

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



MÉMOIRE

Présenté par

M^{elle} Saidani Ahlam et M^{elle} Mekkaoui Imane

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Microbiologie et contrôle de qualité

Thème

**Biodégradation du plastique par les microorganismes dans
le sol**

Soutenu le 13/06/2022 devant le jury composé de :

Président	M ^{me} Ayad Amel	MCB	Université de Tlemcen
Encadrant	M ^{me} Brahimi Kholkhal Wahiba	MCB	Université de Tlemcen
Examineur	M ^{elle} Djeziri Fatéma Zohra	MCB	Université de Tlemcen

Année universitaire 2021/2022

Remerciement

Nous remercions Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté pour élaborer ce modeste travail. Nous tenons à remercier sincèrement notre promoteur

Madame Brahimi Kholkhal Wahiba pour avoir bien voulu diriger ce travail en nous faisant part de ses connaissances, ses remarques et ses conseils ; ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de vous Madame 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.

Nous n'oublions pas de remercier les membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail. On tient à remercier M^{me} Ayad Amel Maitre de conférences Classe B 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 nos sincères impressions de gratitude et de respect.

Nos remerciements vont aussi à M^{elle} Djaziri 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.

Ainsi que tous les enseignants de « université Abu Baker Belkaid Tlemcen». Nos sincères remerciements à toutes les personnes qui nous ont aidés conseillé, orienté et encouragé tout au long de la genèse de ce mémoire et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail

Merci

Dédicace

Après Allah

Je dédie ce travail de fin étude

A mes chers parents qui ont été une source de soutien tout au long de mes études.

Aujourd'hui j'ai réalisé mon ambition grâce à leur confiance en moi, leur sacrifice pour moi et leurs précieux conseils.

Je les remercie du fond du cœur pour tout ce qu'ils ont fait pour moi pour réaliser mon rêve ; J'espère que je l'ai fait et les ai rendus heureux

A ma tante, a son mari et à ses enfants (ma second famille) qui m'ont toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études

Je dédie aussi ce travail à mes chers frères : Mohamed et Hamza et à tout mes familles

A toutes mes chères amies, à toute personne qui occupe une place dans mon cœur

Saidani Ahlam

Dédicace

Je dédie ce mémoire A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mon père, mes grands-parents et Ceux qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont chaleureusement supporté et encourage tout au long de mon parcours.

A mes tantes, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Mekkaoui Iman

Résumé

Le plastique est un polymère employé dans une large gamme d'applications, notamment dans les industries de l'emballage, l'agriculture, les pratiques domestiques, etc.... L'utilisation imprévue de ces polymères conduit à l'accumulation de déchets solides dans la nature. Cela affecte le système naturel et crée divers risques environnementaux.

Ils sont considérés comme une menace pour l'environnement car ils sont difficiles à dégrader dont ils sont actuellement générés à un rythme proche de 400 million de tonne par an et leur quantité s'accumule dans l'environnement augmente rapidement, mais notre connaissance de sa persistance est très limitée.

Les espèces bactériennes et fongiques sont les agents biologiques les plus abondants dans la nature, dont ils ont des capacités de dégradation distinctes pour les polymères naturels et synthétiques. Il semble que les agents biologiques et leurs enzymes métaboliques peuvent être exploités comme un outil puissant pour la dégradation des déchets de plastiques.

En outre, ces dernières années, les experts environnementaux et les parties prenantes ont accordé une attention accrue à la pollution des microplastiques dans le sol en tant que polluants persistants, car ils ont un impact significatif sur l'écologie des sols, la production agricole et la santé globale de l'environnement. Les microplastiques peuvent influencer les propriétés bio-physicochimiques du sol et la mobilité d'autres contaminants dans le sol, avec des implications potentiellement importantes sur la fonctionnalité de l'écosystème du sol. Aussi, ils peuvent influencer le biote du sol à différents niveaux trophiques, et même menacer la santé humaine par le biais des chaînes alimentaires.

Cette étude fournira une synthèse de quelques articles afin de comprendre le rôle des microorganismes dans l'élimination des déchets plastiques dans le sol.

Mots clés : plastiques, pollution du sol, biodégradation, microorganismes, microplastique

Abstract

Plastic is a polymer used in a wide range of applications including packaging industries, agriculture, domestic practices, etc.... Unplanned use of these polymers leads to accumulation of solid waste in nature. This affects the natural system and creates various environmental hazards.

They are considered a threat to the environment because they are difficult to degrade and are currently generated at a rate close to 400 million tons per year and their quantity accumulates in the environment is rapidly increasing, but our knowledge of its persistence is very limited.

Bacterial and fungal species are the most abundant biological agents in nature, which have distinct degradation capacities for natural and synthetic polymers. It seems that biological agents and their metabolic enzymes can be exploited as a powerful tool for the degradation of plastic waste.

In addition, in recent years, environmental experts and stakeholders have paid increased attention to the pollution of microplastics in soil as persistent pollutants, as they have a significant impact on soil ecology, agricultural production and overall environmental health. Microplastics can influence the bio-physical-chemical properties of soil and the mobility of other contaminants in soil, with potentially significant implications for soil ecosystem functionality. Also, they can influence soil biota at different trophic levels, and even threaten human health through food chains.

This review will provide a synthesis of some papers to understand the role of microorganisms in the removal of plastic waste from the soil.

Keywords: plastics, Soil pollution, biodegradation, microorganisms, microplastic

المخلص

البلاستيك عبارة عن بوليمر يستخدم في مجموعة واسعة من التطبيقات بما في ذلك صناعات التعبئة والتغليف والزراعة والممارسات المنزلية وما إلى ذلك ... يؤدي الاستخدام غير المخطط لهذه البوليمرات إلى تراكم النفايات الصلبة في الطبيعة. هذا يؤثر على النظام الطبيعي ويخلق العديد من المخاطر البيئية. تعتبر تهديدًا للبيئة نظرًا لصعوبة تدهورها ويتم إنتاجها حاليًا بمعدل يقارب 400 مليون طن سنويًا وتتزايد كميتها في البيئة بسرعة ، لكن معرفتنا باستمراريتها محدودة للغاية. تعد الأنواع البكتيرية والفطرية من أكثر العوامل البيولوجية وفرة في الطبيعة ، والتي تتمتع بقدرات تحلل مميزة للبوليمرات الطبيعية والاصطناعية. يبدو أنه يمكن استغلال العوامل البيولوجية وإنزيماتها الأيضية كأداة قوية في تحلل النفايات البلاستيكية.

بالإضافة إلى ذلك، في السنوات الأخيرة، أولى خبراء البيئة وأصحاب المصلحة اهتمامًا متزايدًا بتلوث الجسيمات البلاستيكية الدقيقة في التربة كملوثات ثابتة، حيث أن لها تأثيرًا كبيرًا على بيئة التربة والإنتاج الزراعي والصحة البيئية العامة. يمكن أن تؤثر المواد البلاستيكية الدقيقة على الخصائص الحيوية الفيزيائية والكيميائية للتربة وحركة الملوثات الأخرى في التربة ، مع آثار كبيرة محتملة على وظائف النظام البيئي للتربة. أيضًا ، يمكن أن تؤثر على الكائنات الحية في التربة على مستويات غذائية مختلفة ، بل وتهدد صحة الإنسان من خلال السلاسل الغذائية. ستوفر هذه المراجعة تجميعًا لبعض الأوراق لفهم دور الكائنات الحية الدقيقة في إزالة النفايات البلاستيكية من التربة.

الكلمات المفتاحية : البلاستيك ، تلوث التربة ، التحلل الحيوي ، الكائنات الدقيقة ، البلاستيك الدقيق

Liste d'abréviation

PE : Polyéthylène
PEG : Polyéthylène glycol
PET : Polyéthylène téréphtalate
PUR : Polyuréthane
PLA : Acide polylactique
PCL : Le polycaprolactone
PESu : Succinate de polyéthylène
PHA : Polyhydroxyalcanoates
PVA : Alcool polyvinylique
PHV : Poly3-hydroxyvalérate
PHB: Poly3-hydroxybutyrate
PHOd: Poly3-hydroxyoctadécanoate
PHO: Poly3-hydroxyoctatanoate
PHD: Poly3-hydroxydécanoate
PHBv: Polyhydroxyvalérate
POP: Les polluants organique persistants
HDPE : Polyéthylène haut densité
PP : Polypropylène
PA : Polyacide
PVC : Polychlorure de vinyle
BPA: Bisphénol A
FDA: Food and Drug administration
N: Nitrate
C: Carbone
P: phosphore
PHBHx: Poly 3-hydroxybutyrateco-3-hydroxyhexanoate
MT : Million de tonnes
ETC : Chaîne de transport d'électron
SEM : Microscope électronique a balayage
AFM : Microscope à force atomique
HAP : Hydrocarbure aromatique polycyclique
PCB : Polychlorobiphényles
PEA : Polyéthylène adipate
ARG : Gènes de résistance aux antibiotiques
CBHs: Cellobiohydrolases
EGs: Endo1, 4-b-glucanases
DOC : Le carbone organique soluble du sol
DON : L'azote organique
DOP : Phosphore organique
Pcs : Pouvoir calorifique supérieur
PGA : Peak ground acceleration
PLGA : Polylactique-Co-glycolique acide
TCA : Cycle de l'acide tricarboxylique
UV : Rayon ultraviolettes

Liste des figures

- Figure 1:** Diagramme schématique des sources de microplastique dans l'écosystème des sols _____ **23**
- Figure 2:** Diagramme schématique montrant l'effet des microplastiques sur les paramètres du sol, les organismes du sol, les plantes et les microorganismes, et l'adsorption d'ions _____ **29**
- Figure 3:** Microorganismes impliqués dans les différentes étapes de la biodégradation des polymères. _____ **37**
- Figure 4:** La biodégradation des polymères dans les conditions aérobies et anaérobies _____ **38**
- Figure 5:** Démonstration des étapes biochimiques de la dégradation du poly (cis-1,4-isoprène) par le modèle hypothétique _____ **40**
- Figure 6:** Schéma montrant les facteurs qui affectent la distribution et la migration des microplastiques dans le profil du sol _____ **44**
- Figure 7:** étapes historiques du développement, de la production et de l'utilisation des plastiques avec la préoccupation et législation associées __ **48**

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les types de polymères biosourcés _____	5
Tableau 2: Les types de polymères synthétiques _____	6
Tableau 3: Inventaire des origines mondiales et coréennes des microplastiques du sol _____	17
Tableau 4: Les effets combinés des microplastiques et d'autres polluants dans divers environnements de sol _____	26
Tableau 5: La liste des microorganismes liés avec les polymères de biodégradation _____	35
Tableau 6: Stratégies et exemples de réduction de la pollution de plastique dans l'agriculture _____	49

Table des matières

Liste d'abréviation	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre I: Généralité sur le plastique

I. Définition de plastique	4
II. Types de plastique	4
II.1. Les plastiques naturels	6
II.1.1. Cellulose	6
II.1.2. Hémicellulose	7
II.1.3. Lignine	7
II.2. Les plastiques synthétiques	8
II.2.1. Le polyéthylène (PE).	8
II.2.2. Polyéthylène téréphtalate (PET).	8
II.2.3. Polyuréthanes (PUR).	8
II.2.4. Polyesters.	9
II.2.5. Alcool polyvinylique (PVA)	10
II.3. Les bioplastiques	10
II.4. Les microplastiques	12

Chapitre II: la pollution du sol par le plastique

I. Introduction	15
II. Sources de la pollution par les microplastiques	16
II.1. Origine des microplastiques du sol.	16
II.2. Sources et voies de pénétration des microplastiques dans le sol	17
II.3. Abondance et distribution des microplastiques	23
II.4. Interaction entre les microplastiques et d'autres polluants dans le sol	25
II.4.1. Interaction entre les microplastiques et les polluants organiques persistants	27
II.4.2. Interaction entre les microplastiques et les métaux lourds	27
II.4.3. Interaction entre les microplastiques et les antibiotiques	28
II.5. Les effets des microplastiques sur le sol.	28
II.5.1. Effet des microplastiques sur les propriétés physiques et chimiques du sol	28
II.5.2. Effet des microplastiques sur les microorganismes du sol	29
II.5.3. Effets des microplastiques sur la faune du sol	30
II.5.4. Effets des microplastiques sur les plantes	31
II.5.5. Les effets sur la santé humaine	31

Chapitre III: la dégradation du plastique par les microorganismes

I. Dégradation du plastique	34
I.1. Définition	34

I.2.Voix de dégradation abiotique	34
II. Biodégradation ou dégradation biotique	35
II.1.Importance de la biodégradation	35
II.2.Les différentes étapes du mécanisme de biodégradation des polymères	36
II.3.Biodégradation aérobie et anaérobie des polymères	37
II.4.Métabolisme microbien et biodégradation des polymères	39
II.5.La biodégradation de différents polymères	41
II.5.1.Cellulose	41
II.5.2.Hémicellulose	42
II.5.3.Lignine	42
II.5.4. Le Polyéthylène succinate	42
II.5.5. Le Polyhydroxyalcanoates	42
II.5.6. Les polyesters	43
III. Migration et dégradation des microplastiques dans le sol	43
III.1.Migration des microplastiques	43
III.2.Le processus d'accumulation des microplastiques	45
III.3.Processus d'altération et de dégradation des microplastiques	45
VI. Evaluation de la dégradation des matières plastiques	45
V. Les moyens de lutte contre la pollution de plastique	46
V.1.Diversité de la dégradation des polymères	46
V.2. Développement de la législation associée aux pollutions plastique	47
V.3.Atténuation de la pollution plastique	48
V.4.Prévention et contrôle	49
Conclusion générale	52
Références bibliographiques	54

Introduction Générale

La grande majorité des plastiques produits aujourd'hui, sont fabriqués à partir de produits pétrochimiques non renouvelables, ainsi nommés parce qu'ils sont dérivés du pétrole fossile, du gaz naturel et du charbon (**Harshvardhan, 2013 ; Pathak, 2017**).

Bien que ces plastiques soient peu coûteux, chacun d'entre eux est un matériau hautement sophistiqué avec des propriétés physiques précises. Ils peuvent être moulés dans toutes les formes souhaitées par rotation, injection l'extrusion, la compression, le soufflage ou le thermoformage. Leurs propriétés matérielles sont ajustées pendant et/ou après la synthèse pour obtenir la résistance, la perméabilité, la porosité, l'opacité et la couleur (**Harshvardhan, 2013 ; Pathak, 2017**).

Au cours des dernières décennies et jusqu'à aujourd'hui, on a assisté à une croissance de l'utilisation de plastique dans le monde (**Nielsen et al., 2020 ; Shen et al.2020a ; Yadav et al., 2020**).

Sans aucun contrôle, d'ici l'année 2060, on prévoit que 155 à 265 Mt de plastique seront produites annuellement (**Chen et al., 2020b**). Environ 20 à 90 Mt de déchets plastiques sont générés chaque année par l'énorme production de plastique (**Lebreton et Andrady, 2019 ; Mazhandu et Muzenda, 2019 ; Borrelle et al., 2020**).

Si les déchets plastiques sont éliminés volontairement ou non dans l'environnement, ils se décomposent en microplastiques au fil du temps (**Bajt, 2021 ; Banu et al., 2020 ; Chico-Ortiz et al., 2020 ; Nanda et Berruti, 2021**)

En outre, les microplastiques présents dans l'environnement affectent la santé humaine par le biais de l'atmosphère et de la chaîne alimentaire. À l'heure actuelle, la plupart des études sur les microplastiques et les risques écologiques se concentrent sur l'environnement aquatique. Bien que de plus en plus des études aient commencé à s'intéresser à l'environnement terrestre au cours des deux dernières années, la proportion de microplastiques dans le sol n'est pas très élevée, ce qui nécessite encore plus d'attention (**Yang et al., 2021**).

Les chercheurs ont découvert que les microplastiques ont un impact sur les microorganismes du sol, entraînant une diminution de la diversité microbienne du sol au cours des dernières années, avec l'approfondissement continu des recherches connexes (**Rillig et al., 2017b ; Kong et al., 2018**)

Le principal mode de dégradation des microplastiques dans le sol est la biodégradation, dont les effets de l'environnement du sol, du broyage mécanique, de l'oxydation à haute température et du rayonnement ultraviolet sont limités. Les microplastiques se dégradent à un rythme très lent dans le sol (**Cooper et Corcoran, 2010, Krueger et al., 2015**).

La biodégradation avec l'aide de micro-organismes est un moyen accessible de nettoyer les déchets plastiques (**Sivan, 2011**).

Les enzymes d'origine microbienne sont utilisées pour lutter contre la pollution et contribuent au développement d'un environnement respectueux. Diverses formes de microflore sont connues pour les utiliser par le biais du processus de minéralisation (**Dey et al., 2012 ; Schink et al., 1992**).

L'objectif de notre étude (travail) est l'efficacité des microorganismes de dégradants le plastique dans le sol. Pour cela, on a essayé d'analyser dix articles :

- Micro plastics in soil ecosystem – A review of sources, fate, and ecological impact: Yu J, Adingo S, Liu X, Li Xi, Sun J , Zhang Xi. *Plant, Soil and Environment*, 68, 2022 (1): 1–17
- Degradation Rates of Plastics in the Environment. Chamas.A, Moon.H, Zheng.j, Qiu.y, Tabassum.T, Jun Hee J, Abu-Omar.M, Scott.S and Suh.S. *ACS Sustainable Chem. Eng.* (2020) 8: 3494–3511
- 2018 AFHVS presidential address Agriculture in the Plastic Age. Goldberger R. *Agriculture and Human Values* (2018) 35:899–904.
- Research of New Pollutant Microplastics in Soil. Yan L, Peng w. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 781 (2021) 052005.
- Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach. Pathak V M and Navneet. *Bioresources and Bioprocessing* (2017) 4:15.
- Microplastic pollution in soil and groundwater: a review. Wainkwa Chia R · Lee j-y · Kim H · Jang j. *Environmental Chemistry Letters* (2021) 19:4211–4224.
- Degradation of agricultural biodegradable plastics in the soil under laboratory conditions. Barragán D. H, Pelacho A. M., and Martin-Closas M. *Soil Research* (2016) 54(2): 216-224

- Effects of biodegradable plastic film mulching on soil microbial communities in two agroecosystems. Bandopadhyay S, Sintim.H and De Bruyn M. *PeerJ* (2020) 8: e9015.
- Biodegradable plastics fragmentation in soil and water: Lessons learnt and comparative assessment with hydro-Biodegradable. AL-SALEM M. *Waste Management and the Environment X, WIT Transactions on Ecology and the Environment* (2020), Vol 247.
- Biodegradable and Compostable Plastics: A Critical Perspective on the Dawn of their Global Adoption. Ciriminna R et Pagliaro M. *Chemistry Open* (2020) 9 : 8–13

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

Chapitre I : Généralité sur les plastiques

Chapitre II : La pollution du sol par le plastique

Chapitre III : La dégradation du plastique par les microorganismes

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

Chapitre I

I. Définition de plastique

Le nom plastique vient du mot grec "plastikos", qui signifie qu'il peut être façonné sous diverses formes (**Rajmohan et al., 2019**).

Un plastique est un terme générique pour une grande molécule artificielle appelée polymère avec des unités similaires ou égales liées entre elles par des liaisons chimiques ; tels que la lignine, l'amidon, la chitine, etc. Ils sont présents dans l'environnement de manière naturelle. Il est composé d'une variété de molécules organiques synthétiques ou semi synthétiques (**Geyer et al., 2017**)

De nos jours, les polymères synthétiques sont utilisés dans de nombreux domaines notamment l'industrie, l'agriculture, la médecine, les transports, la construction, les abris, le stockage dont celle de l'emballage qui couvre 30% de l'utilisation des plastiques dans le monde en raison de leur faible coût de leur bonne ductilité et de leur durabilité. Sa production et consommation ont augmenté à l'échelle mondiale passant de 1.7×10^6 t en 1950 à 3.22×10^8 t en 2015 pour une production totale de 7.8×10^9 t (**Shah et al., 2008b ; Kumar et al., 2011 ; Dey et al., 2012 ; ; Laskar et Kumar, 2019 ; Mishra et al., 2020**).

Aux XIXe et XXe siècles, le plastique a joué un rôle révolutionnaire dans les industries de l'emballage. Par la suite, les approches du transport ont été modifiées avec l'introduction de sacs de transport en polyéthylène (**Nerland et al., 2014**). Les matériaux d'emballage est devenue un défi pour la gestion des déchets solides et constitue une source majeure de pollution (**Song et al., 2009 ; Dey et al., 2012**). Le polyéthylène est l'une des formes courantes de plastique par rapport aux autres (chlorure de polyvinyle, polypropylène, etc.) (**Nerland et al., 2014**).

Donc, les matières plastiques sont devenus des substituts polyvalents, compétitifs et fiables pour le métal, le cuir et le bois traditionnellement utilisés au cours des cinq dernières décennies en raison de leur robustesse, et de leurs propriétés physiques (**Sivan, 2011 ; Singh et Sharma, 2008**).

II. Types de plastique

Les polymères sont fabriqués à partir de matières premières non renouvelables et renouvelables. Ils sont différenciés en fonction de leur nature chimique, leur disposition

structurale et leur propriétés physiques et applications (**tableau 1** et **tableau 2**) (**Shah et al., 2008b ; Dey et al., 2012 ; Kumar et al., 2011 ; Smith, 2005**).

Tableau 1 : Les types de polymères biosourcés (**Averous and Pollet 2012; Babul et al., 2013**)

Type des polymères	structure	R groupe	Applications
Poly (3-hydroxyvalérate) (PHV)	Homopolymère	Éthyle	Industriel, administration de médicaments
Poly (3-hydroxybutyrate) (PHB)		Méthyle	Pharmaceutique et administration de médicaments
Poly (3-hydroxyoctadécanoate) (PHOd)		Penta décanoyl	Zone de médecine
Poly (3-hydroxyoctanoate) (PHO)		Pentyl	Applications médicales
Poly (3-hydroxydécanoate) (PHD)		Heptyl	Industrie des fibres
Poly (3-hydroxybutyrateco-3-hydroxyhexanoate) (PHBHx)	Copolymère	méthyle, avec propyle	Applications médicales
Polymères synthétiques Polyéthylène	Homopolymère	Hydrogène	Dans les fils (en tant que matière isolante), les sacs, les sacs à dos, matière etc...)
Chlorure de polyvinyle		Chorine	Cuir, tuyaux, bouteilles

Tableau 2: Les types de polymères synthétiques (Averous and Pollet 2012; Babul et al., 2013)

Type de polymère	Structure	R groupe	Applications
Polypropylène	Homopolymère	Méthyle	Tissus, tapis
Polyéthylène téréphtalate		Carboxyle et hydroxyle	Applications d'emballage, bouteilles, emballages alimentaires, tuyaux
Polyuréthane	Hétéropolymère	Iso cyanate et polyol	Fibres, mousses, peintures, revêtement, emballages
Polystyrène	Homopolymère	Phényle	Tasses, récipients, pharmaceutiques, assiettes, cosmétiques
Polycarbonate		Carbonate	Revêtement résistant à la chaleur, instruments optiques et automobiles
Nylon		Amide	Fabrication de fibres

II.1. Les plastiques naturels

Les polymères naturels se trouvent en abondance dans la nature sous les formes de biopolymères et de matières sèches de plantes (Leschine, 1995). La constitution de la paroi cellulaire des plantes diffère de la composition de la biomasse lignocellulosique (cellulose, hémicellulose et lignine) qui sont les principaux éléments constitutifs du polymère naturel et fournit la résistance (Perez et al., 2002 ; Premraj et Doble, 2005).

II.1.1. Cellulose

Le système terrestre est connu pour l'abondante production de biopolymères de cellulose. L'apparition de la cellulose se produit après décomposition par les micro-organismes dans divers environnements (sol, milieu aquatique, compost, digesteurs anaérobiques et aussi le cycle du carbone) (Leschine, 1995).

Plusieurs micro-organismes (bactéries et champignons) ont été signalés comme ayant une activité de dégradation de la cellulose. Elle se déroule en aérobie (formation de CO₂ et H₂O) et en anaérobie (formation de CO₂, CH₄ et H₂O) (Perez et al., 2002 ; Nwachkwu et al., 2010).

Par ailleurs, la cellulose est composée de β -1,4 liaisons glycosidiques entre les sous-unités de d-glucose. On la trouve sous différentes formes telles que cristalline et amorphe (les chaînes de cellulose ne sont pas organisées et sont moins résistantes à la dégradation enzymatique) (**Perez et al., 2002**).

Les cellulases sont les enzymes responsables de la décomposition de la liaison β -1,4 glycosidiques de la cellulose. Ils sont classées comme endoglucanases (EGs ou endo-1,4-b-glucanases) et les cellobiohydrolases (CBHs ou exo-1,4-b-glucanases) qui hydrolysent les liaisons internes, externes et l'extrémité des chaînes, respectivement (**Perez et al., 2002 ; Leschine, 1995 ; Souza, 2013 ; Kameshwar et Qin, 2016**).

II.1.2.Hémicellulose

L'hémicellulose est un polysaccharide hétéropolymère linéaire et ramifié qui consiste en des sucres comme le d-xylose, le l-arabinose, le d-glucose, le d-galactose, le d-mannose, l'acide d-glucuronique, l'acide d-galacturonique et l'acide 4-O-méthyle-glucuronique ; qui sont liés les uns aux autres par des liaisons β -1,4liaisons glycosidiques ou rarement par une liaison β -1,3-glycosidiques.(**Perez et al., 2002 ; Leschine, 1995 ; Werner et al., 2014 ;Giudicianni et al., 2013**). Les hémicelluloses sont présentes dans les parois primaires et secondaires de la plante et contribuent à un tiers du poids sec total du bois (**Perez et al., 2002 ; Jeffrie, 1994**).

En combinaison avec la cellulose, elle constitue la majeure partie de la plante ; c'est pourquoi elle est appelée celluloses ou déchets celluloses, qui proviennent des pratiques agricoles (**Petre et al., 1999**). Les xylènes sont les hémicelluloses les plus communes et les plus abondantes dans les parties feuillues et résineuses des angiospermes et des gymnospermes, respectivement (**Horn et al., 2012 ; Hatakka, 2005**).

II.1.3.Lignine

La lignine est un hétéropolymère aromatique complexe relativement insoluble dans l'eau. Il s'agit d'un polymère phénolique qui confère à la paroi cellulaire des plantes par une liaison interne accrue. Grâce à ses caractéristiques distinctes, elle donne une résistance contre les stress biologiques (**Perez et al., 2002 ; Leschine, 1995 ; Souza, 2013 ; Petre et al., 1999 ; Hatakka, 2005 ; Werner et al., 2014**). Il est constitué de trois alcools phénoliques monolignols propioniques, à savoir le coniféryl, le sinapyl et le p-coumaryl. Ces alcools sont présents dans la lignine sous la forme de guaiacyl, syringyl et phydroxyphényl propanol (**Perez et al., 2002 ; Horn et al., 2012 ; Giudicianni et al., 2013 ; Carrieret et al., 2012**).

II.2. Les plastiques synthétiques

Les plastiques synthétiques sont des composés fabriqués par l'homme qui consistent en une longue chaîne de molécules polymères et de liaisons inhabituelles, avec une masse moléculaire excessive et des substitutions d'halogènes (**Shah et al., 2008b**).

De nos jours, la fabrication des plastiques fait appel à différents matériaux inorganiques et organiques, dont le carbone, l'hydrogène, le chlorure, l'oxygène, l'azote, le charbon et les gaz naturels (**Shah et al., 2008b**).

Les différents types de plastiques synthétiques sont : polyéthylène ; polyéthylène téréphtalate ; polyuréthanes ; polyesters ; Alcool polyvinylique.

II.2.1. Le polyéthylène (PE).

Bien que le PE soit le plastique le plus inerte des polyoléfines, il se dégrade lentement dans l'environnement naturel. Les chaînes de l'épine dorsale du PE sont construites exclusivement à partir de liaisons simples C-C qui ne subissent pas facilement l'hydrolyse et qui résistent à la dégradation photo-oxydative, en raison de l'absence de chromophores UV-visible (**Grassie et al., 1988**).

Exemple : Polyéthylène glycols (PEG) sont largement utilisés dans les applications biomédicales, l'administration de médicaments, les matériaux pour biocapteurs et les applications de fabrication (**Datta, 2007**).

II.2.2. Polyéthylène téréphtalate (PET).

La structure chimique du (PET) est constituée de sous-unités alternées de glycolate d'éthylène et de téréphtalate liés par des liaisons ester. Il appartient donc à la classe des polymères connus sous le nom de polyesters (**Suits et al., 2003**).

II.2.3. Polyuréthanes (PUR).

Il a été préparé par polyaddition de diisocyanate. La liaison uréthane implique une chaîne de polymères de poids moléculaire élevé (~200 et 6000). Ces polymères de grand poids moléculaire sont sensibles à la dégradation microbienne (**Shimao, 2001**). Le polyéthylène adipate (PEA) sert également de polymère qui comprend l'uréthane qui est à l'origine un pré-polymère de PUR (**Bhardwaj et al., 2012b**).

II.2.4.Polyesters.

Certains polyesters synthétiques et les Polyhydroxyalcanoates (polymère polyester bactérien) sont connus pour la biodégradation (**Shimao, 2001**). Ces polyesters aliphatiques comprennent des polymères sensibles aux microbes, par exemple le PCL, le PGA, le PLGA et le PLA (**Sathiskumar et Madras, 2011**).

Acide polylactique (PLA) : Les polyesters biodérivés tels que le PLA sont des alternatives intéressantes aux polyesters d'origine pétrochimique, en raison notamment de leur taux de dégradation appréciable dans des conditions de compostage industriel (>60 °C, en présence d'O₂ et d'humidité) (**Musiot et al., 2016**).

Le polycaprolactone (PCL) : Il a été largement utilisé dans le domaine des sciences médicales comme biomatériau élastique. Le polycaprolactone est un polyester semi-cristallin préparé par polymérisation par ouverture de cycle ou par polymérisation radicalaire par ouverture de cycle de ϵ -caprolactone et de 2-méthylène-1-3-dioxépane, respectivement. (**Woodruff et Hutmacher, 2010 ; Gajanand et al., 2014**).

Succinate de polyéthylène : Le polyéthylène succinate (PESu) est un polymère de polyester aliphatique est synthétisé par la polycondensation de l'acide succinique et de l'éthylène glycol. Dans la méthode de polycondensation l'acide succinique et l'éthylène glycol subissent une estérification en présence d'un catalyseur (tétrabutoxytitan), puis une polycondensation avec un stabilisateur de chaleur (polyphosphore) (**Chrissafis et al., 2006 ; Seretoudi et al., 2002**). Ces polymères de polyéthylène succinate sont des élastomères à terminaison hydroxyle (**Shanks et Kong, 2012**).

Wu et Qiu (2012) ont signalé que le polyéthylène succinate est miscible avec d'autres polymères, par ex, le polyvinylphénol, l'oxyde de polyéthylène et le polyhydroxybutyrate. Le point de fusion du polyéthylène succinate est de 103-106 °C, une transition vitreuse à -11,5 °C et une cristallisation à froid à 55 °C, ce qui présente des similitudes avec les polymères non biodégradables comme le polypropylène (**Chrissafis et al., 2005 ; Tribedi et Sil, 2013c**).

Polyhydroxyalcanoates (PHA) : sont des polymères d'origine bactérienne bien connus et servent de polyesters de stockage. Dans des conditions de croissance anormales, les cellules bactériennes sont engagées dans la production de PHA [3-hydroxybutyrate (PHB) et 3-hydroxyvalérate (PHBV)].

Le 3-hydroxybutyrate (PHB) utilisé dans divers dispositifs médicaux a été s'accumulé par de nombreux bactéries, par exemple *Azotobacter vinelandii* et *Alcaligenes eutrophus*. L'utilisation du polyhydroxybutyrate dans les pratiques pharmaceutiques est due à leur bio-acceptation par les patients (**Bonartsev et al., 2007 ; Leja et Lewandowicz, 2010**)

Le polyhydroxybutyrate (PHB) est un polyester extrêmement cristallin (>50%) dans la nature. Le point de fusion du polyhydroxybutyrate est élevé contrairement aux polyesters (**Averous et Pollet, 2012**). Le polyhydroxybutyrate sert de source de stockage d'énergie pour les micro-organismes. Le polyhydroxybutyrate et son copolymère (3-hydroxyvalérate, etc.) sont utilisés dans la production de plastiques dégradables (**Ohura, 2012 et al., 1999 ; Shima, 2001 ; Premraj et Doble, 2005**).

II.2.5. Alcool polyvinylique (PVA)

Le (PVA) est un polymère typique comme le polyéthylène et le polystyrène constitué par la liaison carbone-carbone. Il peut être utilisé dans plusieurs tâches car il est converti en différentes formes grâce à sa thermoplasticité et peut également être utilisé comme système de transport biodégradable grâce à sa nature hydrosoluble (**Shima, 2001**).

II.3. Les bioplastiques

Pour qu'un plastique soit certifié comme "plastique biodégradable", il doit répondre à trois paramètres spécifiques : le degré de dégradation, la durée de la dégradation, et les conditions environnantes de la dégradation. En outre, les organismes de certification doivent suivre des méthodes d'essai standardisées (peut-être plusieurs) pour s'assurer que le matériau satisfait à toutes les spécifications appropriées. Il convient de noter que tous les matériaux compostables sont biodégradables, mais qu'un produit étiqueté comme biodégradable n'est pas nécessairement compostable. Cette déclaration vise à clarifier toute idée fautive et d'empêcher le public de recevoir des informations trompeuses (**Al-Salem et al., 2019 ; nova-institute, 2019**)

Les premiers bioplastiques après le Rilsan (polyamide 11 ou nylon 11) commercialisé au début des années 1950, sont arrivés sur le marché au début des années 1990. Ce n'est que récemment, cependant, que leur adoption à l'échelle mondiale a commencé à devenir significative, en commençant par les sacs à usage unique, la vaisselle et les applications d'emballage. En 2018, les bioplastiques représentaient près de 1 % (2,112 millions de tonnes) de la production mondiale de plastiques d'environ 335 millions de tonnes (**Nova-institute, 2019**)

En Europe, les emballages plastiques à usage unique actuels et les matériaux lignocellulosiques sont biodégradables et compostables lorsqu'ils satisfont aux exigences de la législation sur la protection de l'environnement ; lignocellulosiques sont biodégradables et compostables lorsqu'ils répondent aux exigences de la norme européenne EN 13432 "Exigences relatives aux emballages valorisables par compostage et la biodégradation - Schéma d'essai et critères d'évaluation pour l'acceptation finale des emballages". Des exigences similaires pour les articles en plastique non emballés sont spécifiées par la norme européenne EN 14995. En d'autres termes, ces dernières normes définissent les caractéristiques qu'un matériau doit posséder pour être considéré comme "compostable", à savoir qu'il doit pouvoir être recyclé par valorisation organique (compostage et anaérobie) **(Tin Sin Bee et al., 2019)**

Les plastiques biodégradables peuvent être classés en deux grands types : les oxo-biodégradables et les hydro-biodégradables.

Les plastiques oxo-biodégradables : sont additives avec des sels métalliques inorganiques ou des pro-dégradants. Une plus petite partie du groupe utilise des additifs organiques qui sont censés être consommés par les micro-organismes. Au cours du processus de consommation, les micro-organismes excrètent des substances acides et enzymatiques qui favorisent la dégradation du plastique. Par la suite, les morceaux de plastique décomposés et plus petits peuvent être consommés facilement par les microbes. Ce groupe est connu sous le nom de "plastiques dégradables par voie enzymatique". **(New plastics economy)**

La directive américaine ASTM D6954 était autrefois le seul guide disponible pour tester les plastiques oxo-dégradables pendant de nombreuses années **(Tin Sin Bee et al., 2019)**

C'est ce que reconnaît une grande partie de l'industrie. En outre, les plastiques oxo-dégradables ne remplissent pas les exigences spécifiques du compostage (industriel et domestique) définies par de nombreuses normes accréditées. Cela signifie que ce type de matériau n'est pas approprié pour les applications de restauration compostables, qui représentent une part importante des déchets solides mis en décharge. **(Oxo statement, 2017)**

Les plastiques hydro-biodégradables : sont une catégorie de plastiques contenant une partie d'un composant renouvelable (naturellement biosourcés), comme les additifs à base d'amidon de riz ou de pomme de terre. **(Tin Sin Bee et al., 2019)**

Contrairement aux plastiques hydro-biodégradables, malgré certaines affirmations, les plastiques oxo-dégradables ne sont pas compostables et ne se dégradent pas dans les décharges. **(Oxo statement, 2017)**

En principe, les bioplastiques biodégradables et compostables offriraient les avantages sociétaux mentionnés ci-dessus tout en permettant, respectivement, l'absence de résidus nocifs ou de précieux d'engrais pour le compost. L'acide polylactique (PLA), amidon, pâte de cellulose, Polyhydroxyalcanoates (PHA), tels que le polyhydroxybutyrate, et le polyhydroxyoctanoate sont les principaux biopolymères utilisés pour la production des bioplastiques à usage unique d'aujourd'hui tels que les sacs, la vaisselle, les pailles les verres, les pots d'horticulture, les films de paillage, les sacs poubelle, les feuilles anti-poussière, les bouteilles et les emballages. Selon des estimations récentes et fiables, les emballages plastiques représentent pas moins de 40 % de la consommation globale de plastique chaque année, largement dominée par les polymères pétrochimiques **(Credit Suisse, 2019)**

II.4. Les microplastiques

En 2004, le concept de microplastique a été mis pour la première fois, qui se réfère principalement à des particules de plastiques dont la taille est inférieure à 5 mm ou supérieure à 5 mm **(wright et kelly, 2017)**.

Le terme " microplastique " a été inventé par Thompson. Richard Charles pour décrire les plastiques de plus petite taille, en particulier dans les océans **(Picó et Barceló, 2019 ; Wang et al., 2019a)**. Donc, il n'existe pas de définition standard absolue qui couvre tous les aspects des microplastiques **(Frias et Nsah, 2019)**.

La plupart des classifications acceptent que leur taille se situe dans une fourchette de 5 à 100 mm **(Zhang et al., 2020a)**.

D'autre part, des études récentes supposent que leur taille se situent dans la plage de 5 mm-1 μm **(Hartmann et al., 2019 ; Ahmad et al., 2020)**.

Par ailleurs, ils sont une combinaison de multiples contaminants, et non un seul contaminant comme le comprennent souvent certains scientifiques et décideurs **(Rochman. et al., 2019)**.

Ils sont composés d'une variété de polymères, complétés par une série d'additifs qui peuvent être transformés en une variété de produits. Habituellement, au moins sept polymères et plusieurs couleurs peuvent être utilisés pour les définir **(Su et al., 2019)**.

Ils existent dans l'écosystème sous forme de microplastiques primaires (artificiels) qui impliquent une production dont les dimensions sont inférieures à 5 mm **(Yurtsever, 2019)** ; ou secondaires (générés par la décomposition de gros déchets plastiques) qui englobent un groupe de microplastiques initialement produits dans une certaine taille supérieure à 5,0 mm **(Shahnawaz et al., 2019)**.

D'après les recherches, ils se présentent sous une variété de formes, notamment des particules fibreuses, fragmentaires et sphériques, sont de petite taille, ont un haut degré d'hydrophobie, et ont des propriétés relativement stables qui leur permettent d'exister dans l'environnement pendant une période prolongée **(Zhao et al., 2018)**.

Cependant, en raison de l'altération biologique, physique et chimique, ces microplastiques peuvent être décomposés en plus petites tailles inférieures à 5,0 mm **(Naik et al., 2020)**.

Chapitre II

I. Introduction

Il y a cinquante ans, (**Nichols, 1967**), Mr. McGuire dans le film de leur diplôme dit à Benjamin Braddock - un jeune Dustin Hoffman - le secret de sa future réussite économique : "Je veux juste vous dire un mot. Juste un mot... Plastique... Il y a un grand avenir dans le plastique. Pensez-y. Allez-vous y penser y?" Dans les années 1960, lorsque le film a été réalisé, la fabrication de plastiques était l'une des plus grandes industries des États-Unis (**Rogers, 2005**).

M. McGuire et Benjamin Braddock étaient loin de se douter que la réputation des plastiques était sur le point de prendre un énorme coup, alors que les inquiétudes grandissaient quant aux impacts sur l'environnement et la santé associés à notre amour du plastique. Avance rapide de 50 ans jusqu'à aujourd'hui. Nous pouvons lire sur notre histoire d'amour avec le plastique, mais aussi sur notre "histoire d'amour toxique" (**Freinkel, 2011**). Nous pouvons lire comment le plastique pollue nos océans (**Moore et Phillips, 2011 ; Eriksen, 2017**). Nous pouvons lire des guides étape par étape pour éviter le plastique et préserver la santé de nos familles et de notre planète (**Terry, 2012 ; Plamondon et Sinha, 2017**). Nous pouvons aussi nous procurer le numéro de juin 2018 de National Géographique intitulé "Planète ou Plastique ? Presque 50 pages de photographies et d'articles sur la pollution plastique et les stratégies pour enrayer " l'apocalypse plastique " (**Goldberg, 2018**).

Certains archéologues, ingénieurs en matériaux et autres chercheurs ont affirmé que l'âge du plastique" pourrait être la dernière étape la plus récente de l'histoire de la civilisation humaine, après l'âge de la pierre, l'âge du bronze et l'âge du fer (**Stevens, 2002 ; Giaimo, 2016**).

Nous avons produit 8300 millions de tonnes métriques de plastique depuis les années 1950 (**Geyer et al., 2017**). Vingt-quatre pour cent de plastiques sont encore utilisés, 9 % ont été incinérés, 7 % ont été recyclés et le reste (60 %) s'est accumulé dans des décharges ou dans la nature. (**Geyer et al., 2017**).

Les articles en plastique à usage unique (jetables), comme les bouteilles de boissons en polyéthylène téréphtalate (PET), les sacs à provisions en polyéthylène haute densité (PE), et les pailles en polypropylène, sont particulièrement troublants. Environ 40 % de quelques 400 millions de tonnes métriques de plastique produites chaque année sont jetables (**Parker, 2018**).

Nous savons désormais que l'utilisation du plastique affecte les habitats naturels, la faune et la flore sauvages, et la santé humaine (Thompson, 2013).

II. Sources de la pollution par les microplastiques

Le taux de recyclage des plastiques est faible, et les plastiques qui pénètrent dans l'environnement peuvent être décomposés en microplastiques par des effets physiques, chimiques et biologiques à long terme. Ces derniers peuvent polluer le sol, affecter la croissance des animaux et des plantes, la reproduction des micro-organismes et même la migration des déchets, et même la migration des eaux souterraines (Yang et al., 2021)

En outre, les microplastiques présents dans l'environnement affectent la santé humaine à travers l'atmosphère et la chaîne alimentaire. À l'heure actuelle, la plupart des études sur les microplastiques et les risques écologiques se concentrent sur l'environnement aquatique. Bien que de plus en plus d'études aient commencé à s'intéresser à l'environnement terrestre au cours des deux dernières années, la proportion de microplastiques dans le sol n'est pas très élevée, ce qui nécessite encore plus d'attention (Yang et al., 2021)

II.1. Origine des microplastiques du sol.

Considérant que les principaux rôles du sol sont le maintien de la biodiversité, la modération du cycle des nutriments et la fourniture d'eau potable, il est important d'avoir des connaissances à jour sur l'origine des microplastiques déposés dans les sols de différents types d'utilisation des terres dans un contexte mondial. Au cours des dernières années, des recherches ont été menées pour combler les lacunes ce domaine de recherche qui a été négligé dans différentes parties du monde (Lin et al., 2019 ; Shamshina et al., 2020).

Récemment, Ding et al., (2020) ont souligné que des concentrations de microplastiques aussi élevées que 3410 pièces/kg peuvent polluer les sols agricoles. Dans les systèmes d'utilisation des terres agricoles humides, l'irrigation et les engrais à base d'urée enrobés de microplastiques ont été identifiés comme les principales origines des microplastiques (tableau 3). L'utilisation de l'irrigation et des engrais favorise la croissance des cultures, notamment dans les zones où l'eau est rare (Lin et al., 2019 ; Shamshina et al., 2020).

Dans les systèmes d'utilisation des terres agricoles pluviales (par exemple, une exploitation de patates douces), le paillis plastique et les boues d'épuration sont considérés comme les principales origines des microplastiques dans le sol (Huang et al., 2020). Le paillis plastique est souvent utilisé lors de la plantation des cultures pour réprimer la

croissance des mauvaises herbes, maintenir l'humidité du sol et la température optimale du sol (Asif et al., 2020 ; Wong et al., 2020).

Les boues d'épuration constituent un engrais organique valable pour la croissance du blé (Eid et al., 2019).

Outre l'utilisation de paillis en plastique et de boues d'épuration sur les terres agricoles, l'élimination inappropriée des déchets municipaux, l'abrasion des pneus et les déchets sauvages sont d'autres origines majeures de microplastiques dans le sol (tableau 3).

Tableau 3: Inventaire des origines mondiales et coréennes des microplastiques du sol (Wainkwa Chia et al., 2021)

Origine	Utilisation du sol	profondeur (cm)	Région	Abondance (pièces/kg)
Global Irrigation	Culture du riz paddy	0-10	Shanghai, Chine	10,3 ± 2,2
Boues d'épuration	Champ agricole	0-30	Espagne	5190
Paillage plastique	Culture de plantes	0-10	Hangzhou Bay, East Chine	571
Décharge de déchets (biosolides)	Gestion des déchets industriels	0-15	Yangtze, Chine	1,4 × 10 ⁴

II.2.Sources et voies de pénétration des microplastiques dans le sol

L'application d'engrais chimiques, les films agricoles, les rejets d'eaux usées, la sédimentation atmosphérique, et les fuites de lixiviats de décharges de déchets solides sont collectés dans l'environnement du sol par certains canaux et constituent des sources importantes de microplastiques dans le sol (He et al., 2018)

- **L'utilisation du plastique en agriculture**

L'agriculture américaine utilise environ 1 milliard de livres de plastique par an pour les films agricoles, les plateaux de semences, les bandes d'égouttement, les tuyaux d'eau, les tuyaux d'engrais, de pesticides, de poignées d'outils, de sacs d'ensilage et de ficelle (**Grossman 2015**).

Une grande partie du plastique est conçue pour une utilisation à court terme (saisonnier). Par exemple, les films agricoles peuvent être utilisés pour les serres, le paillage et l'ensilage. Généralement fabriqués à partir de PE de faible densité et utilisés pour une seule saison, les films de paillage en plastique représentent une part importante de la consommation de plastique plus de 40 % des films plastiques utilisés dans l'agriculture (Transparency International). (**Transparency MarketResearch, 2013**).

Par ailleurs, Le polyéthylène et le polyvinyle chlorure sont utilisés pour fabriquer des matériaux de film agricole. Le film PE a une bonne transmission de la lumière et léger, alors que le film PVC a une bonne conservation de la chaleur mais une mauvaise transmission de la lumière (**Singh et al., 2017**).

Les films de paillage en plastique offrent de nombreux avantages aux agriculteurs, comme la lutte contre les mauvaises herbes, la réduction de l'évaporation de l'eau, la température, la réduction des dommages causés par les insectes, la réduction du temps de récolte, l'amélioration de la qualité des cultures et l'augmentation du rendement (**Lamont, 1993,2005 ; Kasirajan et Ngouajio, 2012**).

Les films de paillage en plastique PE, introduits dans les années 1950, sont largement disponibles, peu coûteux et très durables. Cependant, ils doivent être enlevés et être retirés et mis au rebut après usage. Les options d'élimination comprennent le recyclage, l'incinération, le brûlage à la ferme et la mise en décharge (**Moore et Wszelaki, 2016**).

Cependant, leur recyclage est difficile car les films utilisés sont souvent contaminés par la saleté, des débris et des produits agrochimiques, et sont donc rejetés par de nombreuses installations de recyclage (**Kasirajan et Ngouajio, 2012**).

Aussi, leur incinération est entravée par les résidus agrochimiques, le faible volume, la disponibilité dispersée et la saisonnalité ; tandis que le brûlage à la ferme peut libérer des substances cancérigènes et est illégale dans plusieurs États américains (**Moore et Wszelaki, 2016**).

Le transport de plastique à une décharge peut être prohibitif pour de nombreux agriculteurs. En raison des options limitées, certains agriculteurs enterrent le plastique ou le déversent dans les cours d'eau. La plupart de ces pratiques d'élimination ont des ramifications environnementales importantes (**Kasirajan et Ngouajio, 2012 ; Steinmetz et al., 2016**).

Selon des statistiques, la production mondiale dépassera 3 millions de tonnes en 2021, et la Chine est l'un des principaux fabricants et consommateurs de films de paillage (**He et al., 2018**). La "révolution blanche" chinoise, appelée ainsi en raison de l'apparence blanche des films de paillage, a été mise en place en 2009. Elle est appelée ainsi en raison de l'aspect blanc du paillis plastique PE utilisé sur la plupart des terres agricoles (**Hg, 2017**).

Le paillis plastique couvre aujourd'hui 12 % des terres agricoles du pays, soit 49 millions d'acres des terres agricoles du pays, soit une superficie équivalente à la moitié de la Californie (**Hg, 2017 ; Bloomberg News, 2017**).

En 2017, l'utilisation de films de paillage en Chine a atteint 1,437 million de tonnes, couvrant une superficie de 18,5 millions d'hectares, mais le taux de récupération du film de paillage était inférieur à 60 % (**He et al., 2018**).

L'utilisation du plastique a entraîné une augmentation de 20 à 60 % des rendements, ainsi qu'une augmentation de la sécurité alimentaire et des revenus des agriculteurs (**Liu et al., 2014**).

Cependant, le plastique utilisé est très difficile à collecter et de le mettre au rebut. Les films extrêmement fins (< 0,008 mm) se déchirent facilement en petits fragments, de sorte qu'une quantité énorme de plastique reste sur ou dans le sol. Année après année d'utilisation du paillis plastique avec les grandes quantités de paillis a conduit à ce que l'on appelle la "pollution blanche" (**Liu et al., 2014 ; Hg, 2017 ; Bloomberg News, 2017**).

Les résidus de films agricoles constituent une voie importante pour l'accumulation de microplastiques dans le sol. Ils peuvent être scindés même en nanoplastiques sous l'action de la lumière et des microorganismes (**He et al., 2018**). Dans les serres maraîchères de la banlieue de Shanghai, le sol de surface avec un film de paillage utilisé depuis plus de dix ans est le plus riche en microplastiques (**Hodson et al., 2017**).

Avec la généralisation de la promotion et l'application généralisée de la technologie de culture du paillage par film au cours des dernières années, la couverture mondiale de films agricoles devrait augmenter à un rythme soutenu (**Brodhagen et al., 2017**).

Le faible taux de récupération et de recyclage des films agricoles aura pour conséquence un grand nombre de déchets s'accumulant pendant une période prolongée. Ils deviennent une source importante de micro plastique dans les sols agricoles car il est difficile de le dégrader et facile de provoquer une pollution plastiquement des marées marines sont autant de sources de microplastiques dans la région (**Naeini et Cook, 2000 ; Slater et Frederickson, 2001 ; Cherif et al., 2009**)

- **Amendements du sol et produits de compostage**

Comme les produits de compostage et les boues sont riches en nutriments végétaux et en carbone organique, ils sont utilisés comme amendements du sol pour améliorer les propriétés physiques et chimiques du sol, augmenter la teneur en nutriments du sol et accroître le rendement des cultures (**Naeini and Cook, 2000 ; Slater et Frederickson, 2001 ; Cherif et al., 2009**).

La plupart des technologies de traitement et de compostage des boues sont actuellement incapables d'éliminer les microplastiques (**Zubris et Richards, 2005**). En résultat, les boues agricoles et les produits de compostage sont une source importante de microplastiques dans les sols agricoles.

La Chine est un grand pays en termes de production et d'utilisation de produits de compostage, avec une production annuelle de plus de $2,5 \times 10^7$ t et un taux d'application d'environ $2,0 \times 10^7$ t (**Franckx, 2010**). Dans le monde entier, il existe différents niveaux de réglementation régissant la qualité et le taux d'application environ 30 et 35 t/ha par an (**Hopkins et al., 2017**).

Le plastique a été trouvé dans le bétail et le fumier de volaille, selon des études. Il peut être éliminé par des méthodes de tri avant et après le compostage, mais il reste des microplastiques dans le produit de compostage, avec une concentration de 2,38 à 180 mg/kg (**Bläsing et Amelung, 2018**).

Dans une étude menée sur des terres agricoles, la concentration moyenne de plastiques dans les produits compostés a atteint 1,2 g/kg, dont certaines zones présentant des concentrations plus élevées de microplastiques (**Gao et al., 2019**). Par conséquent, l'utilisation d'un grand nombre de produits compostés a entraîné leur accumulation et donc une source importante de pollution par les microplastiques dans les sols.

- **Boues d'épuration**

La concentration de microplastiques dans les influx des installations de traitement des eaux usées du Clyde River était de $15,7 \pm 5,23$ pcs/L dont, elle était réduite à $0,25 \pm 0,04$ pcs/L dans les effluents après le traitement des eaux usées. Donc, le taux d'élimination a atteint plus de 98 %, mais les microplastiques éliminés n'ont subi aucune dégradation importante et sont restés dans les boues (**Murphy et al., 2016, Mintenig et al., 2017**).

Les boues étant riches en N, P et autres nutriments qui peuvent modifier la structure du sol et augmenter sa fertilité, elles peuvent être utilisées comme matière première dans le processus de compostage et appliquées aux sols agricoles. Selon les données disponibles, la production annuelle de boues en Chine est de $3-4 \times 10^7$ t. L'utilisation des boues augmente année en année. Chaque année, environ $4-5 \times 10^6$ (poids sec) de boues sont utilisées pour le compostage des terres cultivées dans l'Union Européenne, et environ 40×10^4 t de microplastiques pénètrent dans le sol (**Zubris et Richards, 2005 ; Nizzetto et al., 2016, Willén et al., 2017**).

En ce qui concerne l'application des boues, une charge de microplastiques dans les boues en Europe et en Amérique du Nord a atteint $6,3 \times 10^4$ t et 43×10^4 t, respectivement (**Hall, 1995**).

Par conséquent, l'utilisation des boues comme engrais entraîne l'accumulation des microplastiques dans le sol. En outre, des études ont révélé que les boues contiennent des substances toxiques et nocives telles que des métaux lourds, des composés organiques persistants, des antibiotiques, des bactéries pathogènes, et des œufs de parasites (**Rillig et al., 2017**).

En effet, ces composés se chargeront à la surface des microplastiques lorsqu'ils coexistent, ce qui exacerbe le problème de la pollution des sols (**Rillig et al., 2017a**).

Selon les conclusions de **Lei et al. (2017)**, les microplastiques sont trouvés dans une variété de nettoyants pour le visage et de gels douche sur le marché, le principal composant étant le polyéthylène. Selon des estimations préliminaires en Chine les produits de soins personnels peuvent introduire environ 39 t de microplastiques dans l'environnement naturel.

Selon **Majewsky et al. (2016)**, les eaux usées contiennent 80 à 260 mg/m³ de polyéthylène et de polypropylène.

- **Les eaux douces**

De nombreuses études sont menées sur les microplastiques dans l'environnement aquatique. A l'heure actuelle les eaux de surface, qui sont une source commune d'eau pour l'irrigation agricole sont devenues une source importante de pollution par les microplastiques dans le sol (**Majewsky et al., 2016**)

Par ailleurs, leur abondance varie considérablement dans les eaux de surface. Selon **Dris et al., (2015)** et **Eerkes-Medrano et al., (2015)**, la concentration de microplastiques dans les lacs et les rivières varie fortement, allant de 10^3 à 10^9 fois.

Su et al., (2016) ont mené une enquête et découvert que la majorité des microplastiques dans le lac Taihu sont fibreux, et leur abondance est d'environ 1×10^4 - $6,8 \times 10^6$ pcs/km².

Mintenig et al. (2019) ont utilisé la technologie d'imagerie par spectroscopie infrarouge pour étudier les eaux souterraines et les particules de plastique dans l'eau de boisson (> 20 µm). Les résultats ont montré que la concentration de microplastiques dans les eaux souterraines pouvait varier de 0 à 7 pcs/m³, avec une valeur moyenne de 0,7 pcs/m³. Les principaux composants étaient le polyéthylène, le polyamide, le polyéthylène téréphtalate et le chlorure de polyvinyle, avec des tailles de particules comprises entre 50 et 150 µm.

- **L'usure des pneus**

Kim et al. (2004, 2006), Ont découvert que les particules de caoutchouc provenant de l'usure des pneus de la route pourraient pénétrer dans l'environnement du sol en bordure de route par dépôt atmosphérique ou le ruissellement de surface. D'après leurs recherche, les émissions annuelles de poussière de pneus en Suède et en Allemagne sont d'environ $1,0 \times 10^4$ t et $1,1 \times 10^4$ t, respectivement. Les déchets plastiques calculés sur la base de la quantité de déchets plastiques dans le monde diffèrent des résultats expérimentaux réels.

- **Dépôt atmosphérique**

Comme l'illustre la **figure 1**, la déposition atmosphérique est une autre méthode par laquelle les microplastiques entrent dans l'environnement du sol. **Dris et al. (2016)** ont étudié l'atmosphère à proximité de Paris et ont découvert que 29280 pcs/m² de microplastiques ont été déposés chaque jour dans l'environnement atmosphérique.

Simultanément, certains chercheurs se sont concentrés sur les constituants des microplastiques fibreux dans les dépôts atmosphériques, et les résultats ont révélé que 50 %

d'entre eux sont des fibres naturelles, 21 % sont des fibres transformées et 20 % sont des fibres synthétiques, 17% de fibres plastiques artificielles et 12 % de fibres mixtes artificielles (Dris et al., 2016).

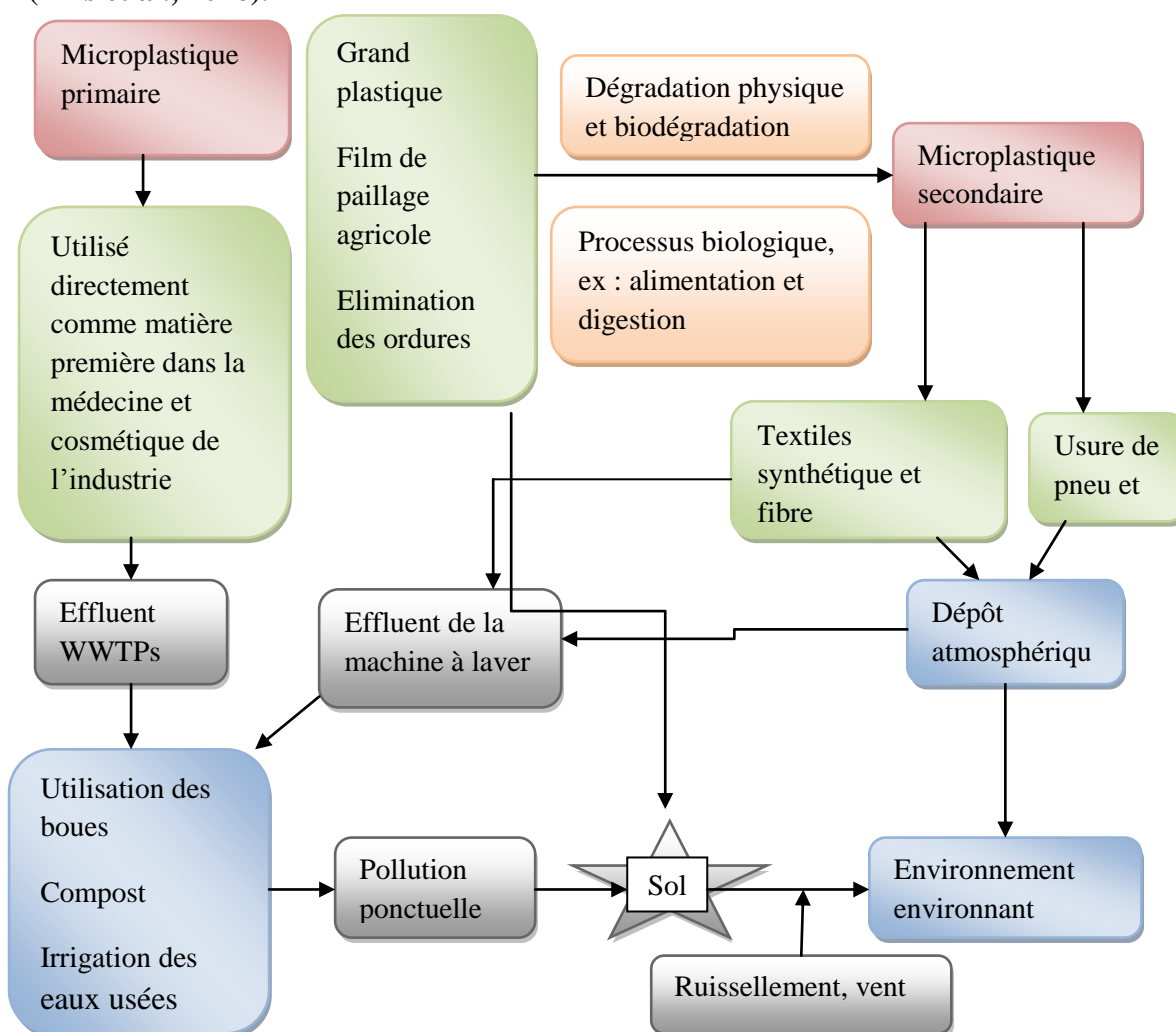


Figure 1: Diagramme schématique des sources de microplastiques dans l'écosystème des sols (Yu et al., 2022)

II.3. Abondance et distribution des microplastiques

Comparativement au milieu aquatique, les rapports sur la pollution des microplastiques dans le sol sont moins nombreux. Les différentes textures de sol et les types d'utilisation entraînent des différences dans cette abondance (Chen et al., 2021)

À l'heure actuelle, des études sur la pollution des sols par les microplastiques ont été menées successivement en France et à l'étranger. Un grand nombre de recherches et d'études ont montré que les propriétés physiques et chimiques, l'utilisation, le temps et d'autres facteurs du sol lui-même influent sur la différence de colmatage des microplastiques (Zhang et al., 2020)

En effet, leurs abondances augmentent avec la diminution de la taille des particules de sol, et la différence spatiale est grand ; et diminuent avec l'augmentation de la profondeur du sol. Par ailleurs, les différents modes d'utilisation du terre influence aussi sur cette distribution (**Zhang et al., 2020**)

Selon **Zhang et al. (2020)**, L'abondance des microplastiques dans le sol de la zone côtière orientale de la Chine est de 1,3-14712,5 ind-kg⁻¹, dont 60 % environ ont une taille inférieure à 1 mm. Et leur abondance dans le sol des terres agricoles de Shanghai (16,1±3,5 ind-kg⁻¹) est inférieure dans la couche superficielle du sol des serres qui est 78,00±12,91 (**Zhang et al., 2020**)

Les microplastiques dont la taille des particules est inférieure à 1 mm représentent 48,79 %. L'abondance de microplastiques dans les zones humides au bord du lac et les terres agricoles de la région du lac Dianchi au Yunnan est de 7100 à 42960 ind-kg⁻¹, avec une moyenne de 18760 ind-kg⁻¹, dont les microplastiques d'une taille de particule inférieure à 1 mm qui représentent 95 % (**Wang et al., 2020**)

Dans le processus de traitement des eaux usées, les microplastiques s'accumulent dans les boues et pénètrent dans le sol par le biais de l'utilisation de ces boues. L'utilisation agricole à long terme aggravera inévitablement la pollution de microplastiques dans le sol (**Hodson et al., 2017**)

Leur abondance dans les échantillons de boues de 28 stations d'épuration des eaux usées de 11 provinces chinoises varie de 1600 à 56400 ind-kg⁻¹, avec une moyenne de 22700±12100 ind-kg⁻¹. Le nombre de microplastiques qui pénètrent dans l'environnement par le biais des boues chaque année en Chine est estimé à 1,56×10¹⁴ (**Hodson et al., 2017**)

Alors, leur abondance dans le sol avec les applications continues de boues est significativement plus élevée que celui environnant sans boues. En outre, le fumier organique composté du bétail et de la volaille est un engrais important dans le processus de production agricole et est particulièrement utilisé dans l'agriculture de proximité (**Hodson et al., 2017**)

A l'heure actuelle, des enquêtes montrent que l'abondance de fragments de plastique d'une taille de particule supérieure à 1 mm dans les engrais organiques est très élevée ; dont la plupart des pays n'ont pas prêté attention au problème de ce type de pollution (**Hodson et al., 2017**)

En général, les données d'enquête sur les microplastiques dans le sol sont relativement peu nombreuses, et l'abondance des microplastiques dans le sol varie selon les régions, les utilisations des sols et les niveaux socio-économiques (**Wang et al., 2020**)

II.4. Interaction entre les microplastiques et d'autres polluants dans le sol

Lorsqu'ils sont exposés à l'environnement du sol, les microplastiques interagissent inévitablement avec d'autres polluants en raison de leur petite taille de particule, leur grande surface spécifique, et de leur forte hydrophobie. Les microplastiques jouent un rôle important dans le transport et la transformation des polluants dans l'environnement du sol (**Ziccardi et al., 2016**).

Les polluants organiques persistants (POP), les métaux lourds et les antibiotiques ont été trouvés sur les surfaces des microplastiques. Ils sont des bons porteurs de ces substances dont ils ont un certain effet combiné sur l'environnement du sol et les organismes. (**Ziccardi et al., 2016**). (Tableau 4)

Tableau 4: Les effets combinés des microplastiques et d'autres polluants dans divers environnements de sol (Yu et al., 2022)

Type de contaminant	Classification	Type de microplastiques	Taille des particules	influences
Esters d'acide phtalique	POP	PVC, PE, PS	< 75 μm	L'adsorption est hautement linéaire
Hydrocarbures aromatiques polycycliques Polychlorés biphényles		PE, PS	250 μm , 300 μm	réduire la capacité d'adsorption du sol
As	métaux lourds	PVC	0.25-1mm	faible toxicité pour les vers de terre
Zn		HDPE	< 5mm	augmente la biodisponibilité du zinc
Tétracycline	Antibiotiques	PE	< 1mm	inhibent la dégradation et la propagation de la tétracycline

II.4.1. Interaction entre les microplastiques et les polluants organiques persistants

Les plastiques sont d'excellents supports pour les composés hydrophobes organiques comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB), les pesticides et les herbicides. Ils peuvent avoir un impact direct sur la distribution des polluants organiques persistants (POP) dans l'environnement du sol, ainsi que dans l'écosystème (**Hüffer et Hofmann, 2016**).

Les polluants dans l'environnement n'existent pas de manière isolée, et la majorité des composés ont des effets antagonistes ou synergiques. Lorsqu'ils sont absorbés par les microplastiques, leur capacité d'adsorption varie, et une adsorption compétitive se produit. (**Hüffer et Hofmann, 2016**)

Hüffer et Hofmann (2016) ont étudié le comportement d'adsorption de quatre types de microplastiques et de sept types de substances aliphatiques pour étudier leur relation, et ont découvert que le coefficient d'adsorption des microplastiques est étroitement lié à leur hydrophobie.

Seidensticker et al. (2018) ont étudié l'adsorption de deux microplastiques et de différents polluants dans trois conditions de pH différentes et ont découvert que les composés hydrophobes s'adsorbent plus fortement sur les microplastiques que les substances naturelles telles que la caféine et le phénanthrène.

Teuten et al. (2007) ont découvert que la concentration de polluants organiques sur les plastiques dans les sédiments était beaucoup plus élevée que dans l'environnement du sol, ce qui indique que les microplastiques et les polluants organiques persistants posent une menace synergique pour le système pédologique.

Alors, selon les recherches actuelles, la surface spécifique, la force de van der Waals, l'affinité de l'hydrophobie des microplastiques et les facteurs environnementaux externes (l'hydrodynamique, la température, la teneur en humidité et le pH) influencent sur les adsorptions physiques et chimiques des microplastiques (**Mato et al., 2001, Bakir et al., 2014 ; Zhan et al., 2016 ; Lambert et al., 2017**).

II.4.2. Interaction entre les microplastiques et les métaux lourds

Certains chercheurs ont étudié l'interaction entre les microplastiques et les métaux lourds, dont ils ont découvert que la surface des microplastiques dans l'environnement du sol

se charge lors de l'abrasion et ils ont capable d'adsorber des cations métalliques (**Hodson et al., 2017**).

La structure de la surface des microplastiques s'était modifiée à la suite de la mise en œuvre des mesures suivantes : l'oxydation par la lumière du soleil et les intempéries. Aussi, ils ont découvert que le pH du sol et le temps de résidence des microplastiques dans l'environnement étaient des facteurs importants influençant la capacité d'adsorption des microplastiques pour les ions métalliques (**Hüffer et Hofmann, 2016**).

II.4.3. Interaction entre les microplastiques et les antibiotiques

Les antibiotiques et les microplastiques peuvent coexister dans l'environnement naturel dans une certaine mesure. L'interaction entre eux a également été étudiée par **Sun et al. (2018)** et **Li et al. (2018)** sur 5 antibiotiques différents (sulfadiazine, amoxicilline, tétracycline, ciprofloxacine, triméthoprime) et cinq microplastiques (PE, PS, PP, PA, et PVC). Ils ont remarqué que PA à la plus grande capacité d'adsorption des antibiotiques, et les deux principaux mécanismes sont la formation de structures poreuses et la formation de liaisons d'hydrogène.

L'interaction polarité-polarité des microplastiques (**Wang et al., 2015**), l'état caoutchouteux (**Teuten et al., 2009**) et la cristallinité (**Guo et al., 2012**) ont agi sur l'adsorption des antibiotiques, tandis que les facteurs environnementaux tels que le pH, la force ionique et la température n'affectent pas la capacité des microplastiques à adsorber la tétracycline (**Shen et al., 2018**).

Par ailleurs, cette combinaison peut causer un des dommages les plus importants à l'écosystème du sol. Une augmentation significative de la diversité et de l'abondance des gènes de résistance aux antibiotiques (ARG) chez *Enchytraeus crypticus* sous l'effet de l'influence combiné des microplastiques et des antibiotiques (**Ma et al., 2010**).

II.5. Les effets des microplastiques sur le sol.

II.5.1. Effet des microplastiques sur les propriétés physiques et chimiques du sol

Les microplastiques ont un impact direct sur les propriétés physique et chimiques du sol ainsi que sur le cycle des matériaux (**fig. 2**).

Liu et al. (2017) et Li et al. (2020) ont trouvé que des concentrations élevées des microplastiques ont des effets significatif sur certains élément(le carbone organique soluble du sol (DOC), l'azote organique (DON), le phosphore organique (DOP)...) après 30 jours d'incubation.

Wang et al. (2020c) ont souligné que les microplastiques dans les sols modifient les propriétés physiques du sol comme la densité apparente du sol, la capacité de rétention d'eau (en modifiant la porosité du sol), et les structures du sol (en accélérant l'évaporation de l'eau du sol).

Actuellement, les recherches sur l'interaction entre les microplastiques et les agrégats du sol sont limitées, et causées par la pollution des microplaques n'en est qu'à ses débuts (stade précoce), ce qui rend impossible de conclure à l'impact de la pollution plastique sur le mouvement et la conservation de l'eau dans le sol (De Souza et al., 2019)

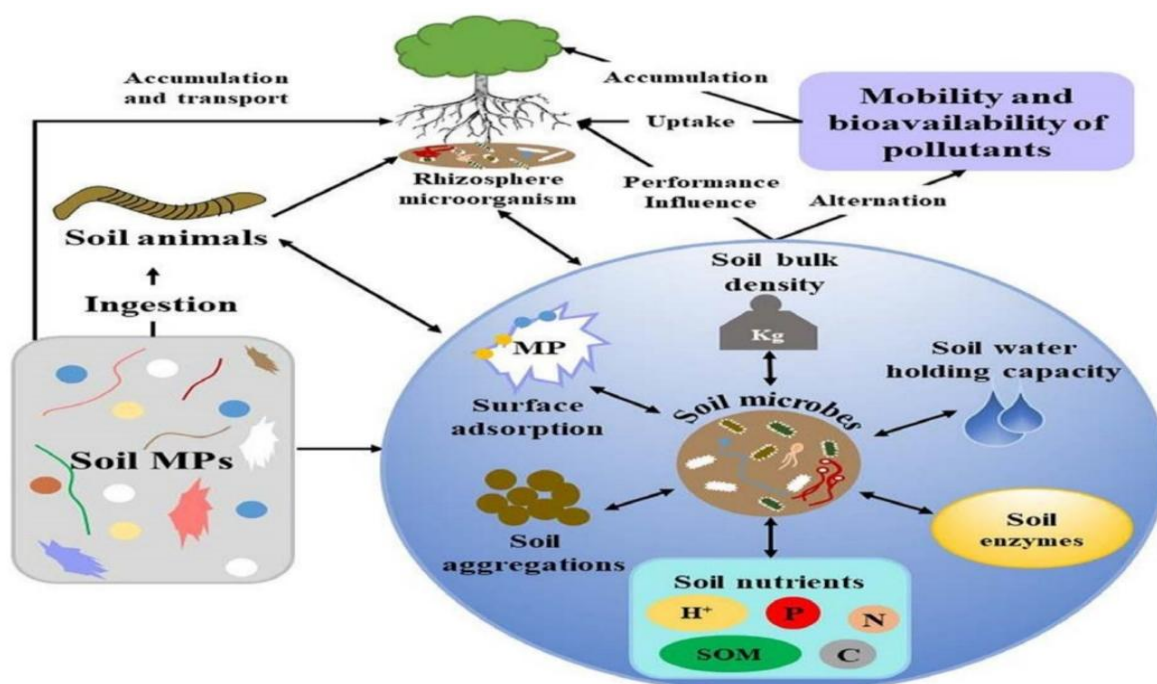


Figure 2: Diagramme schématisant l'effet des microplastiques sur les paramètres du sol, les organismes du sol, les plantes et les microorganismes, et l'adsorption d'ions (Yu et al., 2022)

II.5.2.Effet des microplastiques sur les microorganismes du sol

Les microorganismes du sol jouent un rôle important dans l'écosystème du sol. Selon les recherches, l'augmentation d'activité microbienne favorise la libération de C, N, P et autres

éléments nutritifs du sol, favorisant ainsi la migration des éléments nutritifs entre la plante et le sol (**Burns et al., 2013 ; Huerta Lwanga et al., 2018**).

Plusieurs études ont révélé que les propriétés physicochimiques et les nutriments du sol sont liés aux activités de la microflore sol (**Girvan et al., 2003 ; Arthur et al., 2012 ; Naveed et al., 2016 ; Rillig et al., 2017a**).

Toute altération, telle que des changements dans l'agrégation du sol, qui s'est avéré incorporer des microfibrilles linéaires ; entraînera des changements dans la diversité microbienne par rapport à un sol sans microfibrilles (**Rillig et al., 2017a ; De Souza et al., 2018**).

La présence des microplastiques combinés avec d'autres substances toxiques et nocives va avoir un impact sur la microflore du sol en modifiant ainsi la communauté microbienne et la biodiversité de l'écosystème du sol, affectant ainsi la santé de l'écosystème du sol (**Rillig et al., 2017a**).

En outre, les modifications de la porosité du sol dues à la présence de micro plastiques peuvent influencer le flux d'oxygène à travers le sol, ce qui à son tour déterminerait l'abondance et la distribution des microorganismes aérobies et anaérobies dans le profil du sol (**Rillig et al., 2017a**).

Les activités enzymatiques du sol sont le reflet de l'activité microbienne et la disponibilité des substrats pour l'absorption et l'utilisation des matières premières par les microorganismes. Par conséquent, l'altération de ces enzymes peut indiquer des effets néfastes possibles des microplastiques sur la microflore du sol (**De Souza et al., 2018 ; Rillig, 2018**).

II.5.3.Effets des microplastiques sur la faune du sol

Les microplastiques ont principalement un impact sur la faune du sol par le biais des voies d'alimentation (**figure 2**). Cependant, la complexité de leurs systèmes et leurs fonctions, les différences de taille individuelle, d'habitat, et leurs modes de vie font qu'une étude plus approfondie est extrêmement difficile. (**Rodriguez et al., 2017 ; Rillig et Bonkowski, 2018**).

Les vers de terre sont actuellement les plus étudiés dans le sol. Ils peuvent transporter les microplastiques du sol de surface vers les couches les plus profondes et augmentent leur distribution (**Rodriguez et al., 2017 ; Rillig et Bonkowski, 2018**).

Cao et al. (2017) dans leurs études ont suggéré que les microplastiques inhibent significativement la croissance des vers de terre.

II.5.4.Effets des microplastiques sur les plantes

Les microplastiques dans les écosystèmes agricoles peuvent affecter non seulement la biomasse microbienne du sol, l'activité microbienne et la diversité fonctionnelle, mais aussi la santé des plantes c'est à dire le processus de cycle des éléments nutritifs des plantes dans le sol (**Horton et al., 2017 ; De Souza et al., 2018**) (**Fig. 2**). Ce qui peut avoir un effet indirect sur la germination et la croissance des graines de plantes. Les microplastiques qui restent dans le sol pendant un période prolongé sont susceptibles de former des nanoplastiques (**Ng et al., 2018**).

Ces derniers migrent et s'accumulent dans les plantes avant d'être ingérés par d'autres organismes via la chaîne alimentaire, ce qui finit à l'être humaine directement ou indirectement (**Rico et al., 2011**).

Selon **Asli et Neumann (2009)** et **Ma et al. (2010)**, l'accumulation des microplastiques dans les plantes peut affecter l'absorption et le transport des nutriments et d'autres produits solubles importants en bloquant les pores de la paroi cellulaire ou des connexions cellulaires.

Judy et al. (2019) ont rapporté une influence non significative des microplastiques sur la germination et la biomasse du blé. Des recherches supplémentaires sont donc nécessaires pour combler le manque de connaissances sur l'influence des microplastiques sur les plantes.

Wang et al. (2020a) ont constaté que le cadmium, un métal lourd, coexistera avec le polyéthylène et le polylactique dans les sols et provoquer une symbiose racinaire et entraver la croissance

II.5.5.Les effets sur la santé humaine

Les microplastiques sont généralement considérés comme des substances inertes, ayant une faible réactivité chimique, de petite taille et facilement absorbées par les organismes ou les humains (**Dąbrowska, 2021 ; Othman et al., 2021**). Ils ont été trouvés récemment dans les excréments humains (**Wang et al., 2019b**).

Katyal et al. (2020) ont indiqué que certains scientifiques ont proposé des théories selon lesquelles les microplastiques peuvent pénétrer dans les cellules animales par les macrophages ou les cellules endothéliales vasculaires.

Les humains peuvent les ingérer directement du sol ou des eaux souterraines, soit en buvant directement de l'eau, soit par la consommation d'animaux et de plantes qui ont absorbé ces microplastiques puis les transférer à l'homme par l'intermédiaire de la chaîne alimentaire (**Ribeiro et al., 2019 ; Padervand et al., 2020 ; Zhang et al., 2020 c**).

D'après **Sana et al., (2020)**, les microplastiques peuvent également être absorbés par la peau humaine dont elle peut provoquer des infections cutanées.

Ils peuvent provoquer des effets toxiques, le stress oxydatif, une inflammation chronique du corps humain et endommager les tissus (**Naqash et al., 2020 ; Shen et al., 2020b**).

Chapitre III

I. Dégradation du plastique

I.1. Définition

La dégradation des polymères est un processus qui modifie la résistance et la couleur des matériaux polymères sous contrôle. La rupture de la longueur de la chaîne initie la dégradation primaire (vieillessement), et plusieurs facteurs externes tels que la température et les produits chimiques ; la vitesse de dégradation. Le terme "vieillessement" est utilisé pour le changement des propriétés polluante (Kumar et al., 2011 ; Bhardwaj et al., 2012a).

I.2. Voix de dégradation abiotique

De nombreux polymères synthétiques sont dégradés sous l'effet de l'exposition aux rayons ultraviolets (UV) solaires, par des réactions photo-oxydatives, thermo-oxydatives et photolytiques (Singh et Sharma, 2008).

Bien que les voies de dégradation biotiques soient également importantes, la dégradation est généralement initiée de manière abiotique (lumière, chaleur, acides, etc.). Les processus abiotiques et biotiques fonctionnent souvent en tandem, la dégradation abiotique conduisant à des molécules plus petites qui sont ensuite minéralisées par des microbes (Albertsson et al., 1990)

Les mécanismes et de dégradation environnementale des plastiques peuvent être classés comme :

- **Physiques** : se référant à des modifications de structure globale, tels que la fissuration, la fragilisation et l'écaillage (Gewert et al., 2015)
- **Chimiques** : se rapportant à des changements au niveau moléculaire tels que le clivage des liaisons ou l'oxydation des longues chaînes polymères pour créer de nouvelles molécules, dont la longueur de la chaîne est généralement beaucoup plus courte. Les dangers potentiels pour l'environnement associés aux sous-produits chimiques solubles de la dégradation des matières des plastiques doivent être ainsi qu'avec la lixiviation de petites molécules ajoutées lors de la formulation du produit. Généralement, la dégradation chimique à des températures proches de l'ambiante dans l'environnement implique soit l'hydrolyse (nécessitant H₂O), soit l'oxydation (nécessitant O₂). (Lucas et al., 2008 ; Andrady, 2011)

II. Biodégradation ou dégradation biotique

II.1. Importance de la biodégradation

Au cours des trois dernières décennies, la recherche mondiale s'est concentrée sur la biodégradation du plastique (Shimao, 2001). La biodégradation est compatible (minéralisation microbienne) par rapport à d'autres techniques de gestion des déchets (Schink et al., 1992). La biorémédiation est le meilleur moyen de gérer les déchets de manière écologique. Les sites pollués sont en constante augmentation en raison de stratégies de gestion des déchets ; ces déchets proviennent des zones industrielles et des activités communautaires biologiques procaryotes (bactéries) et eucaryotes (champignons, algues et plantes) sont impliqués dans le processus de biorémédiation (Shah et al., 2008a)

Pseudomonas, *Streptomyces*, *Corynebacterium*, *Arthrobacter*, *Micrococcus* et *Rhodococcus* sont les principaux agents microbiens les plus importants utilisés pour la biorémédiation (tableau 5) (Kathiresan, 2003 ; Bhardwaj et al., 2012a; Bhatnagar et Kumari, 2013 ; Dussud et Ghiglione, 2014; Restrepo-Flórez et al., 2014; Kale et al., 2015 a, b ; Grover et al., 2015).

Tableau 5: La liste des microorganismes liés avec les polymères de biodégradation (Pathak et Navneet, 2017)

Type des polymères	Les microorganismes
Polyéthylène	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> , <i>P. fluorescens</i> , <i>Staphylococcus epidermidis</i> , <i>Streptomyces badius</i> , <i>S. setonii</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Acinetobacter baumannii</i> , <i>Micrococcus luteus</i> , <i>Aspergillus niger</i> , <i>Fusarium redolens</i> ,
Polyuréthane	<i>Fusarium solani</i> , <i>Cladosporium</i> sp., <i>Trichoderma</i> DIA-T spp.
Poly (3-hydroxybutyrate)	<i>Pseudomonas lemoignei</i> , <i>Schlegella</i> , <i>Aspergillus fumigatus</i> , <i>Penicillium</i> spp, <i>Penicillium funiculosum</i>
Polycaprolactone	<i>Bacillus brevis</i> , <i>Fusarium solani</i> , <i>Aspergillus flavus</i>
Acide polylactique	<i>Penicillium roquefort</i> , <i>Bacillus brevis</i> , <i>Rhizopus delemar</i>

II.2. Les différentes étapes du mécanisme de biodégradation des polymères

Les micro-organismes décomposent les composés en une forme plus simple par transformation biochimique. La biodégradation d'un polymère est décrite comme toute altération des propriétés du polymère, telles que la digestion par les enzymes microbiennes, la réduction du poids moléculaire, la perte de la résistance mécanique et des propriétés de surface, en d'autres termes, la décomposition de la matière en fragments par digestion microbienne. Les particules dégradées sont redistribuées et probablement non toxiques pour l'environnement. Dans la nature, les micro-organismes forment des enzymes catalytiques pour la biodégradation (**Hadad et al., 2005**).

Cette approche est efficace pour la gestion des déchets environnementaux, et les microorganismes impliqués dans ce processus d'oxydation constituent un mode alternatif tangible pour maintenir un environnement sain (**Singh et Sharma, 2008**). Le processus de dégradation est accompli par les microorganismes par le biais de différentes activités enzymatiques et le clivage des liaisons. Cette dégradation se produit en plusieurs étapes séquentielles (**fig. 3**) :

1. La bio-détérioration (altération des propriétés chimiques et physiques du polymère).
2. La bio-fragmentation (décomposition du polymère en une forme plus simple via un clivage enzymatique)
3. L'assimilation (absorption de molécules par des micro-organismes).
4. La minéralisation (production de métabolites oxydés (CO_2 , CH_4 , H_2O) après dégradation), qui sont illustrées à la **Figure 3**.

Par ailleurs, la Minéralisation des polymères a lieu dans des conditions aérobies et anaérobies. Dans les conditions aérobies, le CO_2 et H_2O sont formés, tandis que dans des conditions anaérobies, CH_4 , CO_2 et H_2O sont produits (**Singh et Sharma, 2008**).

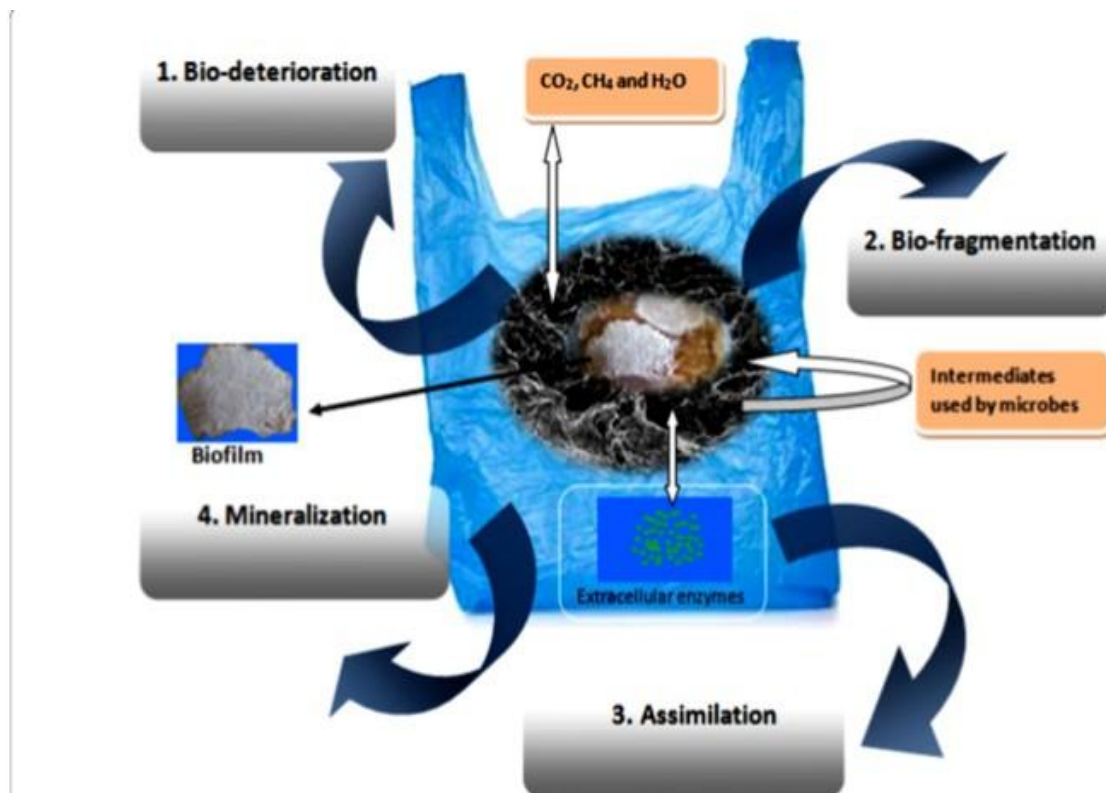


Figure 3: Microorganismes impliqués dans les différentes étapes de la biodégradation des polymères. (Pathak et Navneet, 2017)

II.3. Biodégradation aérobie et anaérobie des polymères

La biodégradation des polymères dépend des propriétés physiques et chimiques du polymère. Le poids moléculaire et la cristallinité sont des propriétés clés des polymères qui influencent l'efficacité de la biodégradation des micro-organismes. Les enzymes responsables de la dégradation des polymères sont classées en deux groupes, à savoir la dépolymérase extracellulaire et les dépolymérase intracellulaires (Gu, 2003).

Les exoenzymes sont généralement impliquées dans la dégradation de polymères complexes en unités simples comme les monomères et les dimères. Ces sont ensuite exploités par les microorganismes comme sources d'énergie et de carbone (fig. 4).

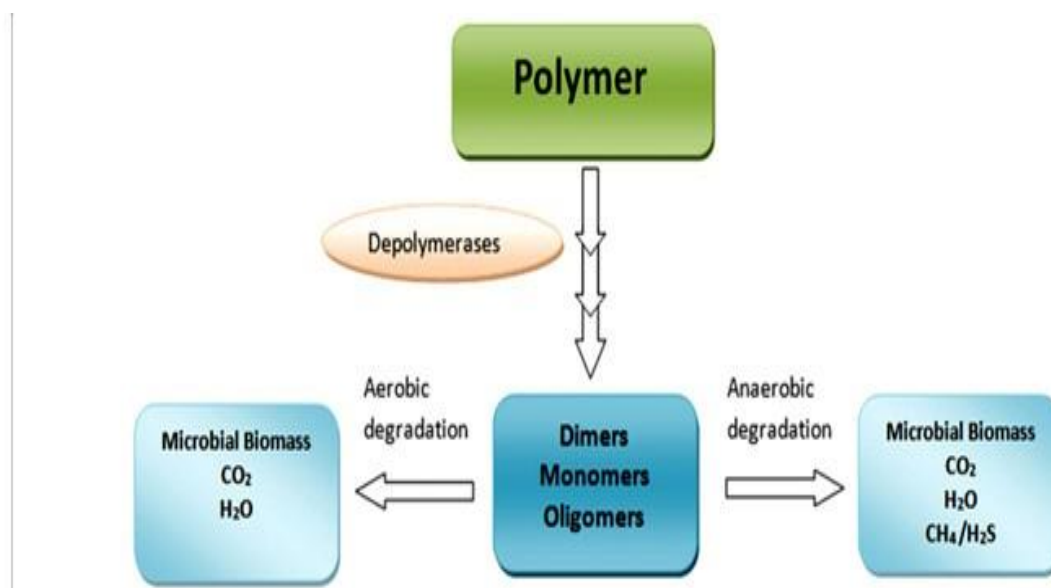


Figure 4: La biodégradation des polymères dans les conditions aérobies et anaérobies (**Gu, 2003**)

La dégradation des polymères (minéralisation) forme de nouveaux produits pendant ou à la fin des processus, par exemple, du CO_2 , du H_2O ou CH_4 . Les polymères naturels comme la cellulose, le PHB et la chitine sont susceptibles de subir une dégradation microbienne et servent de polymères biodégradables (**Chahal et al., 1992 ; Brune et al., 2000 ; Gu, 2003**).

Le processus de dégradation dépend de la disponibilité de l' O_2 . La dégradation des polymères accomplie dans des conditions anaérobies produit des acides organiques, H_2O et des gaz (CO_2 et CH_4) (**Gu, 2003**).

Dans des conditions aérobies, la biodégradation du polymère forme du CO_2 et du H_2O en plus de la biomasse cellulaire des microorganismes.

De même, dans des conditions sulfidogènes, la dégradation des polymères forme du H_2S , du CO_2 et du H_2O (**Barlaz et al., 1989 ; Gu, 2003 ; Gu et Mitchell, 2006 ; Merrettig et Jelen, 2009**).

Le processus aérobie est plus efficace que le processus anaérobie en ce qui concerne la production d'énergie, car l'énergie produite dans les processus anaérobies est moindre en raison de l'absence d' O_2 , qui sert d'accepteur d'électrons et ce dernier est plus efficace par rapport à la production de CO_2 et SO_4^{2-} (**Gu, 2003**).

Dans le traitement des déchets solides, les dénitrificateurs sont classés dans la catégorie des organismes aérobies et sont utilisés pour le traitement des eaux usées et l'exploitation des nitrates ou des nitrites. Dans des conditions anoxiques, le nitrate ou le nitrite sert d'accepteur terminal d'électrons dans le processus de respiration (**Kale et al., 2015**).

Une plus grande quantité de CO₂ est produite au pH le plus bas avec les champignons lignolytiques (**Kale et al., 2015**).

Huang et al., (2005) ont étudié les micro-organismes des boues pour la dégradation du polyéthylène glycol (PEG) dans des conditions aérobies et anaérobies. Ils ont étudié l'effet sur l'efficacité de la dégradation aérobie et anaérobie des PEG ont trouvé que la dégradation aérobie est plus efficace que la dégradation anaérobie.

II.4.Métabolisme microbien et biodégradation des polymères

Les bactéries et les champignons constituent un groupe de microorganismes largement répandu qui joue un rôle important dans la transformation des polymères dans l'environnement naturel (**Upreti et Srivastava, 2003**).

Ils sont utilisés pour convertir le biopolymère insoluble en forme soluble. Les polymères d'origine naturelle sont constitués de lipides, de glucides et de protéines. Les enzymes microbiennes sont la source ultime pour hydrolyser uniquement les macromolécules solubles et de faible poids moléculaire. Ces composés solubles sont exploités par les microorganismes pour la production d'énergie (**Gallert et Winter, 2005**).

La dégradation microbienne des polymères entraîne une modification des propriétés physico-chimiques des matériaux. La bioconversion ou les biomatériaux est bien comprise grâce à l'étude des propriétés mécaniques, la cinétique de dégradation et la reconnaissance des produits dégradés. Elle modifie l'efficacité de la réponse de l'hôte, la croissance cellulaire, la fonction du matériau, etc. (**Gallert et Winter, 2005**).

Le cycle de l'acide tricarboxylique (TCA) est l'une des principales voies métaboliques de production d'énergie à partir de la plupart des composés organiques. Dans le cycle TCA, l'acétyl-CoA joue le rôle d'intermédiaire clé et il est exploité dans des activités cellulaires comme la formation de CO₂ par oxydation, la formation d'acétate, la biosynthèse, etc.

La principale contribution du cycle TCA est de générer de l'ATP et donc fournir de l'énergie à la cellule. Deux molécules d'ATP sont synthétisées par l'oxydation de 2 molécules

d'acétate, tandis que 34 molécules d'ATP est synthétisées par la chaîne de transport d'électrons (ETC) par phosphorylation.

Le métabolisme et l'efficacité de la production d'énergie varient en fonction de l'espèce microbienne et les conditions de croissance.

Les bactéries aérobies sont capables de respirer des hydrates de carbone, mais un tiers de l'énergie de départ n'est pas utilisée par la cellule et est perdue sous forme de chaleur. L'énergie restante est conservée par voie biochimique.

Au cours du traitement des eaux usées, les réacteurs à boues activées perdent une grande partie de leur énergie sous forme de chaleur. Dans des conditions limitant la croissance, le taux de consommation d'ATP est augmenté et moins d'énergie disponible pour la croissance cellulaire et le métabolisme (Gallert et Winter, 2005) (fig. 5).

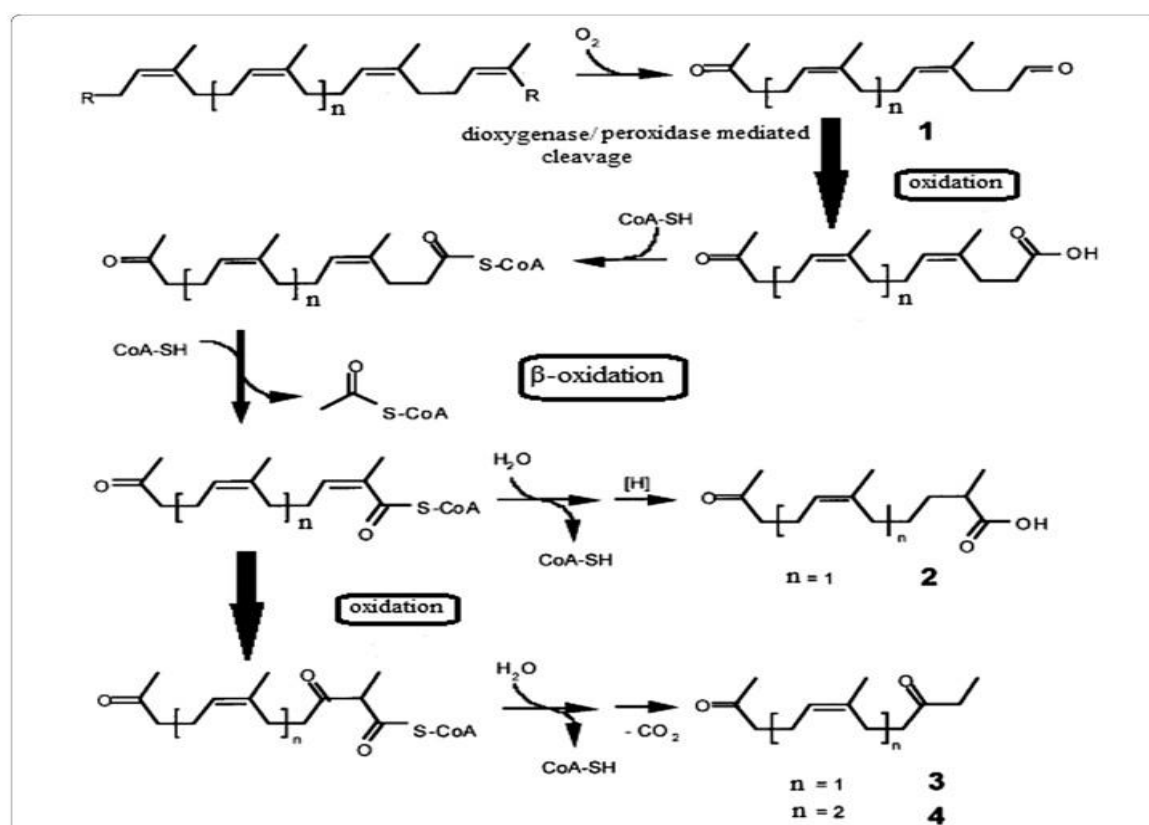


Figure 5: Démonstration des étapes biochimiques de la dégradation du poly (cis-1,4-isoprène) par le modèle hypothétique (Bode et al., 2000)

II.5. La biodégradation de différents polymères

La biodégradation avec l'aide de micro-organismes est un moyen accessible de nettoyer les déchets plastiques. Les microorganismes sont capables d'utiliser des polymères synthétiques, mais leur composition et leur processus de fabrication doivent être définis pour l'activité biologique sur le matériau polymère (Sivan, 2011 ; Song et al., 2009 ; Leja et Lewandowicz, 2010; Kumar et al., 2011).

Les enzymes d'origine microbienne sont utilisées pour lutter contre la pollution et contribuent au développement d'un environnement respectueux.

La plupart des communautés microbiennes sont capable d'utiliser le polyester et le polyuréthane à un rythme plus lent (Dey et al., 2012 ; Schink et al., 1992).

Les plastiques à base d'amidon ou de cellulose sont biodégradables ; ils se dégradent facilement par compostage, ce qui peut réduire la mise en décharge et résoudre le problème de la gestion des déchets.

Les voies de dégradation de certains polymères soient :

II.5.1. Cellulose

La décomposition de la cellulose rend le carbone disponible pour les micro-organismes. *Pseudomonas*, *Streptomyces* et *Cellulomonas* sont signalés pour leur activité cellulase (Leschine, 1995 ; Perez et al., 2002 ; Souza, 2013 ; Kameshwar et Qin, 2016).

La dégradation fongique de la cellulose a été rapportée avec des membres des *Basidiomycètes* et des *Chytridiomycètes* (Souza, 2013).

La biodégradation anaérobie de la cellulose est très complexe par rapport à la dégradation aérobie. Elle contribue à 5-10% de la dégradation totale de la cellulose (Leschine, 1995 ; Souza, 2013 ; Kameshwar et Qin, 2016 ; Xu et al., 2016).

Le prétraitement de la cellulose la rend également sensible à l'hydrolyse (Arutchelvi et al., 2008 ; Jonsson et Martín, 2016). Ils ont été employés lors du broyage, traitements acide, alcalin et autres (Karimi et Taherzadeh, 2016).

Blouzard et al. (2007) ont signalé un système hydrolytique pour la dégradation de la cellulose chez *Clostridium cellulolyticum* et ont découvert que l'hydrolase appartient aux

familles de gènes GH2, GH9, GH10, GH26, GH27, et GH59 et que les cellulases codant pour le gène de la famille GH9.

II.5.2.Hémicellulose

Une dégradation plus importante du xylan a été constatée avec l'acide carbonique et était plus facile à hydrolyser par voie enzymatique que la cellulose (**Carvalho et al., 2008 ; Perez et al., 2002 ; Horn et al., 2012**). Les xylanases éliminent la paroi de la chaîne latérale en attaquant le squelette (**Jeffrie, 1994**).

II.5.3.Lignine

La dégradation du polymère de lignine est effectuée par des systèmes enzymatiques extracellulaires spécifiques, tels que les oxydoréductases (**Perez et al., 2002 ; Horn et al., 2012**).

La solubilisation à base d'alcalins est également efficace pour la dégradation de la lignine (**Carvalho et al., 2012**)

P. chrysosporium, et *Streptomyces sp* Sont des producteurs bien reconnus de peroxydases, qui sont efficaces contre la dégradation de la lignine (**Carvalho et al., 2008 ; Hatakka, 2005 ; Jeffrie, 1994**).

II.5.4. Le Polyéthylène succinate

Le polyéthylène succinate sert de polyester biodégradable ; il contient des liaisons ester, qui sont hydrolysables par nature et sensibles aux attaques microbiennes. *Pseudomonas sp.* AKS2 a été signalée pour sa dégradation en raison de l'amélioration de l'hydrophobie de sa surface cellulaire, qui sert de facteur déterminant (**Liu et al., 2012 ; Qiu et al., 2003 ; Tribedi et Sil, 2013**).

II.5.5. Le Polyhydroxyalcanoates

La biodégradation du PHA est accomplie par la minéralisation microbiologique et génère du CO₂ et du H₂O. On connaît des dépolymérase de PHA d'origine bactérienne, qui peuvent contribuer à la dégradation du polymère (Polyhydroxyalcanoates) (**Bonartsev et al., 2007 ; Leja et Lewandowicz, 2010**).

La dégradation du PHB a également été effectuée par *Ilyobacter delafieldii* en l'absence d'oxygène (**Schink et al., 1992 ; Jirage et al., 2011**). Pendant le processus de lyse cellulaire, les granules de PHB sont libérés à l'extérieur et hydrolysés par la PHB dépolymérase

extracellulaire. Les PHB dépolymérase sont des enzymes qui initient la dégradation intracellulaire des PHBs (Weng et al., 2011)

II.5.6. Les polyesters

La biodégradation s'effectue sur les polyesters, formés par des liaisons esters, et les estérase sont les enzymes responsables de la dégradation de ces liaisons que l'on trouve chez les micro-organismes (Shimao, 2001).

Les micro-organismes sont capables de rompre les liaisons uréthane ou d'ester en raison de leur capacité d'attaquer le polymère thermodurcissable et de l'utiliser comme source de carbone et d'azote (Zheng et Yanful, 2005).

III. Migration et dégradation des microplastiques dans le sol

III.1. Migration des microplastiques

La **figure 6** montre les différents facteurs qui contribuent à la migration des microplastiques dans le profil du sol. Ces caractéristiques (taille, densité et forme), le climat extérieur (vent, pluie), la faune du sol (vers de terre,...) et l'influence d'autres forces extérieures ont tous une influence sur le processus leur migration dans le sol (perturbation mécanique) (Free et al., 2014 ; Driedger et al., 2015 ; Dris et al., 2016).

Il existe pour l'instant peu de rapports sur la migration et la dégradation des microplastiques dans l'environnement du sol.

O'Connor et al., (2019) ont découvert que la profondeur de migration des microplastiques a augmenté de manière significative avec le nombre de cycles sec-humide, alors que la précipitation unique appliquée et la concentration de microplastiques en surface ont eu peu d'effet sur la profondeur de migration lors d'expériences de simulation d'infiltration et de migration de microplastiques dans des colonnes de sable.

En outre, les vers de terre peuvent déplacer les microplastiques de la surface du sol dans leurs terriers et plus profondément dans le sol (**fig. 6**). Selon les données présentées ci-dessus, l'une des sources de pollution des eaux souterraines est la migration et la transformation des microplastiques par les organismes du sol (**Huerta et al., 2017**).

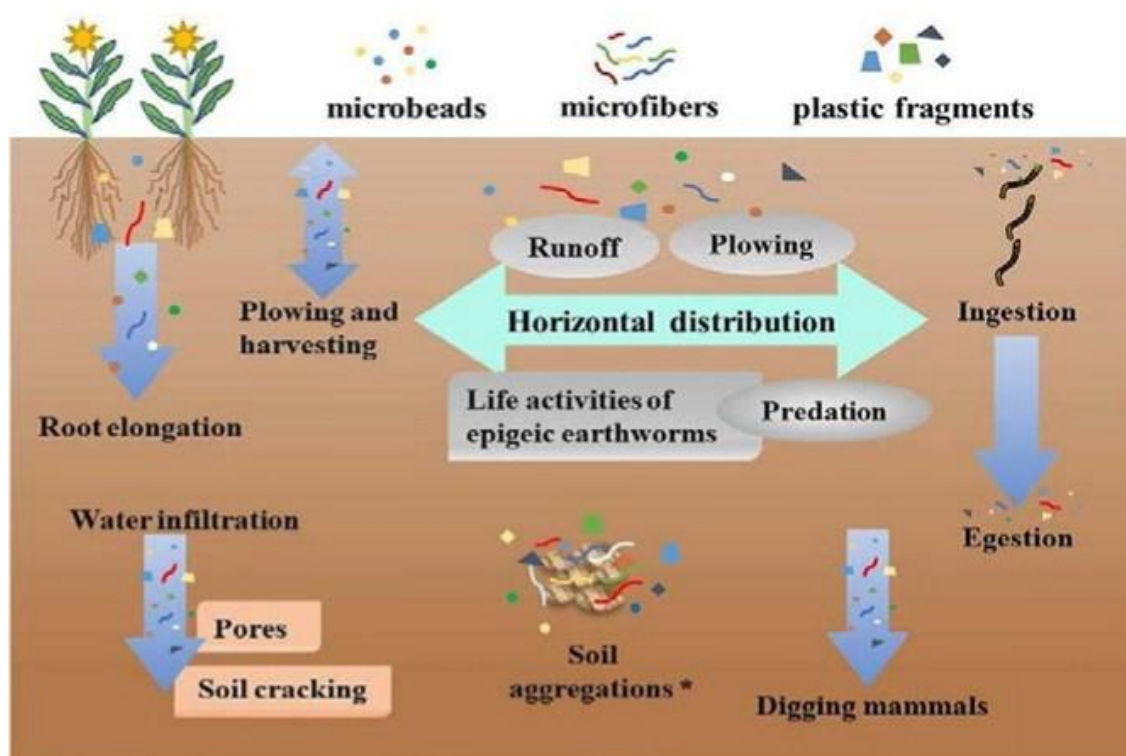


Figure 6: Schéma montrant les facteurs qui affectent la distribution et la migration des microplastiques dans le profil du sol (Yu et al., 2022)

Les microplastiques présents dans le sol subissent des modifications de la structure chimique des molécules de polymère, notamment la rupture et la disproportion des liaisons moléculaires, sous l'effet de l'usure mécanique, de l'oxydation à haute température, du rayonnement ultraviolet et de la biodégradation, et finissent par devenir des microplastiques dont le diamètre des particules est plus petit, voire des nanoplastiques (Cooper et Corcoran, 2010 ; Krueger et al., 2015).

Le principal mode de dégradation des microplastiques dans le sol est la biodégradation, mais les effets de l'environnement du sol, du broyage mécanique, de l'oxydation à haute température et du rayonnement ultraviolet sont limités. Les microplastiques se dégradent à un rythme très lent dans le sol (Cooper et Corcoran, 2010 ; Krueger et al., 2015).

Par ailleurs, les fragments du film plastique agricole, PE sont difficiles à dégrader dans le sol des terres agricoles et peuvent être conservés pendant plusieurs années, voire des décennies, formant finalement de petits résidus de microplastique et un environnement relativement stable (Briassoulis et al., 2015).

Les microplastiques migrent horizontalement grâce à la force du vent et verticalement par l'effet des précipitations pluviales dans le sol. Ils peuvent ensuite pénétrer dans les masses d'eau et les eaux souterraines par l'érosion et l'écoulement du sol (**Luo et al., 2018**)

Aussi, Le site d'activités des animaux dans le sol et la croissance des racines des plantes favorisent la migration horizontale et verticale des microplastiques (**Lian et al., 2019**)

III.2.Le processus d'accumulation des microplastiques

Les propriétés physiques (obstruction...) et chimiques du sol influent sur l'accumulation des microplastiques, dont leur taux de rétention est directement proportionnel à la teneur en oxydes de Fe ou d'Al (**Luo et al., 2018**)

En raison de la faible oxydation et de l'effet de protection contre la lumière, l'efficacité de la dégradation des microplastiques dans l'environnement du sol est faible et le temps résiduel est long (**Luo et al., 2018**)

III.3.Processus d'altération et de dégradation des microplastiques

L'accumulation à long terme de microplastiques dans le sol est inévitablement altérée et dégradée ; fait que leur surface vieillit progressivement et se fissure en nanoplastiques, ce qui accroît leur mobilité dans l'environnement (**Lian et al., 2019**)

La dégradation due aux intempéries modifie leur morphologie, formant de nombreux radicaux libres persistants et de l'oxygène actif à la surface, dont les micro-organismes jouent un rôle important. Les bactéries dégradant le polyéthylène (PE) ont fait l'objet d'une grande attention particulière (**Lian et al., 2019**)

L'hydrolase et l'oxydoréductase produites par les microorganismes accélèrent la dégradation du PE. De plus, l'application d'engrais azotés et phosphorés peut améliorer la fertilité du sol et modifier la vitalité des microorganismes telluriques, favorisant ainsi la dégradation des microplastiques (**Zhang et al., 2019**)

VI. Evaluation de la dégradation des matières plastiques

Les approches rapportées pour l'analyse de la dégradation des plastiques peuvent être regroupées en méthodes associées à l'évaluation de l'élimination des petites molécules, les méthodes qui évaluent les changements chimiques (hydrophobie, groupes fonctionnels) dans la structure du polymère, et les méthodes qui enregistrent les propriétés physiques des

matériaux (résistance à la traction, morphologie de surface, cristallinité, etc.) (**Baba et al., 2015**)

La modification de la surface des polymères pendant la dégradation peut être détectée avec la microscopie électronique à balayage (SEM) et la microscopie à force atomique (AFM) (**Arau'jo et al., 2010 ; Vierja et al., 2013**)

Ces méthodes permettent de visualiser directement les changements topographiques de la surface du polymère, comme la formation de trous et de fissures, l'augmentation de la rugosité, ou même l'attachement de microbes à la surface (**Mu'LLer et al., 2005**)

V. Les moyens de lutte contre la pollution de plastique

V.1.Diversité de la dégradation des polymères

Les organismes vivants sont impliqués dans la dégradation des matières plastiques, et par conséquent la forme recyclée retourne dans l'environnement (**Kumar et al., 2011 ; Chandra et Rustgi, 1998**).

Le plastique peut être réduit de manière écologique avec l'aide des bactéries telluriques et d'une disponibilité adéquate de l'eau. La décomposition du polymère dépend de sa composition chimique, qui favorise la croissance des micro-organismes sous la forme de sources de nutriments (**Kumar et al., 2011**).

Le polymère à base d'amidon est favorable à l'attaque microbienne, et les enzymes hydrolytiques agissent sur la matrice polymère pour en réduire le poids. Le polymère fabriqué à partir d'amidon ou de fibre de lin présente une plus grande biodégradabilité par rapport à d'autres polymères synthétiques. Les micro-organismes jouent également un rôle important dans la dégradation des polymères à base de pétrole comme les polyoléfines (**Kumar et al., 2011 ; Sen et Raut, 2015**).

Les technologies émergentes sont continuellement impliquées dans l'amélioration du traitement des biopolymères en utilisant un additif (benzophénone) pendant leur construction qui jouent un rôle important dans le processus chimique pendant la photodégradation (**Augusta et al., 1993 ; Kumar et al., 2011**).

De tels amendements affectent leur sensibilité thermique et leurs capacités d'absorption des UV. Les polymères chimiquement sensibles ont un meilleur taux de biodégradabilité que les autres polymères. De même, la sensibilité thermique, et l'exposition est également

impliquée dans la décomposition d'un polymère en formes plus simples qui augmentent la disponibilité des micro-organismes (**Singh et Sharma, 2008**).

Le nodax est de nature alcaline et entraîne généralement un changement structurel du polymère (**Augusta et al., 1993 ; Kumar et al., 2011**).

Les ressources renouvelables sont également utilisées dans la formation de matériaux biodégradables. Les composés d'origine animale et végétale sont sensibles à la dégradation microbienne (**Schink et al., 1992**).

En effet, le développement de matériaux biosourcés est bénéfique pour la durabilité de notre environnement, la réduction des émissions de gaz à effet de serre, etc. (**Xie et al., 2009**). La pratique de fabrication de ce type de matériau joue un rôle important dans l'environnement en réduisant la quantité de déchets polymères mis en décharge (**Leja et Lewandowicz, 2010**).

La dégradation anaérobie est une autre façon d'éliminer les matières plastiques par la mise en décharge (**Schink et al., 1992 ; Shah et al., 2008b**).

Mais, Elle libère des gaz à effet de serre (méthane), ce qui accroît le réchauffement de la planète. Les conditions aérobies sont essentielles pour la dégradation fongique, tandis que la dégradation bactérienne se déroule aussi bien dans des conditions aérobies qu'anaérobies (**Chandra et Rustgi, 1998 ; Kumar et al., 2011**).

V.2. Développement de la législation associée aux pollutions plastique

La **figure 7** fournit un aperçu historique résumant le développement et la production des polymères synthétiques et des biopolymères, ainsi que l'émergence de préoccupations liées à l'environnement, à la faune et à la santé humaine (**Thompson et al., 2009**)

Des mesures réglementaires ont été introduites depuis les années 1990 pour s'attaquer au problème du plastique dans la société. L'interdiction par la Food and Drug Administration (FDA) américaine du produit chimique (FDA) de la substance chimique bisphénol A (BPA) dans les biberons et les tasses à bec (**Starbucks, 2018**).

Un autre exemple est la taxation ou l'interdiction des sacs plastiques à usage unique dans plusieurs villes américaines (par exemple, Boston, San Francisco, Seattle). Des efforts sont également en cours pour interdire les pailles en plastique (**Starbucks, 2018**).

Starbucks, par exemple, prévoit d'éliminer plus d'un milliard de pailles en plastique par an de ses 28 000 magasins d'ici 2020 (Starbucks, 2018).

Il est de plus en plus évident que les microplastiques, sont les plus dangereux et détectables dans nos aliments et nos boissons (Liebezeit, 2014 ; Barboza et al., 2018 ; Karami et al., 2018 ; Kosuth et al., 2018).

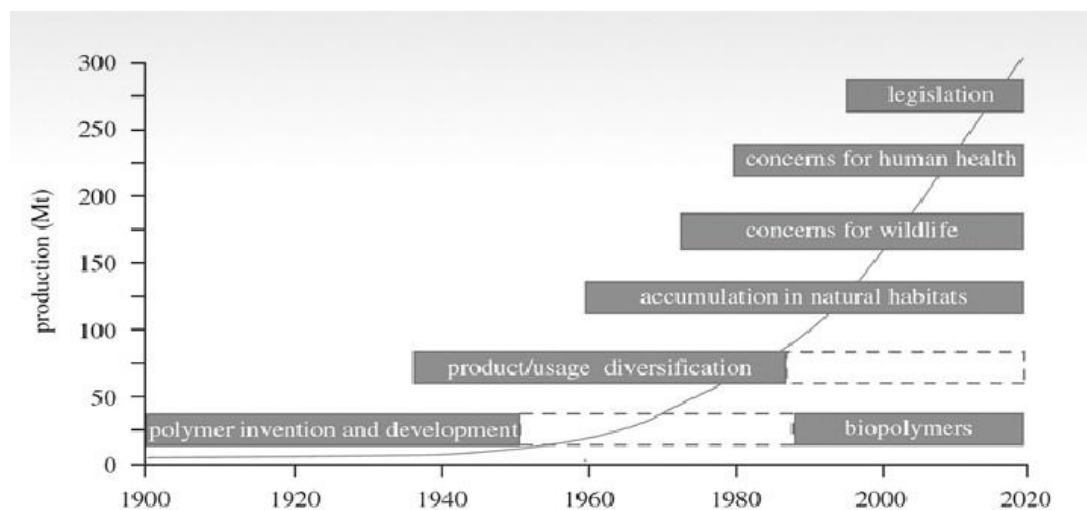


Figure 7 : étapes historiques du développement, de la production et de l'utilisation des plastiques avec la préoccupation et législation associées (Thompson et al., 2009)

V.3. Atténuation de la pollution plastique

Que pouvons-nous faire contre la pollution plastique agricole ? A récente publication de la Banque mondiale décrit cinq stratégies d'atténuation : recyclage, valorisation énergétique des déchets, plastiques biodégradables, l'innovation en matière de produits et de processus, et l'amélioration de la collecte et la gestion des déchets (tableau 6).

Certaines stratégies présentent des défis importants. Par exemple, débarrasser les plastiques agricoles de la saleté, de l'humidité, des graines de mauvaises herbes, des résidus toxiques avant le recyclage peut prendre du temps et être financièrement lourd (Cassou, 2018).

La valorisation énergétique des déchets confrontés à des défis de collecte en amont. Les plastiques biodégradables peuvent ne pas se décomposer complètement in situ et nécessitent donc des installations de compostage spéciales. Enfin, la gestion efficace des déchets peut être entravée par les faibles taux de collecte des plastiques dans certaines régions (Cassou, 2018).

Les bioplastiques représentent actuellement un très faible pourcentage (moins de 10 %) de la production totale de plastiques, des 400 millions de tonnes de plastiques produits chaque année ; Cependant, on prévoit que cette industrie connaîtra une croissance importante au cours des cinq prochaines années (**Européen Bioplastiques, 2018**).

Les principales applications des plastiques biodégradables, en particulier, sont les emballages alimentaires, les articles de restauration et les articles de shopping. Ce que vous ne savez peut-être pas, c'est que les plastiques biodégradables sont en train de trouver leur place dans l'agriculture, sous la forme d'engrais biologiques (**Cassou, 2018**)

Tableau 6: Stratégies et exemples de réduction de la pollution de plastique dans l'agriculture (**Cassou, 2018**)

Stratégie d'atténuation	Exemple
Recyclage	Société de recyclage accepte les sacs d'ensilage, les films de paillage et les conteneurs de pesticides
Valorisation énergétique des déchets	Incinération des plastiques non recyclables
Innovation en matière de produits	Processus structure de serre plus durable
Amélioration de la collecte et des déchets	Fermeture des sites de décharge près de l'eau
Gestion	Moyen

V.4.Prévention et contrôle

La réduction de l'utilisation et du rejet des produits plastiques à la source est un moyen important de contrôler l'accumulation des microplastiques dans l'environnement du sol. Les pays européens et américains ont promulgué des législations et des règlements pour contrôler l'origine des produits plastiques. (**Yu et al.,2022**).

En 2015, le Programme des Nations Unies pour l'environnement Programme a recommandé que les microbilles de plastique soient progressivement éliminées et interdites dans les produits de soins personnels et les cosmétiques dans les pays et régions du monde. Les microbilles de plastique ont été inscrites sur la liste des substances toxiques par le

gouvernement fédéral canadien en 2016, et le " Règlement sur les microbilles de plastique dans les cosmétiques" a été publié. **(Yu et al., 2022).**

L'Italie a proposé une interdiction de l'utilisation des cotons-tiges non biodégradables et non compostables à partir de 2019. Depuis 2020, tous les cosmétiques contenant des billes de plastique (y compris les médicaments en vente libre et les produits de santé naturels) contenant des microbilles de plastique ont été interdits. **(Yu et al., 2022).**

Cependant, les lois actuelles visant à prévenir et contrôler la pollution microplastique des sols ne sont pas parfaites. Les réglementations pertinentes sont trop larges et difficiles à mettre en œuvre. Les droits et les responsabilités sont ambigus et difficiles à appeler. **(Yu et al., 2022)**

Conclusion Générale

Peu d'études récentes ont montré que les microplastiques dans les environnements terrestres sont très dispersés, ce qui suggère que certains peuvent pénétrer dans les couches plus profondes du sol et éventuellement dans le système souterrain. Ce fait implique la possibilité que leur présence dans les eaux souterraines soit fortement corrélée avec le sol.

Cette étude était utile pour éclaircir les impacts des microplastiques dans l'environnement terrestre et souterrain en présentant de manière logique et complète des questions, telles que l'origine des microplastiques dans les sols et les eaux souterraines, leurs formes dominantes, et les stratégies d'atténuation durable des microplastiques dans les sols et les eaux souterraines au niveau mondial.

En outre, les différents sous-produits de dégradation peuvent inclure des molécules plus grosses, ainsi que des plastiques de taille microscopique et nanométrique des plastiques dont la biodisponibilité est accrue et qui peuvent avoir des impacts négatifs potentiels sur les écosystèmes tout au long du réseau alimentaire.

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour mieux comprendre les mécanismes de dégradation des polymères dans diverses conditions environnementales.

Compte tenu de la longue durée de vie des plastiques, les méthodes permettant d'utiliser les résultats expérimentaux à court terme pour prédire les voies de dégradation à long terme et des méthodes de simulation de la dégradation.

En raison de la complexité de l'environnement du sol et du manque d'uniformité dans les méthodes de détection et d'identification des microplastiques, leurs propriétés chimiques demeurent inconnues.

Les micro-organismes sont capables de dégrader des matières inorganiques et organiques, et l'étude des microbes pour leur capacité à dégrader les polymères plastiques a suscité un intérêt certain. *P. aeruginosa*, *P. stutzeri*, *S. badius*, *S. setonii*, *R. ruber*, *C.acidovorans*, *C. thermocellum* et *B.fibrisolvens* sont les principales espèces bactériennes associées à la dégradation des polymères car ont la capacité de dégradent le plastique dans le sol.

Références Bibliographiques

1. **Ahmad A, Stevenson M, Blaschke AP** (2020) Microplastics: are they really a threat to groundwater systems? In: EGU general assembly 2020. Available via. <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-9069.html>. 13 May 2021
2. **Albertsson A-C, Karlsson S** (1990) The Influence Biotic and Abiotic Environments on the Degradation of Polyethylene. *Prog.Polym. Sci.* 1990, 15 (2), 177–192of
3. **Al-Salem SM et al Al-Hazza'a, A Karam, HJ Al-Wadi, MH Al-Dhafeeri, A.T**(2019) Thermal response and degressive reaction study of oxobiodegradable plastic products exposed to various degradation media. *International Journal of Polymer Science*, 9612813, 2019.
4. **Araújo MA, Cunha A M, Mota M** (2010) Changes on Surface Morphology of Corn Starch Blend Films. *J. Biomed. Mater. Res., Part A* 2010, 94, 720–729.
5. **Andrady, A. L.** Microplastics in the Marine Environment. *Mar. Pollut. Bull.* 2011, 62 (8), 1596–1605.
6. **Arthur E, Moldrup P, Holmstrup M, Schjøning P, Winding A, Mayer P, de Jonge LW** (2012): Soil microbial and physical properties and their relations along a steep copper gradient. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 159: 9–18.
7. **Arutchelvi J, Sudhakar M, Arkatkar A, Doble M, Bhaduri S, Uppara PV** (2008) Biodegradation of polyethylene and polypropylene. *Ind J Biotechnol*7(1):9–22
8. **Asif M, Nadeem MA, Aziz A, Safdar ME, Adnan M, Ali A, Ullah N, Akhtar N, Abbas B** (2020) Mulching improves weeds management, soil carbon and productivity of spring planted maize (*Zea mays L.*). *Int J Botany Stud* 5: 57–61. associated with biodegradation of plastics. *J Polym Environ*
9. **Asli S, Neumann PM** 0(2009): Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant, Cell and Environment*, 32: 577–584.
10. **Augusta J, Muller RJ, Widdecke H** (1993) A rapid evaluation plate-test for the biodegradability of plastics. *Appl Microbiol Biotechnol* 3:673–678
11. **Averous L, Pollet E** (2012) Biodegradable polymers. *Environ Sil Nano Biol Gre Energy Technol*: 13–39

12. **Babul RP, O'Connor K, Seeram R** (2013) Current progress on bio-based polymers and their future trends. *Prog Biomater* 2(8):1–16 bacteria. *Commun Curr Res Educ Top Trends Appl Microbiol* 1:295–307
13. **Bakir A, Rowland SJ, Thompson RC** (2014) Transport of persistent organic pollutants by microplastics in estuarine conditions *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 140: 14–21
14. **Barboza LGA AD, Vethaak BRB O, Lavorante A K, Lundebye and L Guilhermino** (2018) Marine microplastic debris: An emerging issue for food security, food safety and human health. *Marine Pollution Bulletin* 133: 336–348.
15. **Barlaz MA, Ham RK, Schaefer DM** (1989) Mass-balance analysis of anaerobically decomposed refuse. *J Environ Eng* 115(6):1088–1102
16. **Bhardwaj H, Gupta R, Tiwari A** (2012a) Microbial population associated with plastic degradation. *Sci Rep* 1(2):1–4
17. **Bhardwaj H, Gupta R, Tiwari A** (2012b) Communities of microbial enzymes associated with biodegradation of plastics. *J Polym Environ* 21(2):575–579
18. **Bhatnagar S, Kumari R** (2013) Bioremediation: a sustainable tool for environmental management—a review. *Ann Rev Res Biol* 3(4):974–993 biodegradability of poly (ethylene succinate)/poly (ϵ -caprolactone) Biosynthesis, biodegradation, and application of poly (3-hydroxybutyrate) and its copolymers-natural polyesters produced by diazotrophic
19. **Bläsing M, Amelung W** (2018) Plastics in soil: analytical methods and possible sources. *Science of The Total Environment*, 612: 422–435. block copolymers. *Polymers* 43(20):5405–5415
20. **Bloomberg News** (2017) Plastic film covering 12% of China's farmland pollutes soil. September 5. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-09-05/plastic-film-covering-12-of-china-s-farmland-and-contaminates-soil>. Accessed 15 May 2018
21. **Blouzard JC, Bourgeois C, De Philip P, Valette O, Bélaïch A, Tardif C, Belaïch JP, Pagès S** (2007) Enzyme diversity of the cellulolytic system produced by *Clostridium cellulolyticum* explored by two-dimensional analysis: identification of seven genes encoding new dockerin-containing proteins. *J Bact* 189(6):2300–2309
22. **Bode HB, Zeeck A, Plückerhahn K, Jendrossek D** (2000) Physiological and chemical investigations into microbial degradation of synthetic poly (cis-1,4-isoprene). *Appl Environ Microbiol* 66(9):3680–3685

23. **Bonartsev AP, Myshkina VL, Nikolaeva DA, Furina EK, Makhina TA, Livshits VA, Boskhomdzhiyev AP, Ivanov EA, Iordanskii AL, Bonartseva GA** (2007) Biosynthesis, biodegradation, and application of poly (3-hydroxybutyrate) and its copolymers-natural polyesters produced by diazotrophic bacteria. *Commun Curr Res Educ Top Trends Appl Microbiol* 1:295–307
24. **Briassoulis D, Babou E, Hiskakis M, Kyrikou I**, (2015) Analysis of long-term degradation behaviour of polyethylene mulching films with pro-oxidants under real cultivation and soil burial conditions. *Environmental Science and Pollution Research International*, 22: 2584–2598.
25. **Brodhagen M, jr, Goldberger DG, Hayes DA, Inglis TL, Marsh and C Miles**(2017) Policy considerations for limiting unintended residual plastic in agricultural soils. *Environmental Science & Policy* 69: 81–84.
26. **Brune A, Frenzel P, Cypionka H** (2000) Life at the oxic–anoxic interface: microbial activities and adaptations. *FEMS Microbiol Rev* 24(5):691–710 by copolymerization of carbon dioxide and epoxide: synthesis and Cambridge University Press: Cambridge, 1988
27. **Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A.** (2013): Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*, 58: 216–234
28. **Cao DD, Wang X, Luo XX, Liu GC, Zheng H.** (2017): Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 61: 012148
29. **Carrier M, Serani AL, Absalon C, Aymonier C, Mench M** (2012) Degradation pathways of holocellulose, lignin and a-cellulose from *Pteris vittata* fronds in sub- and super critical conditions. *Biomass Bioenergy* 43:65–71
30. **Carvalho F, Duarte LC, Girio FM** (2008) Hemicellulose biorefineries: a review on biomass pretreatments. *J Sci Ind Res* 67:849–864
31. **Cassou, E**(2018) Agricultural pollution: Plastics. Washington, DC: World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/29505> . Accessed 23 May 2018.

32. **Chahal PS, Chahal DS, André G** (1992) Cellulase production profile of *Trichoderma reesei* on different cellulosic substrates at various pH levels. *J Ferment Bioeng* 74(2):126–128
33. **Chandra R, Rustgi R** (1998) Biodegradable polymers. *Perg* 23:1273–1335
34. **Chen Y L, Sun Ke, Han L F, et al.**(2020) Separation, Identification, and Quantification Methods in Soil
35. **Cherif H, Ayari F, Ouzari H, Marzorati M, Brusetti L, Jedidi N, Hassen A, Daffonchio D** (2009): Effects of municipal solid waste compost, farmyard manure and chemical fertilizers on wheat growth, soil composition and soil bacterial characteristics under Tunisian arid climate. *European Journal of Soil Biology*, 45: 138–145.
36. **Chrissafis K, Paraskevopoulos KM, Bikiaris DN** (2005) Thermal degradation mechanism of poly (ethylene succinate) and poly (butylene succinate): comparative study. *Thermochim Act* 43(2):142–150
37. **Chrissafis K, Paraskevopoulos KM, Bikiaris DN** (2006) Effect of molecular weight content polypropylene copolymer with and without nucleating agents. *Chem J Polym Sci* 12(3):246–255
38. **Cooper DA, Corcoran PL** (2010): Effects of mechanical and chemical processes on the degradation of plastic beach debris on the island of Kauai, Hawaii. *Marine Pollution Bulletin*, 60: 650–654
39. **Credit Suisse**, Plastic pollution. Time to tackle the problem with new business ideas, 25 June 2019. See at the URL: <https://www.creditsuisse.com/about-us-news/en/articles/news-and-expertise/plastic-pollution-time-to-tackle-the-problem-with-new-business-201906.html>
40. **Dąbrowska A** (2021) Microplastics pollution. *Applied water science* volume 1: fundamentals and applications. Wiley, Scrivener, pp 125–137.
41. **Datta A** (2007) M.Sc. Thesis. B.E. University of Pune, Pune degradation of cellulose. *Biotechnol Biofuel* 5(45):1–12
42. **De Souza Machado AA, Kloas W, Zarfl C, Hempel S, Rillig MC** (2018): Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24: 1405–1416.
43. **De Souza Machado AA, Lau CW, Kloas W, Bergmann J, Bachelier JB, Faltin E, Becker R., Görlich A.S., Rillig M.C.** (2019): Microplastics can change soil

- properties and affect plant performance. *Environmental Science and Technology*, 53: 6044–6052.
44. **Dey U, Mondal NK, Das K, Dutta S** (2012) An approach to polymer degradation through microbes. *J Pharm* 2(3):385–388 dicarbonates. *Molecules* 15:3661–3682
45. **Ding L, Zhang S, Wang X, Yang X, Zhang C, Qi Y, Guo X** (2020) The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in northwestern China. *Sci Total Environ* 720:137525 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137525>
46. **Driedger A GJ, Dürr HH, Mitchell K, Van Cappellen P** (2015) Plastic debris in the Laurentian Great Lakes: a review. *Journal of Great Lakes Research*, 41: 9–19.
47. **Dris R, Imhof H, Sanchez W, Gasperi J, Galgani F, Tassin B, Laforsch C**(2015) Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro-)plastic particles. *Environmental Chemistry*, 12: 539–550
48. **Dris R, Gasperi J, Saad M, Mirande-Bret C, Tassin B**(2016) Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104: 01251430.
49. **Dussud C, Ghiglione JF** (2014) Bacterial degradation of synthetic plastics. In *CIESM Workshop Monogr* (N°. 46)
50. **Eerkes Medrano D, Thompson RC, Aldridge DC** (2015) Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Research*, 75: 63–82.
51. **Eid EM, Alrumman SA, El-Bebany AF, Fawy KF, Taher MA, Hesham AE, Ahmed MT** (2019) Evaluation of the potential of sewage sludge as a valuable fertilizer for wheat (*Triticum aestivum* L.) crops. *Environ Sci Pollut Res* 26:392–401. *Energy Technol*: 13–39
52. **EriksenM** (2017) *Junk raft: An ocean voyage and a rising tide of activism to fight plastic pollution*. Boston: Beacon Press. *European Bioplastics*. 2018. *Bioplastics: Facts and figures*.. Accessed 15 May 2018.
- a. ether and nylon-6 block co polymer. *Polym Bull* 17:423–430
53. **European Commission**, Final Report: Study to provide information supplementing the study on the impact of the use of “oxo degradable” plastic on the environment, 2017.

- a. exhibiting near-equilibrium melting temperature. *J Appl Polym Sci* 40361:1–8
- b. for today's crucial needs. *Crit Rev Pharm Sci* 3(1):1–70
54. **Free CM, Jensen OP, Mason SA, Eriksen M, Williamson NJ, Boldgiv B** (2014) High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake. *Marine Pollution Bulletin*, 85: 156–163.
55. **Franckx L** (2010) Assessment of the options to improve the management of bio-waste in the European Union. Brussel, European Commission Directorate-General Environment
56. **Freinkel S** (2011) *Plastic A toxic love story*. Boston: Houghton Mifflin Harcourt
57. **Frias JP, Nash R** (2019) Microplastics: finding a consensus on the definition. *Mar Pollut Bull* 138:145–147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- Gajanand E, Soni LK, Dixit VK (2014) Biodegradable polymers: a smart strategy for today's crucial needs. *Crit Rev Pharm Sci* 3(1):1–70
58. **Gallert C, Winter J** (2005) Bacterial metabolism in wastewater treatment systems. Wiley-VCH, Weinheim, pp 1–48
59. **Gao HH, Yan CR, Liu Q, Ding WL, Chen BQ, Li Z** (2019) Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: a meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 651: 484–492. *Geosynthetics by Outdoor Exposure and Laboratory Weatherometer*. *Geotext. Geomembr.* 2003, 21 (2), 111–122.
60. **Gewert BP, Lassmann MM, MacLeod MP** (2015) Pathways for Degradation of Plastic Polymers Floating in the Marine Environment. *Environ. Sci. Process. Impacts* 2015, 17 (9), 1513–1521.
61. **Geyer R, Jambeck JR, Law KL** (2017) Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3: 1700782.
62. **Gaiimo C** (2016) Stone Age, Bronze Age ... Plastic Age? The race to define out epoch. *Atlas Obscura*. January 13. <https://www.atlasobscura.com/articles/stone-age-bronze-age-plastic-age-the-race-to-define-our-epoch>. Accessed 9 May 2018.
63. **Girvan MS, Bullimore J, Pretty JN, Osborn AM, Ball AS** (2003) Soil type is the primary determinant of the composition of the total and active bacterial communities in arable soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 69: 1800–1809

64. **Giudicianni P, Cardone G, Ragucci R** (2013) Cellulose, hemicellulose and lignin slow steam pyrolysis: thermal decomposition of biomass components mixtures. *J Anal Appl Pyrolysis* 100:213–222
65. **Goldberg S** (2018) The plastic apocalypse. *National Geographic* June: 6.
66. **Grassie N, Scott G** (1988) *Polymer Degradation and Stabilisation*; Cambridge University Press: Cambridge, 1988
67. **Grover A, Gupta A, Chandra S, Kumari A, Khurana SP** (2015) Polythene and environment. *Int J Environ Sci* 5(6):1091–1105
68. **Grossman E** (2015) The biggest source of plastic trash you've never heard of. *Ensi*. March 30. <https://ensia.com/features/the-biggest-source-of-plastic-trash-youve-never-heard-of/>. Accessed 8 May 2018
69. **GU JD** (2003) Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: recent research advances. *Int Biodeterior Biodegrad* 52(2):69–91
70. **GU JD, Mitchell R** (2006) *Biodeterioration. "The Prokaryotes"*. Springer, New York, pp 864–903
71. **Guo XY, Wang XL, Zhou XZ, Kong XZ, Tao S, Xing BS** (2012) Sorption of four hydrophobic organic compounds by three chemically distinct polymers: role of chemical and physical composition. *Environmental Science and Technology*, 46: 7252–7259.
72. **Hadad D, Geresh S, Sivan A** (2005) Biodegradation of polyethylene by the thermophilic bacterium *Brevibacillus borstelensis*. *J Appl Microbiol* 98(5):1093–1100
73. **Hall JE** (1995): Sewage sludge production, treatment and disposal in the European Union. *Water and Environment Journal*, 9: 335–343.
74. **Hartman N, Huffer T, Thompson RC, Hasselov M, Verschoor A, Daugaar AE, Rist S, Karlsson TK, Brennholt N, Cole M, Maria P, Herrling M, Hes M, Ivleva NP, Amy L, Lusher AL, Wagner M** (2019) Are we speaking the same language? Recommendations for a definition and categorization framework for plastic debris. *Sci Total Environ* 53:1039–1047. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05297>
75. **Hatakka A** (2005) *Biodegradation of lignin*. University of Helsinki, Viikki Biocenter, Helsinki, pp 129–145
76. **He D F, Luo Y M, Lu S B, et al** (2018) Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2018, 109:163-172.

77. **Hg E L** (2017) Plastic pollutants pervade water and land. *The Scientist*. June. <https://www.the-scientist.com/features/plastic-pollutants-pervade-water-and-land-31445>. Accessed 15 May 2018.
78. **Hodson M E, Duffus-Hodson C A, Clark A, et al** (2017) Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(8):4714-4721.
79. **Hopkins DW, Wheatley RE, Coakley CM, Daniell TJ, Mitchell SM, Newton AC, Neilson R** (2017) Soil carbon and nitrogen and barley yield responses to repeated additions of compost and slurry. *Journal of Agricultural Science*, 155: 141–155.
80. **Horn SJ, Kolstad GV, Westereng B, Eijsink VG** (2012) Novel enzymes for the degradation of cellulose. *Biotechnol Biofuel* 5(45):1–12 <https://ecostandard.org/wp-content/uploads/oxo-statement.pdf>.
81. **Horton AA, Walton A, Spurgeon DJ, Lahive E, Svendsen C** (2017) Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of The Total Environment*, 586: 127–141
82. **Huang Y, Liu Q, Jia W, Yan C, Wang J** (2020) Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environ Pollut* 260:114096.
83. **Huang YL, Li QB, Deng X, Lu YH, Liao XK, Hong MY, Wang Y** (2005) Aerobic and anaerobic biodegradation of polyethylene glycols using sludge microbes. *Process Biochem* 40(1):207–211
84. **Huerta Lwanga E, Gertsen H, Gooren H, Peters P, Salánki T, van der Ploeg M, Besseling E, Koelmans AA, Geissen V** (2017) Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*. *Environmental Pollution*, 220: 523–531.
- a. hydrolysis. *Makromol Chem* 183:2085–2092 in radiopolymerized hydrogels. *Resour Conserv Recycl* 27:309–332 industry. Regional technical meeting, fort Mitchell. *Soc Plas Eng*. <https://JAnalApplPyro> 110:130–137J *Therm Anal Calorim* 70:723–732.
85. **Hüffer T, Hofmann T** (2016) Sorption of non-polar organic compounds by micro-sized plastic particles in aqueous solution. *Environmental Pollution*, 214: 194–201

86. **Jeffrie TW** (1994) Biodegradation of lignin and hemicelluloses. *Biochem Microbiol Degrad*: 233–277
87. **Jirage AS, Baravkar VS, Kate VK, Payghan SA, Disouza JI** (2011) Poly- β -hydroxybutyrate: intriguing biopolymer in biomedical applications and pharma formulation trends. *Int J Pharm Biol Arch* 4(6):1107–1118
88. **Jonsson LJ, Martín C** (2016) Pretreatment of lignocellulose: formation of inhibitory by-products and strategies for minimizing their effects. *Bioresour Technol* 199:103–112
89. **Judy JD, Williams M, Gregg A, Oliver D, Kumar A, Kookana R, Kirby JK** (2019) Microplastics in municipal mixed-waste organic outputs induce minimal short to long-term toxicity in key terrestrial biota. *Environmental Pollution*, 252: 522–531.
90. **Kale SK, Deshmukh AG, Dudhare MS, Patil VB** (2015) Microbial degradation of plastic: a review. *J Biochem Technol* 6(2):952–961
91. **Kameshwar AKS, Qin W** (2016) Recent developments in using advanced sequencing technologies for the genomic studies of lignin and cellulose degrading microorganisms. *Int J Biol Sci* 12:156–171
92. **Karami A A, Golieskardi CK Choo, Vlarat S ,Karbalaie and B Salamatinia**(2018) Microplastic and mesoplastic contamination in canned sardines and sprats. *Science of the Total Environment*612: 1380–1386.
93. **Karimi K, Taherzadeh MJ** (2016) A critical review of analytical methods in pretreatment of lignocelluloses: composition, imaging, and crystallinity. *Bioresour Technol* 200:1008–1018
94. **Kasirajan S and M Ngouajio** (2012) Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32: 501–529.
95. **Kathiresan K** (2003) Polythene and plastics-degrading microbes from themangrove soil. *Rev Biol Trop* 51(3):629–634
96. **Katyal D, Kong E, Villanueva J** (2020) Microplastics in the environment: impact on human health and future mitigation strategies. *Environ Health Rev* 63:27–31. <https://doi.org/10.5864/ d2020-005>

97. **Kim LH, Kayhanian M, Stenstrom MK** (2004) Event mean concentration and loading of litter from highways during storms. *Science of The Total Environment*, 330: 101–113.
98. **Kim LH, Kang J, Kayhanian M, Gil KI, Stenstrom MK, Zoh KD** (2006) Characteristics of litter waste in highway storm runoff. *Water Science and Technology*, 53: 225–234.
99. **Kosuth M, SA Mason, and EV Wattenberg** (2018) Anthropogenic contamination of tap water, beer, and sea salt. *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194970>
100. **Krueger MC, Harms H, Schlosser D** (2015) Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99: 8857–8874.
101. **Kumar AA, Karthick K, Arumugam KP** (2011) Biodegradable polymers and its applications. *Int J Biosci Biochem Bioinform* 1(3):173–176
102. **L Tin Sin Bee, S Tueen** (1993) Degradation and Stability of Poly(Lactic Acid) In *Poly(lactic Acid: A Practical Guide for the Processing, Manufacturing, and Applications of PLA*, Second Edition, Elsevier, Amsterdam: 2019
103. **Lamont W J** (1993) Plastic mulches for the production of vegetable crops. *Horticultural Technology* 3 (1): 35–39.
104. **Lambert S, Scherer C, Wagner M** (2017) Ecotoxicity testing of microplastics: considering the heterogeneity of physicochemical properties. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 13: 470–475.
105. **Laskar N, Kumar U** (2019) Plastics and microplastics: a threat to environment. *Environ Technol Inno* 14:100352. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100352>
106. **Lei K, Qiao F, Liu Q, Wei Z, Qi H, Cui S, Yue X, Deng Y, An L** (2017) Microplastics releasing from personal care and cosmetic products in China. *Marine Pollution Bulletin*, 123: 122–126.
107. **Leja K, Lewandowicz G** (2010) Polymer biodegradation and biodegradable polymers—a review. *Pol J Environ Stud* 19(2):255–266
108. **Leschine SB** (1995) Cellulose degradation in anaerobic environments. *Annu Rev Microbiol* 49:399–426

109. **Li J, Zhang K, Zhang H** (2018) Adsorption of antibiotics on microplastics. *Environmental Pollution*, 237: 460–467.
110. **Li M, Yu H, Wang Y, Li J, Ma G, Wei X** (2020) QSPR models for predicting the adsorption capacity for microplastics of polyethylene, polypropylene and polystyrene. *Scientific Reports*, 10: 14597.
111. **Lian J P, Shen M M, Liu W T** (2019) Effects of microplastics on wheat seed germination and seedling growth [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(4): 737-745
112. **Liebezeit, G., and E. Liebezeit.** (2014) Synthetic particles as contaminants in German beers. *Food Additives & Contaminants: Part A31* (9): 1574–1578
113. Lin KH, Lin FW, Wu C, Chang YS (2019) Biostimulation of maize (*Zea mays*) and irrigation management improved crop growth and water use under controlled environment. *Agronomy* 9:559– 573
114. **Liu Q, Zhang H, Deng B, Zhao X** (2014) Poly (3-hydroxybutyrate) and poly (3 hydroxybutyrate -co-3-hydroxyvalerate): structure, property, and fiber. *Int J Polym Sci*: 1–11
115. **Li M, Yu H, Wang Y, Li J, Ma G, Wei X** (2020) QSPR models for predicting the adsorption capacity for microplastics of polyethylene, polypropylene and polystyrene. *Scientific Reports*, 10: 14597.
116. **Liu, EK, WQ He and C R Yan** (2014) ‘White revolution’ to ‘white pollution’—Agricultural plastic film mulch in China. *Environmental Research Letters* 9: 091001
117. **Lucas N, Bienaime C, Belloy C, Queneudec M ,Silvestre F, Nava-SaucedoJE**(2008) Polymer Biodegradation: Mechanisms and Estimation Techniques – A Review. *Chemosphere* 2008, 73 (4), 429– 442.
118. **Luo Y M, Zhou Q, Zhang H B, et al** (2018) Pay attention to research on microplastic pollution in soil for prevention of ecological and food chain risks[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(10):1021-1030.
119. **Ma X, Geiser Lee J, Deng Y, Kolmakov A** (2010) Interactions between engineered nanoparticles (ENPs) and plants: phytotoxicity, uptake and accumulation. *Science of the Total Environment*, 408: 3053–3061.

120. **Majewsky M, Bitter H, Eiche E, Horn H** (2016) Determination of microplastic polyethylene (PE) and polypropylene (PP) in environmental samples using thermal analysis (TGA-DSC). *Science of The Total Environment*, 568: 507–511
121. **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. *Environmental Science and Technology*, 35: 318–324.
122. **Malinowski R, Jiang G, Kowalczyk, M** (2016) Forensic Engineering of Advanced Polymeric Materials. Part III - Biodegradation of Thermoformed Rigid PLA Packaging under Industrial Composting Conditions. *Waste Manage.* 2016, 52, 69–76
123. **Mcalpine SR, Lindsley CW, Hodges JC, Leonard DM, Filzen GF** (2001) Determination of functional group distribution within rasta resins utilizing
124. **Mccallum TJ, Kontopoulou M, Park CB, Muliawan EB, Hatzikiriakos SG** (2007) the rheological and physical properties of linear and branched polypropylene blends. *Polym Eng Sci* 47:1133–1140 mechanism of poly (ethylene succinate) and poly (butylene succinate):
125. **Merrettig Bruns U, Jelen E** (2009) anaerobic biodegradation of detergent surfactants. *Material* 2(1):181–206
126. **Mintenig SM, Int Veen I, Löder MGJ, Primpke S, Gerdt G** (2017) Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research*, 108: 365–372.
127. **Mintenig SM, Löder MGJ, Primpke S, Gerdt G** (2019) Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of The Total Environment*, 648: 631–635.
128. **Mishra UN, Das S, Kandali R** (2020) Bioremediation of synthetic polymers: present and future prospects of plastic biodegradation. *Int J Curr Microbiol App Sci* 9:1234–1247. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.912.152>
- a. mixtures. *J Anal Appl Pyrolysis* 100:213–222
129. **MooreJ , and A Wszelaki** (2016) Plastic mulch in fruit and vegetable production: Challenges for disposal. Report No. FA-2016-02. https://ag.tennessee.edu/biodegradablenulch/Documents/Plastic_Mulch_in_Fruit_and_Vegetable_Production_12_20factsheet.pdf. Accessed 19 Sept 2018

130. **Moore C and C Phillips** (2011) *Plastic ocean*. New York: Penguin Group.
131. **Müller R J** (2005) *Biodegradability of Polymers : Regulations and Methods for Testing*. In *Biopolymers Online* ; Steinbüchel, A., Ed.; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, 2005. DOI: 10.1002/3527600035.bpola012.
132. **Murphy F, Ewins C, Carbonnier F, Quinn B.**(2016) Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science and Technology*, 50: 5800–5808. Musioł, M.; Sikorska, W.; Adamus, G.; Janeczek, H.; Richert, J.;
133. **Musioł M, Sikorska W, Adamus G, Janeczek H, Richert J, Malinowski R Jiang, G, Kowalczyk M** (2016) Forensic Engineering of Advanced Polymeric Materials. Part III - Biodegradation of Thermoformed Rigid PLA Packaging under Industrial Composting Conditions. *Waste Manage.* 2016, 52, 69–76
134. **Naeini SARM, Cook H F** (2000) Influence of municipal waste compost amendment on soil water and evaporation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31: 3147–3161.
135. **Naik RA, Rowles LS, Hossain AI, Yen M, Aldossary RM, Apul OG, Conkle J, Saleh NB** (2020) Microplastic particle versus fiber generation during photo-transformation in simulated seawater. *Sci Total Environ* 736:139690. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139690>
136. **Naqash N, Prakash S, Kapoor D, Singh R** (2020) Interaction of freshwater microplastic with biota and heavy metals: a review. *Environ Chem Lett* 18:1813–1824. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01044-3>
137. **Naveed M, Herath L, Moldrup P, Arthur E, Nicolaisen M, Norgaard T, Ferré Ty P A, de Jonge L W** (2016): Spatial variability of microbial richness and diversity and relationships with soil organic carbon, texture and structure across an agricultural field. *Applied Soil Ecology*, 103: 44–55
138. **Nerland IL, Halsband C, Allan I, Thomas KV** (2014). Microplastics in marine environments: occurrence, distribution and effects (Re.no.6754-2014). Norwegian Institute for Water Research, Oslo, pp 1–71. <http://www.miljodirektoratet.no/Documents/publikasjoner/M319/M319.pdf>. Accessed 31 Dec 2014
139. **New Plastics Economy Initiative of the Ellen MacArthur Foundation.** <https://ecostandard.org/wp-content/uploads/oxo-statement.pdf>.
140. **Nichols M** (1967) *the graduate*. Hollywood: Embassy Pictures.

141. **Nizzetto L, Futter M, Langaas S** (2016): Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science and Technology*, 50: 10777–10779
142. **Nova Institute, Bio based Building Blocks and Polymers, Hurth (Germany): Nurbas M, Kutsal T** (2004) Production of PHB and p (HB-co-HV) biopolymers by using *Alcaligenes eutrophus*. *Iran Polym J* 13(1):45–51
143. **Nwachkwu S, Obidi O, Odocha C** (2010) Occurrence and recalcitrance of polyethylene bag waste in nigerian soils. *Afr J Biotechnol* 9(37):6096–6104
- b. nylon 6, 6 copolymer. *Am Chem Soc*: 31–40
144. **O'Connor D, Pan S, Shen Z, Song Y, Jin Y, Wu WM, Hou D** (2019): Microplastics undergo accelerated vertical migration in sand soil due to small size and wet-dry cycles. *Environmental Pollution*, 249: 527–534. of alkylene and arylene diacetates with alkylene and arylene diphenyl of biodegradable castor oil based polyesters. *Polym Degrad Stab of cellulose wastes using bacterial and fungal cells immobilized in radiopolymerized hydrogels*. *Resour Conserv Recycl* 27:309–332
- c. of polycarbonates by melt phase interchange reaction of the function of substrate-binding domains. *Appl Environ Microbiol*
145. **Ohura T, Kasuya KI, Doi Y** (1999) Cloning and characterization of the polyhydroxybutyrate depolymerase gene of *Pseudomonas stutzeri* and analysis analysis of the function of substrate-binding domains. *Appl Environ Microbiol* 65(1):189–197
146. **Oxo Statement, New plastics economy**, 2017. www.european-bioplastics.org/over-150-organisations-back-call-to-ban-oxo-degradable-plastic-packaging/.
147. **Padervand M, Lichtfouse E, Robert D, Wang C** (2020) Removal of microplastics from the environment. *A Rev Environ Chem Lett* 18:807–828. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00983-1>
148. **Parker L** (2018) we made plastic. We depend on it. Now we're drowning in it. *National Geographic* June: 40–69 pathways of holocellulose, lignin and a-cellulose from *Pteris vittata* fronds in sub- and super critical conditions. *Biomass Bioenergy* 43:65–71
149. **Perez J, Dorada JM, Rubia TDL** (2002) Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicelluloses and lignin: an overview. *Int Microbiol* 5:53–63
150. **Perez LAB, Rodriguez DN, Rodriguez FJM, Hsiao B, Orta CAA, Sics I** (2014) Molecular weight and crystallization temperature effects on poly (ethylene

terephthalate) (PET) homopolymers, an isothermal crystallization analysis. *Polymers* 6:583–600

151. **Petre M, Zarnea G, Adrian P, Gheorghiu E** (1999) Biodegradation and bioconversion of cellulose wastes using bacterial and fungal cells immobilized in radiopolymerized hydrogels. *Resour Conserv Recycl* 27:309–332

152. **Pico Y, Barcelo D** (2019) Analysis and prevention of microplastics pollution in water: current perspectives and future directions. *ACS Omega* 4:6709–6719. <https://doi.org/10.1021/acscomega.9b00222>

153. **Plamondon and J Sinha**(2017) *Life without plastic*. Salem: Page Street Publishing Co. *plastics: a comprehensive review*. *Biotechnol Adv* 26(3):246–265

d. poly (ethylene succinate). *Thermochim Acta* 440(2):166–175 poly (ethylene succinate-co-ethylene adipate) copolymers. *Cryst Eng polycaprolactone in the 21st century*. *Prog Polym Sci*. doi:10.1016/j.Poly(lactic Acid: A Practical Guide for the Processing, Manufacturing, and Applications of PLA, Second Edition, Elsevier, Amsterdam: 2019.

e. *Polym Eng Sci* 43(11):1727–1739 polymers—a review. *Pol J Environ Stud* 19(2):255–266 polymers—a review. *Pol J Environ Stud* 19(2):255–266

154. **Premraj R, Doble M** (2005) Biodegradation of polymer. *Ind J Biotechnol* f.progpolymsci.2010.04.002 proteins. *Found Chem*. doi:10.1007/s10698-009-9078-5

155. **Qiu Z, Ikehara T, Nishi T** (2003) Crystallization behaviour of biodegradable poly (ethylene succinate) from the amorphous state. *Polymers* 44(18):5429–5437

156. **Rajmohan KV, Ramya C, Viswanathan MR, Varjani S** (2019) Plastic pollutants: effective waste management for pollution control and abatement. *Curr Opin Environ Sci Health* 12:72–84. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.08.006>

157. **Rameshwari R, Meenakshisundaram M** (2014) A review on downstream processing of bacterial thermoplastic-polyhydroxyalkanoate. *Int J PurifAppl Biosci* 2(2):68–80

158. **Restrepo Flórez JM, Bassi A, Thompson MR** (2014) Microbial degradation and deterioration of polyethylene—a review. *Int Biodeterior Biodegrad* 88:83–90

159. **Ribeiro F, O'Brien JW, Galloway T, Thomas KV** (2019) Accumulation and fate of nano-and micro-plastics and associated contaminants in organisms. *Trends Analyt Chem* 111:139–147. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.12.010>

160. **Rico CM, Majumdar S, Duarte Gardea M, PeraltaVidea JR, Gardea-Torresdey JL** (2011) Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59: 3485–3498
161. **Rillig MC** (2018) Microplastic disguising as soil carbon storage. *Environmental Science and Technology*, 52: 6079–6080.
162. **Rillig MC, Muller LAH, Lehmann A** (2017a) Soil aggregates as massively concurrent evolutionary incubators. *The ISME Journal*, 11: 1943–1948
g. RMIT University, Melbourne
163. **Rochman CM, Brookson C, Bikker J, Djuric N, Earn A, Bucci K, Athey S, Huntington A, McIlwraith H, Munno K, De FH, Kolomijec A, Erdle L, Grbic J, Bayoumi MS, Borrelle SB, Wu T, Santoro S, Werbowski LM, Zhu X, Giles RK, Hamilton BM, Thaysen CT, Kaura A, Klasios N, Ead L, Kim J, Sherlock C, HoA, Hung C** (2019) Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite. *Environ Toxicol Chem* 38(4):703–711. <https://doi.org/10.1002/etc.4371>
164. **RodriguezSeijo A, Lourenço J, Rocha Santos TAP, da Costa J, Duarte AC, Vala H, Pereira R** (2017) Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia andrei* Bouché. *Environmental Pollution*, 220: 495–503
165. **Rogers, H** (2005) A brief history of plastic. *Brooklyn Rail*. May 1 <https://brooklynrail.org/2005/05/express/a-brief-history-of-plastic>. Accessed 18 Sept 2018
166. **Sana SS, Dogiparthi LK, Gangadhar L, Chakravorty A, Abhishek N** (2020) Effects of microplastics and nanoplastics on marine environment and human health. *Environ Sci Pollut Res* 27:44743–44756. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10573-x>
167. **Sathiskumar PS, Madras G** (2011) Synthesis, characterization, degradation of biodegradable castor oil based polyesters. *Polym Degrad Stab* 96(9):1695–1704
168. **Schink B, Janssen PH, Frings J** (1992) Microbial degradation of natural and of new synthetic polymers. *FEMS Microbiol Rev* 103(2/4):311–316
169. **Seidensticker S, Grathwohl P, Lamprecht J, Zarfl C** (2018) A combined experimental and modeling study to evaluate pH-dependent sorption of polar and non-polar compounds to polyethylene and polystyrene microplastics. *Environmental Sciences Europe*, 30: 30

170. **Sen SK, Raut S** (2015) Microbial degradation of low density polyethylene (LDPE): a review. *J Environ Chem Eng* 3:462–473
- h. sequencing technologies for the genomic studies of lignin and cellulose degrading microorganisms. *Int J Biol Sci* 12:156–171
171. **Seretoudi G, Bikiaris D, Panayiotou C** (2002) Synthesis, characterization and biodegradability of poly (ethylene succinate)/poly (ϵ -caprolactone) block copolymers. *Polymers* 43(20):5405–5415
172. **Shah AA, Hasan F, Akhter JI, Hameed A, Ahmed S** (2008a) Degradation of polyurethane by novel bacterial consortium isolated from soil. *Anal Microbiol* 58(3):381–386
173. **Shah AA, Hasan F, Hameed A, Ahmed S** (2008b) Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnol Adv* 26(3):246–265
174. **Shahnawaz M, Sangale MK, Ade AB** (2019) Microplastics. Bioremediation technology for plastic waste. Springer, Singapore, pp11–19. https://doi.org/10.1007/978-981-13-7492-0_2
175. **Shamshina JL, Kelly A, Oldham T, Rogers RD** (2020) Agricultural uses of chitin polymers. *Environ Chem Lett* 18:53–60. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00934-5>
176. **Shanks R, Kong I** (2012) Thermoplastic elastomers, 137–154. Applied sciences. RMIT University, Melbourne
177. **Sharma S, Rafailovich MH, Sokolov J, Liu Y, Schwarz SA, Eisenberg A** (2000) Dewetting properties of polystyrene homopolymer thin films on grafted polystyrene brush surfaces. *High Perform Polym* 12:581–586
178. **Shen M, Song B, Zhu Y, Zeng G, Zhang Y, Yang Y, Wen X, Yi H** (2020b) Removal of microplastics via drinking water treatment: current knowledge and future directions. *Chemosphere* 251:126612. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126612>
179. **Shen XC, Li DC, Sima XF, Cheng HY, Jiang H** (2018) The effects of environmental conditions on the enrichment of antibiotics on microplastics in simulated natural water column. *Environmental Research*, 166: 377–383.
180. **Shimao M** (2001) Biodegradation of plastics. *Curr Opin Biotechnol* 12(3):242–247

181. **Singh A, Kaushal A, Garg S, Chawla N** (2017) Effect of different coloured plastic mulches on growth, yield and quality of drip fertigated bell pepper (*Capsicum annum* var. *grossum*). *Indian Journal of Horticulture*, 74: 292–294.
182. **Singh B, Sharma N** (2008) Mechanistic implications of plastic degradation. *Polym Degrad Stab* 93:561–584
183. **Sivan A** (2011) New perspectives in plastic biodegradation. *Curr Opin Biotechnol* 22:422–426
184. **Slater RA, Frederickson J** (2001) Composting municipal waste in the UK: some lessons from Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 32: 359–374
185. **Smith R** (2005) *Biodegradable polymers for industrial applications*. CRC Press, Boca Raton, pp 1–516
186. **Song JH, Murphy RJ, Narayan R, Davies GBH** (2009) Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philos Trans R Soc Biol* 364:2127–2139
187. **Souza WRD** (2013) *Microbial degradation of lignocellulosic biomass*. InTech, West Palm Beach, pp 207–247
188. **Starbucks** (2018) Starbucks to eliminate plastic straws globally by 2020. Press release. July 9. <https://news.starbucks.com/press-releases/starbucks-to-eliminate-plastic-straws-globally-by-2020>. Accessed 12 Sept 2018.
189. **Steinmetz ZC, Wollman M, Schaefer C, Buchmann J, David J, Tröger K Muñoz, O Frör, and GE Schaumann** (2016) Plastic mulching in agriculture: Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment* 550: 690–705.
190. **Stevens, E. S.** (2002). *Green plastics: An introduction to the new science of biodegradable plastics*. Princeton: Princeton University Press
191. **Su L, Xue Y, Li L, Yang D, Kolandhasamy P, Li D, Shi H** (2016) Microplastics in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 216: 711–719.
192. **Su Y, Zhang Z, Wu D, Zhan L, Shi H, Xie B** (2019) Occurrence of microplastics in landfill systems and their fate with landfill age. *Water Res* 164:114968. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.114968> succinate bioremediation during biostimulation. *FEMS Microbial Lett*

193. **Suits L D, Hsuan Y G** (2018) Assessing the Photo-Degradation of Geosynthetics by Outdoor Exposure and Laboratory Weatherometer. *Geotext. Geomembr.* 2003, 21 (2), 111–122.
194. **Sun M, Ye M, Jiao W, Feng Y, Yu P, Liu M, Jiao J, He X, Liu K, Zhao Y, Wu J, Jiang X, Hu F** (2018): Changes in tetracycline partitioning and bacteria/phage-mediated ARGs in microplastic-contaminated greenhouse soil facilitated by sophorolipid. *Journal of Hazardous Materials*, 345: 131–139
195. **Terry B** (2012) *Plastic free: How I kicked to plastic habit and how you can too.* New York: Skyhorse Publishing
196. **Teuten EL, Saquing JM, Knappe DRU, Barlaz MA, Jonsson S, Björn A, Rowland SJ, Thompson RC, Galloway TS, Yamashita R, Ochi D, Watanuki Y, Moore C, Viet PH, Tana TS, Prudente M, Boonyatumanond R, Zakaria MP, Akkhavong K, Ogata Y, Hirai H, Iwasa S, Mizukawa K, Hagino Y, Imamura Am, Saha M, Takada H** (2009) Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364: 0284.
197. **Thompson RCSH, Swan C J, Moore and FS vom Saal**(2009) Introduction: Our plastic age. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 364: 1973–1976.
198. **Transparency Market Research** (2013) *Agricultural films market for greenhouse, mulching and silage applications—Global industry analysis, size, share, growth, trends and forecast, 2013–2019.* <https://www.transparencymarketresearch.com/agricultural-film.html>. Accessed 8 May 2018
199. **Tribedi P, Sil AK** (2013b) Cell surface hydrophobicity: a key component in the degradation of polyethylene succinate by *Pseudomonas* sp. AKS2. *J Appl Microbiol* 116(2):295–303
200. **Tribedi P, Sil AK** (2013c) Founder effect uncovers a new axis in polyethylene succinate bioremediation during biostimulation. *FEMS Microbiol Lett* 346(2):113–120
201. **Upreti MC, Srivastava RB** (2003) A potential *Aspergillus* species for biodegradation of polymeric materials. *Curr Sci* 84(11):1399–1402
202. **VieyraH, Aguilar Méndez MA, San Martín Martínez E** (2013) Study of Biodegradation Evolution during Composting of Polyethylene-Starch Blends Using Scanning Electron Microscopy. *J. Appl. Polym. Sci.* 2013, 127 (2), 845–853.

203. **Wang J, Liu X, Li Y, Powell T, Wang X, Wang G, Zhang P** (2019a) Microplastics as contaminants in the soil environment: a minireview. *Sci Total Environ* 691:848–857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.209>
204. **Wang F, Shih KM, Li XY** (2015) The partition behavior of perfluorooctanesulfonate (PFOS) and perfluorooctanesulfonamide (FOSA) on microplastics. *Chemosphere*, 119: 841–847
205. **Wang Z C, Meng Q, Yu L H, et al** (2020) Occurrence characteristics of microplastics in farmland soil of Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(3):204-209.12(3):242–247
206. **Wang F, Zhang X, Zhang S, Zhang S, Sun Y** (2020a) Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere* 254:126791. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126791>
207. **Wang T, Li B, Zou X, Wang Y, Li Y, Xu Y, Mao L, Zhang C, Yu W** (2019b) Emission of primary microplastics in mainland China: invisible but not negligible. *Water Res* 162:214–224. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.042>
208. **Weng YX, Wang XL, Wang YZ** (2011) Biodegradation behavior of PHAs with different chemical structures under controlled composting conditions. *Polym Test* 30(4):372–380
209. **Werner K, Pommer L, Brostrom M** (2014) Thermal decomposition of hemicelluloses. *J Anal Appl Pyro* 110:130–137
210. **Willén A, Junestedt C, Rodhe L, Pell M, Jönsson H** (2017) Sewage sludge as fertiliser – environmental assessment of storage and land application options. *Water Science and Technology*, 75: 1034–1050
211. **Wong JK, Lee KK, Tang KH, Yap PS** (2020) Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: prevalence, fates, impacts and sustainable solutions. *Sci Total Environ* 719:137512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137512>
212. **Woodruff MA, Hutmacher DW** (2010) The return of a forgotten polymer– polycaprolactone in the 21st century. *Prog Polym Sci* doi:10.1016/j.progpolymsci.2010.04.002
213. **Wright SL, Kelly FJ** (2017): Plastic and human health: a micro issue? *Environmental Science and Technology*, 51: 6634–6647.

214. **Wu H, Qiu Z** (2012) Synthesis, crystallization kinetics and morphology of novel www.researchgate.net/publication/237644319
215. **Xie Y, Kohls D, Noda I, Schaefer DW, Yvonne A, Akpalu YA** (2009) Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) nanocomposites with optimal mechanical properties. *Polymers* 50:4656–4670
216. **Xu Q, Resch MG, Podkaminer K, Yang S, Baker JO, Donohoe BS, Wilson C, Klingeman DM, Olson DG, Giannone RJ, Hettich RL, Brown SD, Lynd LR, Bayer EA, Himmel ME, Bomble YJ** (2016) Dramatic performance of *Clostridium thermocellum* explained by its wide range of cellulose modalities. *Sci Adv* 2(e1501254):1–12
217. **Yang J, Li L Z, Zhou Q, et al** (2021) . Microplastics Contamination of Soil Environment: Sources, Processes and Risks[J]. *Acta Pedologica Sinica*, DOI: 10.11766/trxb202006090286
218. **Yurtsever M** (2019) Glitters as a source of primary microplastics:an approach to environmental responsibility and ethics. *JAgric Environ Ethics* 32:459–478. <https://doi.org/10.1007/s10806-019-09785-0>
219. **Zhan Z, Wang J, Peng J, Xie Q, Huang Y, Gao Y** (2016) Sorption of 3,3',4,4'-tetrachlorobiphenyl by microplastics: a case study of polypropylene. *Marine Pollution Bulletin*, 110: 559–563.
220. **Zhang B, Yang X, Chen L, Chao J, Teng J, Wang Q** (2020a) Microplastics in soils: a review of possible sources, analytical methods, and ecological impacts. *J Chem Technol Biotechnol* 95:2052–2068.<https://doi.org/10.1002/jctb.6334>
221. **Zhang J J, Chen Y H, Wang X X, et al** (2019) A Review of Microplastics in Soil Environment [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2020, DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200915.
222. **Zhang Y, Pu S, Lv X, Gao Y, Ge L** (2020c) Global trends and prospects in microplastics research: a bibliometric analysis. *J Hazard Mater* 400:123110. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123110>
223. **Zhao J, Ran W, Teng J, Liu Y, Liu H, Yin X, Cao R, Wang Q** (2018) Microplastic pollution in sediments from the Bohai Sea and the Yellow Sea, China. *Science of the Total Environment*, 640–641: 637–645
224. **Zheng Y, Yanful EK** (2005) A review of plastic waste biodegradation. *Crit Rev Biotechnol* 25:243–250

225. **Ziccardi LM, Edgington A, Hentz K, Kulacki KJ, Kane Driscoll S** (2016) Microplastics as vectors for bioaccumulation of hydrophobic organic chemicals in the marine environment: a state-of-the-science review. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35: 1667–1676
226. **Zubris KAV, Richards BK** (2005) Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environmental Pollution*, 138: 201–211