady, A.L., (2015). In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Springer International Publishing, Cham, pp. 57e72.
8. Andrady, A.L., (2017). The plastic in microplastics: a review. *Mar. Pollut. Bull.* 119 (1), 12e22.
9. Andrady, A.L., Hamid, H.S., Torikai, A. (2003). Effects of climate change and UV-B on materials. *Photochem. Photobiol. Sci.* 2 (1), 68e72.
10. Ashton K, Holmes L, Turner A (2010) Association of metals with plastic production pellets in the marine environment. *Mar Pollut Bull* 60(11):2050–2055. doi:10.1016/j.marpolbul.2010.07.014
11. Balani, K., Verma, V., Agarwal, A., Narayan, R., 2014. *Biosurfaces*, pp. 329e344.
12. Barnes DKA, Galgani F, Thompson RC et al (2009) Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos Trans R Soc B* 364(1526):1985–1998. doi:10. 1098/rstb.2008.0205.
13. Battin, T.J., Besemer, K., Bengtsson, M.M., Romani, A.M., Packmann, A.I., (2016). The ecology and biogeochemistry of stream biofilms. *Nat. Rev. Microbiol.* 14, 251.
14. Bern L (1990) Size-related discrimination of nutritive and inert particles by freshwater zooplankton. *J Plankton Res* 12(5):1059–1067. doi:10.1093/plankt/12.5.1059.
15. Besseling E, Wegner A, Foekema EM, van den Heuvel-Greve MJ, Koelmans AA (2013) Effects of microplastic on fitness and PCB bioaccumulation by the Lugworm *Arenicola marina* (L.) *Environ Sci Technol* 47(1):593–600. doi:10.1021/es302763x.

16. Blasing, M., Amelung, W., (2018). Plastics in soil: analytical methods and possible € sources. *Sci. Total Environ.* 612, 422e435.
17. Bowmer, T, Kershaw, P, (2010). In: Bowmer, T, Kershaw, P. (Eds.), *Proceedings of the GESAMP International Workshop on Micro-plastic Particles as a Vector in Transporting Persistent, Bio-accumulating and Toxic Substances in the Oceans.* UNESCO-IOC, Paris.
18. Brandl H, Püchner P (1991) Biodegradation of plastic bottles made from ‘Biopol’ in an aquatic ecosystem under in situ conditions. *Biodegradation* 2(4):237–243. doi:10.1007/BF00114555.
19. Brandsch J, Piringer O (2008) Characteristics of plastic materials. In: *Plastic packaging.* Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pp 15–61. doi:10.1002/9783527621422.ch2.
20. Browne MA, Crump P, Niven SJ, Teuten E, Tonkin A, Galloway T, Thompson R (2011) Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environ Sci Technol* 45(21):9175–9179. doi:10.1021/es201811s.
21. Browne, M.A., (2015). Sources and pathways of microplastics to habitats. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter.* Springer International Publishing, Cham, pp. 229–244.
22. Browne, M.A., Crump, P, Niven, S.J, Teuten, E, Tonkin, A., Galloway, T, Thompson, R., (2011). Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environ. Sci. Technol.* 45 (21), 9175e9179.
23. Bureo.co (2016) Bureo skateboards, net positiva. <http://bureo.co/net-positiva.php>. Accessed 16 Sep 2016.
24. Cadee, G.C., (2002) Seabirds and floating plastic debris. *Mar. Pollut. Bull.* 44 (11), 1294e1295.
25. Cai, L., Wu, D., Xia, J., Shi, H., Kim, H., (2019). Influence of physicochemical surface properties on the adhesion of bacteria onto four types of plastics. *Sci. Total Environ.* 671, 1101e1107.
26. Cai, L., Wu, D., Xia, J., Shi, H., Kim, H., (2019). Influence of physicochemical surface properties on the adhesion of bacteria onto four types of plastics. *Sci. Total Environ.* 671, 1101e1107.
27. Carmichael, A., (2015). Man-made fibers continue to grow. *Textil. World* 165 (705),

28. Carr, S.A., Liu, J., Tesoro, A.G., (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Res.* 91, 174–182. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.01.002>.
29. Castañeda, R.A., Avlijas, S, Simard, M.A, Ricciardi, A., Smith, R., (2014). Microplastic pollution in St. Lawrence River.
30. Cau, A., Avio, C.G., Dessi, C., Moccia, D., Pusceddu, A., Regoli, F., Cannas, R., Follesa, M.C., (2020). Benthic Crustacean digestion can modulate the environmental fate of microplastics in the deep sea. *Environ. Sci. Technol.* 54 (8), 4886e4892.
31. Chen, X., Xiong, X., Jiang, X., Shi, H., Wu, C., (2019). Sinking of floating plastic debris caused by biofilm development in a freshwater lake. *Chemosphere* 222, 856e864.
32. Chen, X., Xiong, X., Jiang, X., Shi, H., Wu, C., (2019). Sinking of floating plastic debris caused by biofilm development in a freshwater lake. *Chemosphere* 222, 856e864.
33. Cierjacks A, Behr F, Kowarik I (2012) Operational performance indicators for litter management at festivals in semi-natural landscapes. *Ecol Indic* 13(1):328–337. doi:10.1016/j.ecolind.2011.06.033.
34. Cieřlik, B.M., Namieřnik, J, Konieczka, P, (2015). Review of sewage sludge management: standards, regulations and analytical methods. *J. Clean. Prod.* 90, 1–15.
35. Convey F et al (2007) The most popular tax in Europe? Lessons from the Irish plastic bags levy. *Environ Resour Econ* 38:1–1.
36. Corcoran PL (2015) Benthic plastic debris in marine and freshwater environments. *Environ Sci: Processes Impacts* 17:1363–1369. doi:10.1039/c5em00188a.
37. Corcoran PL, Norris T, Ceccanese T et al (2015) Hidden plastics of Lake Ontario, Canada and their potential preservation in the sediment record. *Environ Poll* 204:17–25. doi:10.1016/j.envpol.2015.04.009.
38. Councell TB, Duckenfield KU, Landa ER, Callender E (2004) Tire-wear particles as a source of zinc to the environment. *Environ Sci Technol* 38(15):4206–4214. doi:10.1021/es034631f.
39. Crawford, C.B., Quinn, B., (2017). In: Crawford, C.B., Quinn, B. (Eds.), *Microplastic Pollutants*. Elsevier, pp. 57e100.
40. Crawford, C.B., Quinn, B., (2017). In: Crawford, C.B., Quinn, B. (Eds.), *Microplastic Pollutants*. Elsevier, pp. 57e100.
41. Danso, D., Chow, J., Streit, W.R., (2019). Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Appl. Environ. Microbiol.* 85 (19).

42. Dawson, A.L., Kawaguchi, S., King, C.K., Townsend, K.A., King, R., Huston, W.M., Bengtson Nash, S.M., (2018). Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat. Commun.* 9 (1), 1001.
43. DEFRA, 2012. Waste Water Treatment in the United Kingdom – (2012), Implementation of the European Union Urban Waste Water Treatment Directive – 91/271/EEC. Department for Environment, Food and Rural Affairs, Lond.
44. Desai MP, Labhsetwar V, Walter E, Levy RJ, Amidon GL (1997) The mechanism of uptake of biodegradable microparticles in Caco-2 cells is size dependent. *Pharm Res* 14(11):1568 1573.
45. Dhawan A, Pandey A, Sharma V (2011) Toxicity assessment of engineered nanomaterials: resolving the challenges. *J Biomed Nanotechnol* 7(1):6–7. doi:10.1166/jbn.2011.1173.
46. Dris, R., Gasperi, J., Mirande, C., Mandin, C., Guerrouache, M., Langlois, V., Tassin, B., (2017). A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environ. Pollut.* 221, 453–458.
47. Dris, R., Gasperi, J., Saad, M., Mirande, C., Tassin, B., (2016). Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment? *Mar. Pollut. Bull.* 104, 290–293.
48. Duflos, G., (2017). Occurrence and effects of plastic additives on marine environments and organisms: a review. *Chemosphere* 182.
49. Duwez AS, Nysten B (2001) Mapping aging effects on polymer surfaces: specific detection of additives by chemical force microscopy. *Langmuir* 17(26):8287–8292. doi:10.1021/ la0113623.
50. Ebnesajjad, S., (2016). In: Baur, E., Ruhrberg, K., Woishnis, W. (Eds.), *Chemical Resistance of Commodity Thermoplastics*. William Andrew Publishing.
51. Eriksen, M, Lebreton, C.M.L, Carson, S.H., Thiel, M, Moore, C.J, Borerro, J.C, Galgani, 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 (12), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913>.
52. Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., Farley, H., Amato, S., (2013). Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. *Mar. Pollut. Bull.* 77, 177–182.
53. Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., Farley, H., Amato, S., (2013). Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great

- Lakes. Mar. Pollut. Bull. 77 (1–2), 177–182.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>.
54. Eriksen, M., Mason, S., Wilson, S., Box, C., Zellers, A., Edwards, W., Farley, H., Amato, S., (2013). Microplastic pollution in the surface waters of the Laurentian Great Lakes. Mar. Pollut. Bull. 77 (1–2), 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.007>.
55. Eubeler JP, Zok S, Bernhard M, Knepper TP (2009) Environmental biodegradation of synthetic polymers I. Test methodologies and procedures. TrAC Trends Anal Chem 28(9):1057–1072. doi:10.1016/j.trac.2009.06.007.
56. Floating exposure. J Environ Polym Degrad 1(2):117–126. doi:10.1007/BF01418205.
57. Florian Faure, M.C, Baecher, H., Felipe, L, (2012). Pollution because of plastics and microplastics in Lake Geneva and in the Mediterranean Sea. Arch. Sci. 65, 157–164.
58. Fotopoulou, K.N., Karapanagioti, H.K., 2015. Surface properties of beached plastics. Environ. Sci. Pollut. Control Ser. 22 (14), 11022e11032.
59. Free, C.M, Jensen, O.P, Mason, S.A, Eriksen, M, Williamson, N.J, Boldgiv, B, (2014). Highlevels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. Mar. Pollut. Bull. 85, 156–163.
60. Free, C.M., Jensen, O.P., Mason, S.A., Eriksen, M., Williamson, N.J., Boldgiv, B., (2014). Highlevels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. Mar. Pollut. Bull. 85 (1), 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.001>.
61. Galgani, F, Hanke, G, Maes, T, (2015). Global distribution, composition and abundance of marine litter. In: Bergmann, M., Gutow, L, Klages, M. (Eds.), Marine Anthropogenic Litter. Springer International Publishing, pp. 29–56.
62. GESAMP (2015) Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment. Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection Reports and studies 90.
63. Gewert B, Plassmann MM, MacLeod M (2015) Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. Environ Sci Process Impacts 17:1513–1521. doi:10.1039/C5EM00207A.
64. Gu J-G, Gu J-D (2005) Methods currently used in testing microbiological degradation and deterioration of a wide range of polymeric materials with various degree of degradability: a review. J Polym Environ 13(1):65–74. doi:10.1007/s10924-004-1230-7.

65. Guebitz, G.M., Cavaco-Paulo, A., (2008). Enzymes go big: surface hydrolysis and functionalisation of synthetic polymers. *Trends Biotechnol.* 26 (1), 32e38.
66. Habib, D., Locke, D.C., Cannone, L.J., (1996). Synthetic fibers as indicators of municipal sewage sludge, sludge products, and sewage treatment plant effluents. *Water Air Soil Pollut.* 103, 1–8.
67. Harrison JP, Sapp M, Schratzberger M et al (2011) Interactions between microorganisms and marine microplastics: a call for research. *Mar Technol Soc J* 45(2):12–20. doi:10.4031/MTSJ. 45.2.2.
68. Headley JV, Gandrass J, Kuballa J et al (1998) Rates of sorption and partitioning of contaminants in river biofilm. *Environ Sci Technol* 32(24):3968–3973. doi:10.1021/es980499l.
69. Hermabessiere, L., Dehaut, A., Paul-Pont, I., Lacroix, C., Jezequel, R., Soudant, P.,
70. Horton, A.A, Svendsen, C, Williams, R.J, Spurgeon, D.J., Lahive, E., (2017). Large microplastic particles in sediments of tributaries of the River Thames, UK - Abundance, sources and methods for effective quantification. *Mar. Pollut. Bull.* 114, 218–226.
71. II. Weathering of enhanced photodegradable polyethylenes under marine and freshwater
72. Imhof, H.K., Ivleva, N.P., Schmid, J., Niessner, R., Laforsch, C., (2013). Contamination of beach sediments of a subalpine lake with microplastic particles. *Curr. Biol.* 23 (19),R867–R868. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.09.001>.
73. Jabarin, S.A., Lofgren, E.A., (1994). Photooxidative effects on properties and structure of high-density polyethylene. *J. Appl. Polym. Sci.* 53 (4), 411e423.
74. Jang, M., Shim, W.J., Han, G.M., Song, Y.K., Hong, S.H., (2018). Formation of microplastics by polychaetes (*Marphysa sanguinea*) inhabiting expanded polystyrene marine debris. *Mar. Pollut. Bull.* 131 (Pt A), 365e369.
75. Julienne, F., Lagarde, F., Delorme, N., (2019). Influence of the crystalline structure on the fragmentation of weathered polyolefines. *Polym. Degrad. Stabil.* 170, 109012.
76. Kamweru, P.K., Ndiritu, F.G., Kinyanjui, T.K., Muthui, Z.W., Ngumbu, R.G., Odhiambo, P.M., (2011). Study of temperature and uvwavelength range effects on degradation of photo-irradiated polyethylene films using DMA. *J. Macromol. Sci., Part B: Physics* 50 (7), 1338e1349.
77. Klemchuk PP (1990) Degradable plastics – a critical-review. *Polym Degrad Stab* 27(2): 183–202.

78. Kotoyori, T., (1972). Activation energy for the oxidative thermal degradation of plastics. *Thermochim. Acta* 5 (1), 51e58.
79. Krueger MC, Harms H, Schlosser D (2015) Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics. *Appl Microbiol Biotechnol* 99(21):8857–8874. doi:10.1007/s00253-015-6879-4..
80. Kyrikou I, Briassoulis D (2007) Biodegradation of agricultural plastic films: a critical review. *J Polym Environ* 15(2):125–150. doi:10.1007/s10924-007-0053-8.
81. Lambert S (2013) Environmental risk of polymers and their degradation products. PhD thesis, University of.
82. Lambert S (2015) Biopolymers and their application as biodegradable plastics. In: Kalia CV (ed) *Microbial factories: biodiversity, biopolymers, bioactive molecules*, vol 2. Springer India, New Delhi, pp 1–9. doi:10.1007/978-81-322-2595-9_1.
83. Lambert S, Sinclair CJ, Boxall ABA (2014) Occurrence, degradation and effects of polymerbased materials in the environment. *Rev Environ Contam Toxicol* 227:1–53. doi:10.1007/978-3-319-01327-5_1.
84. Lambert S, Sinclair CJ, Bradley EL, Boxall ABA (2013) Effects of environmental conditions
85. Lambert S, Wagner M (2016) Formation of microscopic particles during the degradation of different polymers. *Chemosphere* 161:510–517. doi:10.1016/j.chemosphere.2016.07.042.
86. Lechner, A., Keckeis, H., Lumesberger-Loisl, F., Zens, B., Krusch, R., Tritthart, M., Schludermann, E., (2014). The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river. *Environment Pollution* 188, 177–181. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.006>.
87. Lechner, A., Keckeis, H., Lumesberger-Loisl, F., Zens, B., Krusch, R., Tritthart, M., Schludermann, E., (2014). The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river. *Environment Pollution* 188, 177–181. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.006>.
88. Li C, Busquets R , Campos LC (2020) Assessment of microplastics in freshwater systems: A review. *Science of the Total Environment* 707: 135578.
89. Liu EK, He WQ, Yan CR (2014) ‘White revolution’ to ‘white pollution’ – agricultural plastic film mulch in China. *Environ Res Lett* 9(9):091001. doi:10.1088/1748-9326/9/9/091001.

90. Liu, K., Wang, X.H., Wei, N., Song, Z.Y., Li, D.J., (2019)a. Accurate quantification and transport estimation of suspended atmospheric microplastics in megacities: implications for human health. *Environ. Int.* 132, 10.
91. Los Angeles Department of Public Works (2016) Comparative greenhouse gas emissions
92. Lucas N, Bienaime C, Belloy C et al (2008) Polymer biodegradation: mechanisms and estimation techniques – a review. *Chemosphere* 73(4):429–442. doi:10.1016/j.chemosphere.2008.06.064 .
93. Magnusson, K., Eliasson, K., Fråne, A., Haikonen, K., Hultén, J., Olshammar, M., Stadmark, J., Voisin, A., (2016). Swedish Sources and Pathways for Microplastics to the Marine Environment. A Review of Existing Data. IVL, C 183.
94. Magnusson, K., Norén, F., (2014). Screening of Microplastic Particles in and Downstream a Wastewater Treatment Plant. C 55. IVL Swedish Environmental Research Institute.
95. Manna A, Paul AK (2000) Degradation of microbial polyester poly(3-hydroxybutyrate) in environmental samples and in culture. *Biodegradation* 11(5):323–329. doi:10.1023/A:1011162624704.
96. Mateos-Cardenas, A., O’Halloran, J., van Pelt, F.N.A.M., Jansen, M.A.K., (2020). Rapid fragmentation of microplastics by the freshwater amphipod *Gammarus duebeni* (Lillj.). *Sci. Rep.* 10 (1).
97. Mato Y, Isobe T, Takada H, Kanehiro H, Ohtake C, Kaminuma T (2001) Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environ Sci Technol* 35(2):318–324. doi:10.1021/es0010498.
98. McKeen, L.W., (2014). In: McKeen, L.W. (Ed.), *The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers*. William Andrew Publishing, Oxford, pp. 43e71.
99. McKeen, L.W., (2014). In: McKeen, L.W. (Ed.), *The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers*. William Andrew Publishing, Oxford, pp. 43e71.
100. Mintenig, S.M., Int-Veen, I., Loder, M.G., Primpke, S., Gerdts, G., (2017). Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane arraybased micro-Fourier-transfor.
101. Mohan SR (2016) Strategy and design of innovation policy road mapping for a waste biorefinery. *Bioresour Technol* 215:76–83. doi:10.1016/j.biortech.2016.03.090.

102. Müller R-J (2015) Biodegradation behaviour of polymers in liquid environments. In: Bastioli C (ed) Handbook of biodegradable polymers. Rapra Technology Limited, Billingham, pp 33–55.
103. Müller R-J, Kleeberg I, Deckwer W-D (2001) Biodegradation of polyesters containing aromatic constituents. *J Biotechnol* 86(2).
104. Murphy, F, Ewins, C., Carbonnier, F, Quinn, B, (2016). Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environ. Sci. Technol.* 50, 5800–5808.
105. Nakamiya, K., Sakasita, G., Ooi, T., Kinoshita, S. (1997). Enzymatic degradation of polystyrene by hydroquinone peroxidase of *Azotobacter beijerinckii* HM121. *J. Ferment. Bioeng.* 84 (5), 480e482.
106. Napper, I.E., Bakir, A., Rowland, S.J., Thompson, R.C., (2015). Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics. *Mar. Pollut. Bull.* 99, 178–185.
107. Nauendorf A, Krause S, Bigalke NK et al (2016) Microbial colonization and degradation of polyethylene and biodegradable plastic bags in temperate fine-grained organic-rich marine sediments. *Mar Pollut Bull* 103(1–2):168–178. doi:10.1016/j.marpolbul.2015.12.024.
108. Nizzetto L, Langaas S, Futter M (2016) Pollution: Do microplastics spill on to farm soils? *Nature* 537(7621):488–488. doi:10.1038/537488b.
109. Nizzetto, L, Futter, M, Langaas, S, (2016)b. Are Agricultural Soils Dumps for Microplastics of Urban Origin? ACS Publications, pp. 10777–10779.
110. Njeru J (2006) The urban political ecology of plastic bag waste problem in Nairobi, Kenya. *Geoforum* 37(6):1046–1058.
111. Nowack B, Bucheli TD (2007) Occurrence, behavior and effects of nanoparticles in the environment. *Environ Pollut* 150(1):5–22. doi:10.1016/j.envpol.2007.06.006.
112. O’Toole G, Kaplan HB, Kolter R (2000) Biofilm formation as microbial development. *Annu Rev Microbiol* 54:49–79. doi:10.1146/annurev.micro.54.1.49.
113. Oberbeckmann, S., Labrenz, M., (2020). Marine microbial assemblages on microplastics: diversity, adaptation, and role in degradation. *Annual Review of Marine Science* 12.
114. Oberdorster E, Zhu S, Blickley TM, McClellan-Green P, Haasch ML (2006) Ecotoxicology of carbon-based engineered nanoparticles: effects of fullerene (C60) on aquatic organisms. *Carbon* 44(6):1112–1120. doi:10.1016/j.carbon.2005.11.008.

115. Ogonowski M, Schur C, Jarsen A, Gorokhova E (2016) The effects of natural and anthropogenic microparticles on individual Fitness in *Daphnia magna*. PLoS One 11(5):e0155063 .
116. Ohura T, Aoyagi Y, Takagi K et al (1999) Biodegradation of poly(3-hydroxyalkanoic acids) fibers and isolation of poly(3-hydroxybutyric acid)-degrading microorganisms under aquatic environments. Polym Degrad Stab 63(1):23–29. doi:10.1016/S0141-3910(98)00057-3.
117. on latex degradation in aquatic systems. Sci Total Environ 447:225–234. doi:10.1016/j. scitotenv.2012.12.067.
118. Pal, P., Pandey, J.P., Sen, G., 2018. In: Thakur, V.K. (Ed.), Biopolymer Grafting. Elsevier, pp. 153e203.
119. Peng, G., Zhu, B., Yang, D., Su, L., Shi, H., Li, D., (2017). Microplastics in sediments of the Changjiang Estuary, China. Environ. Pollut. 225, 283–290. <https://doi.org/10.1016/j. envpol.2016.12.064>.
120. Peterson, J.D., Vyazovkin, S., Wight, C.A., (2001). Kinetics of the thermal and thermo-oxidative degradation of polystyrene, polyethylene and poly(propylene). Macromol. Chem. Phys.
121. Pirsahab, M., Hossini, H., Makhdomi, P., (2020). Review of microplastic occurrence and toxicological effects in marine environment: experimental evidence of inflammation. Process Saf. Environ. Protect. 142, 1e14.
122. Plasticsd The Facts (2019). An Analysis of European Latest Plastics Production, Demand and Waste Data. PlasticsEurope. Available online:review.
123. Porter, A., Smith, K.E., Lewis, C., (2019). The sea urchin *Paracentrotus lividus* as a bioeroder of plastic. Sci. Total Environ. 693.
124. properties of a polyester polyurethane-degrading enzyme from *Comamonas acidovorans* TB-35. Appl. Environ. Microb.
125. Reddy CSK, Ghai R, Rashmi KVC (2003) Polyhydroxyalkanoates: an overview. Bioresour Technol 87(2):137–146. doi:10.1016/S0960-8524(02)00212-2.
126. Roes L, Patel MK, Worrell E, Ludwig C (2012) Preliminary evaluation of risks related to waste incineration of polymer nanocomposites. Sci Total Environ 417:76–86. doi:10.1016/j. scitotenv.2011.12.030.
127. Rosenkranz P, Chaudhry Q, Stone V, Fernandes TF (2009) A comparison of nanoparticle and fine particle uptake by *Daphnia magna*. Environ Toxicol Chem

- 28(10):2142–2149. doi:10.1897/08-559.1Microplastics Are Contaminants of Emerging Concern in Freshwater... 21.
128. Roy PK, Hakkarainen M, Varma IK et al (2011) Degradable polyethylene: fantasy or reality. *Environ Sci Technol* 45(10):4217–4227. doi:10.1021/es104042f .
129. Russell, J.R., Huang, J., Anand, P., Kucera, K., Sandoval, A.G., Dantzler, K.W., Hickman, D., Jee, J., Kimovec, F.M., Koppstein, D., Marks, D.H., Mittermiller, P.A., Núñez, S.J., Santiago, M., Townes, M.A., Vishnevetsky, M., Williams, N.E., ~ Vargas, M.P.N., Boulanger, L.-A., Bascom-Slack, C., Strobel, S.A., (2011). Biodegradation of polyester polyurethane by endophytic fungi. *Appl. Environ. Microbiol.* 77 (17), 6076e6084.
130. Sanchez, C., (2019). Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: an overview of macro- and microplastics biodegradation. *Biotechnol. Adv.* 107501.
131. 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, 204e210.
132. Seco Pon JP, Becherucci ME (2012) Spatial and temporal variations of urban litter in Mar del Plata, the major coastal city of Argentina. *Waste Manag* 32(2):343–348. doi:10.1016/j.wasman.2011.10.012.
133. Smith K (2010) An examination of marketing techniques that influence Millennials’ perceptions of whether a product is environmentally friendly. *J Strateg Mark* 18:4.
134. Teuten EL, Saquing JM, Knappe DRU, Barlaz MA, Jonsson S, Bjorn A, Rowland SJ, Thompson RC, Galloway TS, Yamashita R, Ochi D, Watanuki Y, Moore C, Pham HV, Tana TS, Prudente M, Boonyatumanond R, Zakaria MP, Akkhavong K, Ogata Y, Hirai H, Iwasa S, Mizukawa K, Hagino Y, Imamura A, Saha M, Takada H (2009) Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 364(1526):2027–2045. doi:10.1098/rstb.2008.0284.
135. The Verge (2016) Adidas’ limited edition sneakers are made from recycled ocean waste. <http://www.theverge.com/2016/6/8/11881670/adidas-3d-printed-sneaker-competition>. Accessed 16 Sep 2016

136. Tian, L., Kolvenbach, B., Corvini, N., Wang, S., Tavanaie, N., Wang, L., Ma, Y., Scheu, S Corvini, P.F.-X., Ji, R., (2017). Mineralisation of 14C-labelled polystyrene plastics by *Penicillium variable* after ozonation pre-treatment. *N. Biotech.* 38, 101e105.
137. Tibbetts, J.H., (2015). Managing marine plastic pollution: policy initiatives to address wayward waste. *Environ. Health Persp.*
138. Tien C-J, Chen CS (2013) Patterns of metal accumulation by natural river biofilms during their growth and seasonal succession. *Arch Environ Contam Toxicol* 64(4):605–616. doi:10. 1007/s00244-012-9856-.
139. Tosin, M., Weber, M., Siotto, M., Lott, C., Degli-Innocenti, F., (2012). Laboratory test methods to determine the degradation of plastics in marine environmental conditions. *Front. Microbiol.* 3 (225).
140. Vlachopoulos J, Strutt D (2003) Polymer processing. *Mater Sci Technol* 19(9):1161–1169. doi:10.1179/026708303225004738.
141. Wei, G.L., Li, D.Q., Zhuo, M.N., Liao, Y.S., Xie, Z.Y., Guo, T.L., Li, J.J., Zhang, S.Y., Liang, Z.Q., (2015). Organophosphorus flame retardants and plasticizers: sources, occurrence, toxicity and human exposure. *Environ. Pollut.* 196, 29e46.
142. Wilkes, R.A., Aristilde, L., (2017). Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* sp.: capabilities and challenges. *J. Appl. Microbiol.* 123 (3), 582e593.
143. Willén, A, Junestedt, C, Rodhe, L, Pell, M, Jönsson, H, (2016). Sewage sludge as fertiliser – environmental assessment of storage and land application options. *Water Sci. Technol.* (In press).
144. Woodings, C., 2001. A brief history of regenerated cellulosic fibers. *Regenerated*
145. Wu, C, Zhang, K, Xiong, X., (2018). Microplastic pollution in inland waters focusing on Asia. *Freshwater Microplastics.* Springer, Cham, pp. 85–99.
146. Wu, X., Pan, J., Li, M., Li, Y., Bartlam, M., Wang, Y., (2019). Selective enrichment of bacterial pathogens by microplastic biofilm. *Water Res.* 165, 114979.
147. Wu, Y.H., Li, T.L., Yang, L.Z., (2012). Mechanisms of removing pollutants from aqueous solutions by microorganisms and their aggregates: a review. *Bioresour. Technol.* 107, 10e18.
148. Xiong, X., Zhang, K., Chen, X., Shi, H., Luo, Z., Wu, C., (2018). Sources and distribution of microplastics in China’s largest inland Lake–Qinghai Lake. *Environ. Pollut.* 235, 899–906.

149. Xiong, X., Zhang, K., Chen, X., Shi, H., Luo, Z., Wu, C., (2018)b. Sources and distribution of microplastics in China's largest inland lake Qinghai Lake. *Environ. Pollut.* 235, 899e906.
150. Xu G, Wang QH, Gu QB, Cao YZ, Du XM, Li FS (2006a) Contamination characteristics and degradation behavior of low-density polyethylene film residues in typical farmland soils of China. *J Environ Sci Health Part B* .
151. Xu J, Wang P, Guo WF, Dong JX, Wang L, Dai SG (2006b) Seasonal and spatial distribution of nonylphenol in Lanzhou Reach of Yellow River in China. *Chemosphere* 65(9):1445–1451. doi:10.1016/j.chemosphere.2006.04.042.
152. Yoshida S, Hiraga K, Takehana T et al (2016) A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science* 351(6278):1196–1199. doi:10.1126/science.aad6359.
153. Zbyszewski, M., Corcoran, P.L., (2011). Distribution and degradation of fresh water plastic particles along the beaches of Lake Huron, Canada. *Water Air Soil Pollut.* 220 (1–4), 365–372. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-0760-6> .
154. Zbyszewski, M., Corcoran, P.L., Hockin, A., (2014).. Comparison of the distribution and degradation of plastic debris along shorelines of the Great Lakes, North America. *J. Great Lake. Res.* 40 (2), 288e299.
155. Zhang, K., Su, J., Xiong, X., Wu, X., Wu, C., Liu, J., (2016)b. Microplastic pollution of lakeshore sediments from remote lakes in Tibet plateau, China. *Environ. Pollut.* 219, 450e455.
156. Zubris, K.A, Richards, B.K, (2005). Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environ. Pollut.* 138, 201–211.
157. Zubris, K.A, Richards, B.K, (2005). Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environ. Pollut.* 138, 201–211.
158. Zubris, K.A., Richards, B.K., (2005). Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environ. Pollut.* 138, 201–21.
159. Zylstra, E.R., (2013). Accumulation of wind-dispersed trash in desert environments. *J. Arid Environ.* 89, 13–15.

Site web

1. <https://www.geo.fr/environnement>. Visité le 12 Avril 2022

Résumé

La dépendance à l'égard du plastique pour un grand nombre de produits de consommation, dont beaucoup sont à usage unique, entraîne leur consommation continue.

Dès l'entrée dans les milieux aquatiques, les déchets plastiques peuvent se fragmenter en débris plus petits, certains d'un diamètre de 5 mm (micro plastiques). Les microplastiques sont une préoccupation croissante, mais la recherche sur ce type de pollution s'est principalement concentrée sur les milieux marins, en partie parce que les chercheurs ont pensé que les stations d'épuration pourraient éliminer tous les débris de plastique.

Bien qu'ils soient relativement inertes, ils s'avèrent causer des effets sur les organismes aquatiques.

La dégradation des polymères synthétiques peut généralement être classée comme biotique ou abiotique, suivant des mécanismes différents, selon une variété de facteurs physiques, chimiques ou biologiques.

Ensuite, La biodégradation du plastique comporte plusieurs étapes au cours desquelles le polymère est clivé enzymatiquement en oligomères et monomères assimilables par les micro-organismes .

De nombreux taxons microbiens peuvent dégrader les biopolymères, notamment polyhydroxybutyrate (PHB) et polyhydroxybutyrate-polyhydroxyvalérate (PHBV).

Mots clés : le plastique, l'eau douce, la pollution, la dégradation, Biodégradation

Abstract

The reliance on plastic for a large number of consumer products, many of which are single-use, drives their continued consumption.

As soon as it enters aquatic environments, plastic waste can fragment into smaller debris, some with a diameter of 5 mm (micro plastics). Microplastics are a growing concern, but research into this type of pollution has mostly focused on marine environments, in part because researchers thought sewage stations could remove all plastic debris.

Although relatively inert, they have been shown to cause effects on aquatic organisms.

The degradation of synthetic polymers can generally be classified as biotic or abiotic, following different mechanisms, depending on a variety of physical, chemical or biological factors.

Then, the biodegradation of plastic involves several stages during which the polymer is enzymatically cleaved into oligomers and monomers that can be assimilated by microorganisms.

Many microbial taxa can degrade biopolymers, including polyhydroxybutyrate (PHB) and polyhydroxybutyrate-polyhydroxyvalerate (PHBV).

Keywords: plastic, freshwater, pollution, degradation, biodegradation

الملخص

يؤدي الاعتماد على البلاستيك في عدد كبير من المنتجات الاستهلاكية، والعديد منها للاستخدام الفردي، إلى استمرار استهلاكها. بمجرد دخولها إلى البيئات المائية، يمكن أن تتفتت النفايات البلاستيكية إلى حطام أصغر، يبلغ قطر بعضها 5 مم (لدائن دقيقة). تشكل اللدائن الدقيقة مصدر قلق متزايد، لكن البحث في هذا النوع من التلوث ركز في الغالب على البيئات البحرية، ويرجع ذلك جزئيًا إلى أن الباحثين اعتقدوا أن محطات الصرف الصحي يمكن أن تزيل جميع الحطام البلاستيكي.

على الرغم من أنها خاملة نسبيًا، فقد ثبت أنها تسبب تأثيرات على الكائنات المائية. يمكن تصنيف تحلل البوليمرات الاصطناعية عمومًا على أنه حيوي أو غير حيوي، باتباع آليات مختلفة، اعتمادًا على مجموعة متنوعة من العوامل الفيزيائية أو الكيميائية أو البيولوجية.

بعد ذلك، يتضمن التحلل البيولوجي للبلاستيك عدة مراحل يتم خلالها تقطيع البوليمر إنزيميًا إلى أوليغومرات ومونومرات يمكن استيعابها بواسطة الكائنات الحية الدقيقة.

يمكن للعديد من الأصناف الميكروبية أن تتحلل من البوليمرات الحيوية، بما في ذلك بولي هيدروكسي بوتيرات (PHB) polyhydroxybutyrate-polyhydroxyvalerate (PHBV).

الكلمات المفتاحية: بلاستيك، مياه عذبة، تلوث، تدهور، تحلل حيوي