

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
UNIVERSITE de TLEMCEEN
كلية علوم الطبيعة و الحياة و علوم الأرض و الكون
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers

Département de Biologie

Laboratoire de Microbiologie Appliquée à l'Agroalimentaire, au Biomédical et à l'environnement (LAMAABE)

MEMOIRE

Présenté par

M^{lle} LARABI Hind Kheira et M^{lle} AYAD Soulaf

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Toxicologie industrielle et enviromentale

Thème

Toxicité du plastique et propositions des moyens naturels comme alternative de la lutte pour sa dégradation

Soutenu le 24 juin 2026 devant le jury composé de :

Président	M ^{me} HADDAM Nahida	professeur	Université de Tlemcen
Encadreur	M ^{me} BOUAYAD Allam Samira	MCB	Université de Tlemcen
Examineur	M ^{me} RAHAL Benguedda Meriem.W	MCA	Université de Tlemcen

Année universitaire 2025-2026



Remerciements



Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.



Nous adressons nos plus sincères remerciements à notre encadrante, Madame **BOUAYAD ALAM SAMIRA**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, sa patience et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.



Nous remercions également tous les enseignants du département d'Écologie et Environnement de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, pour leur engagement, leur professionnalisme et la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont transmis tout au long de notre parcours universitaire.



Nous remercions sincèrement Madame **RAHAL BENGUEDDA MERIEM WASSILA**, pour le temps qu'elle a consacré à l'évaluation de ce travail ainsi que pour ses observations constructives et enrichissantes.



Nous remercions également Madame **HADDAM NAHIDA**, présidente du jury, pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant de présider cette soutenance et pour l'intérêt qu'elle a porté à notre travail.



Nous adressons également nos remerciements à Mlle **BOUALI W.**, du laboratoire de microbiologie du département de biologie, pour sa collaboration et son aide apportée dans le cadre des travaux réalisés au laboratoire.



Nos sincères remerciements s'adressent également à M. **BENMANSOUR**, enseignant, pour sa contribution à l'extraction des huiles essentielles utilisées dans cette étude, notamment *Citrus limonum*, *Citrus sinensis* et *Eucalyptus radiata*.



Enfin, nous pensons avec reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail. Nous exprimons également notre profonde gratitude à nos familles et à nos proches pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce parcours.

Merci à tous.





Dédicace



Je dédie ce travail, fruit de plusieurs mois d'efforts,
de patience et de persévérance,
à ceux qui ont été mon plus grand soutien
tout au long de ce parcours.

♥ À mes très chers parents,
pour votre amour infini, vos sacrifices silencieux, vos prières,
votre patience et votre confiance en moi.
Merci d'avoir toujours cru en mes capacités,
même dans les moments où le doute prenait trop de place.
Aucun mot ne saurait exprimer toute ma gratitude
et tout mon amour envers vous.

♥ À mes frères et sœurs : Houda, Amal et Ahmed,
merci pour votre présence, votre affection, vos encouragements
et tous ces petits gestes qui ont allégé les moments difficiles.
Votre soutien a été précieux et votre amour
m'a accompagnée jusqu'au bout de cette aventure.

♥ À toute ma famille,
Merci d'avoir été présents, chacun à votre manière,
dans cette étape importante de ma vie.

♥ À Soumia, mon amie d'enfance,
ta fidélité et ton soutien précieux.
Merci d'avoir toujours été présente, d'une manière
ou d'une autre, dans les moments importants de mon parcours.

♥ Enfin, à ma binôme soulef,
Merci pour ton engagement dans le travail, ta persévérance
et pour avoir partagé avec moi cette expérience avec
responsabilité et bienveillance.
Ce mémoire est aussi le fruit de cette collaboration
et de cette entraide.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin
à la réalisation de ce travail,
je dis simplement merci, du fond du cœur.

Hind





Dédicace



"Seigneur, augmente-moi en savoir."

Celui qui dit : "Je suis à la hauteur", l'atteindra ;
et moi, je suis à la hauteur, même si elle me résiste,
je l'atteindrai malgré tout. "

Le chemin n'a pas été court et la route n'a pas été facile, mais la foi en Dieu
a été plus forte que toutes les difficultés, et l'espoir a été mon compagnon
jusqu'à ce jour tant attendu.

À ma chère mère... ♥

À celle qui a veillé de longues nuits, à celle dont les prières ont précédé
chacun de mes pas, au cœur qui m'a offert un amour inconditionnel, à la lumière
qui a éclairé mon chemin. Tu m'as appris que la patience est la clé de la réussite
et tu as toujours été mon soutien et ma force dans toutes les circonstances.

À toi, maman, je dédie cette réussite. Tu es, après Dieu, la principale artisane
de ce que je suis devenue aujourd'hui. Je prie Dieu de te préserver, de t'accorder
une longue vie et de te récompenser de la meilleure des récompenses.

À mon cher père... ♥

À celui qui m'a appris la valeur du travail et de la persévérance, à celui qui
s'est fatigué et a fait des sacrifices pour me voir réussir, à celui dont le soutien
et la confiance ont toujours été pour moi une source de force et de détermination.

Mon cher père, quels que soient les mots que j'écirai, ils ne pourront jamais
te rendre justice. Je t'exprime tout mon amour, mon respect et ma gratitude.
Que Dieu te protège et te garde toujours comme mon soutien et ma fierté.

À ma chère sœur Hanane... ♥

À celle qui a toujours été mon véritable soutien, qui est restée à mes côtés
dans les moments les plus difficiles et qui a partagé avec moi la fatigue,
l'inquiétude et la joie. Tu as toujours été une source d'encouragement et de force.

Ma sœur Hanane, merci d'avoir toujours été présente lorsque j'avais besoin
de toi, merci pour chaque parole réconfortante et chaque geste bienveillant.
Ta présence dans ma vie est une grande bénédiction.

À ma chère sœur Ritaj... ♥

À celle qui a partagé avec moi les moments de joie comme les moments
difficiles, qui a toujours été proche de moi. Que Dieu te garde comme une
bénédiction dans ma vie et t'accorde tout le bonheur et la réussite.

À mes chers frères : Ayad, Sohaib, Mounaim et Mohamed... ♥

Vous êtes mon soutien et ma fierté. Votre présence dans ma vie m'a toujours
apporté force et sérénité.

Merci pour votre affection, vos encouragements et votre soutien permanent.

À mon amie et collègue Hind... ♥

Toi qui as partagé avec moi ce travail et qui as été une véritable compagne
tout au long de la réalisation de ce mémoire, je t'adresse mes sincères
remerciements et toute ma reconnaissance pour ton aide et ton soutien.

À tous ceux qui m'ont soutenue... ♥

À toutes les personnes qui m'ont encouragé par une parole bienveillante ou
une prière sincère, et à tous ceux qui ont laissé une empreinte dans mon
parcours universitaire.

Je vous dédie à tous le fruit de ce modeste travail.

Soulaf



Liste des figures

Figure 1:Évolution historique des matières plastiques et principales innovations associées (Streit-Bianchi et al., 2020 ; Mc Cool, 2020).....	- 5 -
Figure 2:Rôle des additifs dans la formulation des matières plastiques (Adapté de Andrady, 1990).....	- 7 -
Figure 3 :Origine pétrochimique des matières plastiques à partir des ressources fossiles.	- 8 -
Figure 4:Schéma simplifié de la polymérisation par addition montrant les étapes d'initiation, de propagation et de terminaison. Source : adapté de Bonten (2019).....	- 12 -
Figure 5:Schéma illustratif de la polymérisation par condensation impliquant des monomères bifonctionnels avec formation d'un sous-produit (eau ou alcool). Source : adapté de McKeen (2019)	- 13 -
Figure 6:Classification des plastiques biodégradables et non biodégradables selon leur origine (biosourcé et fossile)	- 17 -
Figure 7:Evaluation de la production mondiale des plastiques (1950 – 2021) et répartition régionale en 2021	- 22 -
Figure 8:Processus de biodégradation des plastiques (Lagneta et al.2020)	- 44 -
Figure 9:Carte de la zone d'étude d'Ouled Mimoun.....	- 59 -
Figure 10:Pourcentage de dégradation du plastique par les champignons.....	- 73 -
Figure 11:Pourcentage de dégradation du plastique par les champignons.....	- 75 -
Figure 12:pourcentage de dégradation du plastique par Bacillus subtilis pour les trois essais par méthode 1	- 76 -
Figure 13:pourcentage de dégradation du plastique par Bacillus subtilis pour les trois essais par la méthode 2	- 77 -
Figure 14:Variation des pourcentages de biodégradation du plastique selon les différents essais (E"1 à E"6).....	- 79 -
Figure 15:Pourcentage de dégradation du plastique par les trois huiles essentielles à 10, 20 et 50 µl (méthode 1).....	- 81 -
Figure 16:Pourcentage de dégradation du plastique par les trois huiles essentielles à 10, 20 et 50 µl (méthode 2).....	- 85 -

Liste des tableaux

Tableau 1:les principaux types de plastiques (Callister et Rethwisch, 2020 ; Boudet, 2003 ; Ravve, 2012).....	- 20 -
Tableau 2:Évolution de la masse du plastique après incubation avec les champignons en milieu liquide	- 72 -
Tableau 3:Évolution de la masse du plastique après incubation avec les champignons en milieu liquide	- 74 -
Tableau 4:Évolution de la masse du plastique après incubation avec Bacillus subtilis (Méthode 1)-	76 -
Tableau 5:Évolution de la masse du plastique après incubation avec Bacillus subtilis (Méthode 02)-	77 -
-	
Tableau 6:Variation de la masse du plastique avant et après incubation avec les microorganismes du sol fertile	- 78 -
Tableau 7:Variation de la masse du plastique avant et après introduction des huiles essentielles (Méthode 1).....	- 80 -
Tableau 8:Variation de la masse du plastique avant et après incubation avec les huiles essentielles (Méthode 2).....	- 83 -

Liste des photos

Photo 1:les échantillons des champs étudiés.....	- 59 -
Photo 2:labo de recherche (photo personnelle)	- 60 -
Photo 3:les morceaux en plastique découpés et pesés (photo personnelle)	- 61 -
Photo 4:milieu PDA préparé et stérilisé.....	- 62 -
Photo 5:sol après stérilisation (photo personnelle)	- 63 -
Photo 6:la bactérie Bacillus subtilis	- 63 -
Photo 7:Préparation du milieu de gélose nutritif.....	- 64 -
Photo 8:incubation de la bactérie bacillus subtilis (photo personnelle)	- 64 -
Photo 9:sol fertile (photo personnelle).....	- 65 -
Photo 10:les huiles essentielles utilisés (photo personnelle).....	- 66 -
Photo 11: Préparation du milieu czapek.....	- 67 -
Photo 12:les flacons contenant le milieu Czapek.....	- 68 -
Photo 13:Les gobelets contenant les champignons dans le milieu solide	- 69 -
Photo 14:biodégradation du plastique par la bactérie Bacillus subtilis.....	- 70 -
Photo 15:des gobelets contenant du sol fertile et le plastique (photo personnelle)	- 70 -
Photo 16:boîtes de pétries contenant différents dosages des trois huiles (Photo personnelle) ...	- 71 -

Liste d'abréviations

PE : Polyéthylène

PP : Polypropylène

PVC : Polychlorure de vinyle

PET : Polyéthylène téréphtalate

PS : Polystyrène

PUR : Polyuréthane

PLA : Acide polylactique

PHA : Polyhydroxyalcanoates

PCL : Polycaprolactone

PES : Polyéthylène succinate

EVOH : Éthylène alcool vinylique

BPA : Bisphénol A

PCB : Polychlorobiphényles

POP : Polluants organiques persistants

ROS : Espèces réactives de l'oxygène

H.E : Huile essentielle

AND : Agence Nationale des Déchets

Table de matière

Dédicaces	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des photos	
Liste d'abréviations	
Table de matière	
INTRODUCTION	1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Partie 1 : Généralités sur la matière plastique	- 4 -
1.Revue historique du développement des matières plastiques	- 4 -
2. Définition et origine des matières plastiques	- 5 -
2.1. Définition de la matière plastique	- 6 -
2.2. Origine des matières plastiques.....	- 7 -
2.2.1. Origine naturelle.....	- 7 -
2.2.2 Plastiques semi-synthétiques.....	- 8 -
2.2.3 Plastiques synthétiques d'origine pétrochimique	- 8 -
2.2.4 Plastiques biosourcés.....	- 9 -
3. Structure chimique des matières plastiques.....	- 9 -
3.1 Généralités sur les polymères.....	- 9 -
3.2 Notion de monomère et de polymère	- 10 -
3.3 Processus de polymérisation	- 10 -
3.3.1 Polymérisation par addition	- 11 -
3.3.2 Polymérisation par condensation	- 12 -
4. Caractéristiques physico-chimiques des plastiques.....	- 13 -
4.1. Propriétés physiques.....	- 14 -
4.2. Propriétés chimiques	- 14 -
5. Classification des matières plastiques	- 14 -
5.1 Selon la structure Thermoplastiques, thermodurcissables, élastomères.....	- 14 -
5.1.1 Thermoplastiques	- 15 -

5.2.2 Thermodurcissables.....	- 15 -
5.2.3 Élastomères	- 15 -
5.2. Selon la biodégradabilité	- 16 -
6. Principaux types de plastiques et leurs usages	- 20 -
7. Production et consommation du plastique	- 21 -
7.1. Évaluation de la production mondiale du plastique	- 21 -
7.2. Consommation du plastique en Algérie	- 22 -
8.Pollution par le plastique en Algérie	- 23 -
Partie 2 : Toxicité du plastique sur la santé humaine et l'environnement.....	- 25 -
1. Origine anthropique et sources de toxicité des plastiques.....	- 25 -
2. Formation et typologie des particules plastiques toxiques.....	- 26 -
2.1. Pollution insidieuse liée aux microplastiques	- 26 -
2.2. Pollution émergente liée aux nanoplastiques	- 26 -
2.3. Importance de la taille dans la toxicité des particules plastiques	- 27 -
3. Dispersion environnementale et voies d'exposition.....	- 27 -
4.Interactions des microplastiques avec les contaminants environnementaux.....	- 29 -
5. Mécanismes de toxicité des plastiques.....	- 30 -
6. Effets toxiques sur la santé humaine	- 31 -
7. Impact écotoxicologique sur l'environnement.....	- 33 -
Partie 3: Dégradation du plastique	- 36 -
1.Généralité	- 36 -
2. Mécanismes de dégradation du plastique	- 37 -
2.1. Dégradation abiotique du plastique	- 38 -
2.1.1. Photodégradation du plastique	- 39 -
2.1.2 Dégradation thermique	- 39 -
2.1.3. Dégradation chimique du plastique	- 40 -
2.1.4. Dégradation mécanique du plastique	- 40 -
2.2. Biodégradation ou dégradation biotique du plastique.....	- 41 -
2.2.1. Dégradation microbienne	- 42 -
2.2.2. Dégradation enzymatique.....	- 42 -
3. Facteurs influençant la dégradation des plastiques	- 43 -

Partie 4 : Approches biologiques et alternatives naturelles pour la dégradation du plastique- 45
 -

1.Introduction	- 45 -
2.Approches biologiques : de la lutte biologique à la bioremédiation	- 46 -
2.1. Dégradation du plastique par les champignons (Mycoremédiation).....	- 46 -
2.1.1. Généralités sur les champignons	- 46 -
2.1.2 Rôle des champignons dans la biodégradation	- 46 -
2.1.3. Capacité enzymatique des champignons	- 47 -
2.1.4. Champignons impliqués dans la dégradation des plastiques	- 48 -
2.1.5. Champignons étudiés	- 48 -
2.1.5.1. <i>Trichoderma</i>	- 48 -
2.1.5.2 <i>Aspergillus niger</i>	- 49 -
3. Dégradation des plastiques par les bactéries (bioremédiation)	- 50 -
3.1. Généralités sur les bactéries	- 50 -
3.2. Enzymes bactériennes impliquées.....	- 50 -
3.3. <i>Bacillus subtilis</i>	- 51 -
4. Micro-organismes du sol	- 52 -
4.1 Diversité microbienne du sol.....	- 52 -
4.2 Rôle dans la fertilité du sol.....	- 52 -
4.3 Rôle dans la dégradation des plastiques	- 53 -
5. Les huiles essentielles	- 54 -
5.1 Composition chimique	- 54 -
5.2 Activités biologiques et mécanisme d'action.....	- 55 -
5.3. Huiles essentielles étudiées	- 55 -
5.3.1. Huile essentielle de citron	- 56 -
5.3.2. Huile essentielle d'orange	- 56 -
5.3.3. Huile essentielle d'eucalyptus	- 57 -
5.4. Applications	- 57 -

Matériel et méthodes

PARTIE I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	- 58 -
PARTIE II : ETUDE MICROBIOLOGIQUE	- 60 -
1.Le plastique	- 60 -

2. Étude des champignons	- 61 -
2.1 Origine des souches fongiques	- 61 -
2.2. Préparation du sol stérilisé	- 62 -
3. Etude de la bactérie <i>Bacillus subtilis</i>	- 63 -
3.1. Préparation du milieu de culture	- 64 -
3.2. Ensemencement bactérien après solidification,.....	- 64 -
4. Prélèvement du sol fertile.....	- 65 -
5. Les huiles essentielles	- 66 -
PARTIE III : TEST DE BIODEGRADATION DU PLASTIQUE (LUTTE BIOLOGIQUE / BIOREMEDIATION)	- 67 -
1. Test de biodégradation du plastique par les champignons	- 67 -
1.2. En milieu solide.....	- 68 -
2. Test de biodégradation du plastique par la bactérie <i>Bacillus subtilis</i>	- 69 -
3. Test de biodégradation du plastique par les microorganismes du sol fertile.....	- 70 -
4. Test de biodégradation du plastique par les huiles essentielles.....	- 71 -
I. Résultats	- 72 -
1. Résultats du test de biodégradation du plastique par les champignons	- 72 -
1.1. En milieu liquide	- 72 -
1.2. En milieu solide.....	- 74 -
2.2. Test de biodégradation du plastique par la méthode 2	- 77 -
4.2. Test de dégradation du plastique par l'huile essentielle par la méthode2	- 83 -
II. Discussion.....	- 86 -
Conclusion	Erreur ! Signet non défini.
Références bibliographiques	- 89 -
Annexes	- 91 -

INTRODUCTION

Les matières plastiques occupent aujourd'hui une place essentielle dans la société moderne en raison de leurs nombreuses propriétés physicochimiques avantageuses, notamment leur légèreté, leur résistance mécanique, leur flexibilité, leur imperméabilité, leur stabilité chimique ainsi que leur faible coût de fabrication. Grâce à ces caractéristiques, les plastiques sont devenus indispensables dans de nombreux secteurs tels que l'emballage, l'agriculture, la médecine, le bâtiment, l'automobile, l'électronique ainsi que dans diverses applications domestiques et industrielles (**Shimao, 2001 ; Shah et al., 2008**). Leur utilisation généralisée a largement contribué au progrès technologique et à l'amélioration des conditions de vie modernes, la production mondiale de plastiques connaît une croissance continue, atteignant aujourd'hui plusieurs centaines de millions de tonnes par an (**Geyer et al., 2017 ; Plastics Europe, 2022**). La majorité de ces matériaux étant issue de ressources pétrochimiques, leur structure macromoléculaire complexe leur confère une grande résistance aux mécanismes naturels de dégradation (**Urbanek et al., 2018**). En effet, les déchets plastiques peuvent persister pendant plusieurs décennies, voire plusieurs siècles, dans les sols, les cours d'eau et les océans (**Harshvardhan, 2013 ; Pathak, 2017**). Cette persistance fait de la pollution plastique l'un des défis environnementaux majeurs du XXI^e siècle.

Parmi les polymères les plus utilisés figure le polyéthylène (PE), largement employé dans la fabrication des emballages et des sacs plastiques en raison de sa résistance et de sa stabilité chimique (**Plastics Europe, 2020**). Toutefois, ces mêmes propriétés rendent sa dégradation particulièrement lente dans les conditions naturelles.

Les plastiques se fragmentent progressivement en particules de plus en plus petites appelées microplastiques puis nanoplastiques (**Thompson et al., 2004 ; Song et al., 2017**). Ces particules constituent une source importante de contamination environnementale en raison de leur dispersion dans l'air, l'eau et les sols ainsi que de leur capacité à intégrer les chaînes alimentaires terrestres et aquatiques.

Leur importante surface spécifique favorise l'adsorption de nombreux contaminants environnementaux tels que les métaux lourds, les pesticides et les polluants organiques persistants (**Rochman et al., 2014 ; Bakir et al., 2014**). Leur ingestion par les

organismes vivants peut provoquer divers effets écotoxicologiques, notamment des perturbations physiologiques, un stress oxydatif, des réactions inflammatoires ainsi que différentes altérations cellulaires et métaboliques. Chez l'être humain, l'exposition à ces particules peut se produire par ingestion, inhalation ou contact direct, suscitant ainsi des préoccupations croissantes en matière de santé publique. Ces composés peuvent migrer dans l'environnement et agir comme perturbateurs endocriniens, entraînant des effets néfastes sur plusieurs systèmes biologiques.

Face aux limites des méthodes conventionnelles de gestion des déchets plastiques, la recherche scientifique s'oriente de plus en plus vers des solutions alternatives plus durables et respectueuses de l'environnement (**Hopewell et al., 2009**). Parmi les approches les plus prometteuses figure la biodégradation biologique, qui repose sur la capacité de certains microorganismes à coloniser les surfaces plastiques et à produire des enzymes capables de dégrader progressivement les polymères synthétiques en composés plus simples et moins toxiques (**Krueger et al., 2015 ; Ahmed et al., 2018**). De nombreuses études ont mis en évidence le potentiel de plusieurs microorganismes dans les processus de biodégradation des plastiques. Parmi eux, *Bacillus subtilis*, *Aspergillus niger* et *Trichoderma sp.* se distinguent par leur aptitude à produire diverses enzymes extracellulaires impliquées dans la dégradation des composés organiques complexes (**Urbanek et al., 2018**). En parallèle, les microorganismes naturellement présents dans les sols fertiles jouent un rôle essentiel dans les processus biologiques de décomposition et de transformation de nombreuses substances persistantes. Par ailleurs, les huiles essentielles suscitent un intérêt croissant en raison de leurs propriétés biologiques, antimicrobiennes et antioxydantes. Leur utilisation dans les approches biologiques apparaît prometteuse, notamment en raison de leur capacité à influencer l'activité microbienne et à participer indirectement aux mécanismes impliqués dans la dégradation de certains polluants.

L'objectif principal de cette étude est de proposer des solutions alternatives naturelles durables à savoir le potentiel de certains champignons, bactérie, des microorganismes du sol fertile ainsi que des huiles essentielles comme processus biologiques susceptibles de contribuer à la biodégradation et bioremédiation des déchets plastiques connu comme

toxique, à la réduction de la pollution plastique et à la préservation de l'environnement et la santé humaine.

Afin de répondre à la problématique posée et d'atteindre les objectifs fixés, le présent mémoire a été structuré comme suit :

- Le premier chapitre, consacré à l'étude bibliographique, comprend quatre parties. La première partie présente des généralités sur les matières plastiques, la deuxième partie traite la toxicité des plastiques et de leurs impacts sur l'environnement et la santé humaine, la troisième partie est consacrée aux mécanismes de dégradation et de biodégradation des polymères plastiques et la quatrième partie aborde les stratégies de lutte biologique et les moyens naturels alternatifs, les bactéries, les champignons, les microorganismes du sol fertile et les huiles essentielles impliqués dans les processus de biodégradation et de bioremédiation des déchets plastiques.
- Le deuxième chapitre, consacrée au matériel utilisé ainsi que les différentes méthodes adoptées pour la réalisation des essais expérimentaux.
- Résultats et interprétations présentés et interprétés dans le troisième chapitre ensuite discuté à la lumière des données bibliographiques disponibles.

Enfin, ce mémoire s'achève par une conclusion générale mettant en évidence les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives futures relatives à l'utilisation des moyens naturels dans la biodégradation des déchets plastiques. Les références bibliographiques utilisées pour l'élaboration de ce mémoire sont présentées à la fin du document.

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Partie 1 : Généralités sur la matière plastique

1.Revue historique du développement des matières plastiques

L'utilisation des matériaux présentant un comportement plastique ne date pas de l'époque moderne. En réalité, dès l'Antiquité, l'Homme exploitait déjà certaines substances d'origine naturelle, telles que les résines végétales, l'ambre ou le caoutchouc naturel, pour la fabrication d'objets simples destinés aux usages quotidiens. Toutefois, le véritable essor des matières plastiques n'a commencé qu'au XIX^e siècle, avec l'évolution de la chimie organique et les premières modifications expérimentales des substances naturelles (**Gervet, 2007**). Une étape déterminante a été franchie en 1833, lorsque Henri Braconnot a réussi à transformer la cellulose en nitrate de cellulose. Ce composé est considéré comme l'une des premières formes de matériau plastique issu d'une matière naturelle chimiquement modifiée, marquant ainsi une avancée importante dans ce domaine (**Aubry, 2014**). Par la suite, en 1869, John Wesley Hyatt a mis au point le celluloid, généralement reconnu comme le premier plastique semi-synthétique. Ce matériau a été largement utilisé comme substitut de l'ivoire et a rapidement trouvé des applications dans plusieurs secteurs industriels (**Thompson et al., 2009**). Le début du XX^e siècle a ensuite été marqué par une innovation majeure avec la découverte de la bakélite en 1907 par Leo Hendrik Baekeland. Ce matériau est considéré comme le premier plastique entièrement synthétique. Grâce à sa bonne résistance thermique et chimique, il a été largement adopté, notamment dans les applications électriques et industrielles (**Plastics Europe, 2018**). Par ailleurs, le développement de l'industrie pétrochimique au cours du XX^e siècle a permis l'apparition et la diversification de nombreux polymères de synthèse tels que le polyéthylène, le polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène.

D'autres matériaux comme le nylon, le polyuréthane et le Téflon ont également été développés, élargissant ainsi les domaines d'application des plastiques (**Andrady & Neal, 2009**). À partir des années 1950, la production mondiale des matières plastiques a connu une croissance rapide, liée à leur utilisation massive dans des secteurs variés tels que l'emballage, la construction et l'industrie automobile. Cette expansion

s'explique principalement par leurs propriétés avantageuses, notamment leur légèreté, leur durabilité et leur facilité de mise en forme. Enfin, cette évolution historique, illustrée par des matériaux clés tels que le celluloïd, la bakélite et les polymères modernes comme le polyéthylène, le nylon et le polypropylène, a conduit à une production industrielle à grande échelle (**Figure 1**). Cependant, cette forte croissance s'est accompagnée d'une augmentation significative des déchets plastiques, constituant aujourd'hui une problématique environnementale majeure.

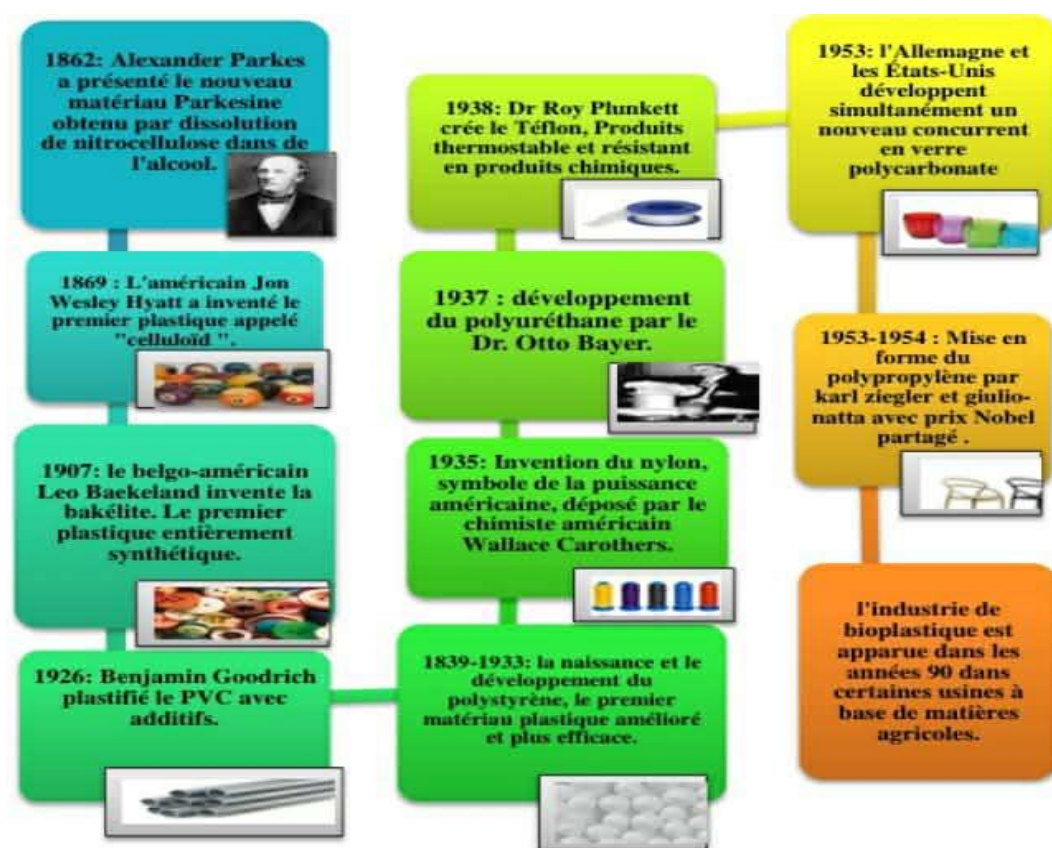


Figure 1:Évolution historique des matières plastiques et principales innovations associées (Streit-Bianchi et al., 2020 ; Mc Cool, 2020).

2. Définition et origine des matières plastiques

Aujourd'hui, les matières plastiques occupent une place essentielle dans la vie quotidienne ainsi que dans de nombreux secteurs industriels. Elles sont largement utilisées dans des domaines variés tels que l'emballage, la construction, l'agriculture, le transport et le secteur médical. Cette large utilisation s'explique par leurs propriétés

avantageuses, notamment leur légèreté, leur résistance aux chocs, leur imperméabilité ainsi que leur facilité de mise en forme. Depuis le XX^e siècle, la production mondiale des plastiques a connu une augmentation considérable, dépassant celle de plusieurs matériaux traditionnels comme l'acier ou l'aluminium (**Andrady, 1990 ; Rey, 2007**).

2.1. Définition de la matière plastique

Une matière plastique peut être définie comme un matériau constitué principalement de polymères, qui sont des macromolécules formées par l'enchaînement d'unités élémentaires appelées monomères (**Laurent, 2013**). Le terme « plastique » provient du mot grec plastikos, signifiant « apte à être façonné », en référence à la capacité de ces matériaux à être moulés sous l'effet de la chaleur ou de la pression, puis à conserver la forme obtenue après refroidissement (**Rey, 2007**). Dans les applications industrielles, les polymères ne sont généralement pas utilisés à l'état pur. Ils sont souvent associés à différents additifs, tels que des plastifiants, des charges ou d'autres substances chimiques, afin d'améliorer leurs propriétés physiques et mécaniques (**Figure 2**). Ces ajouts permettent notamment d'augmenter la résistance aux chocs, la stabilité thermique et la durabilité, tout en adaptant les matériaux aux exigences spécifiques de chaque domaine d'utilisation (**Andrady, 1990**).

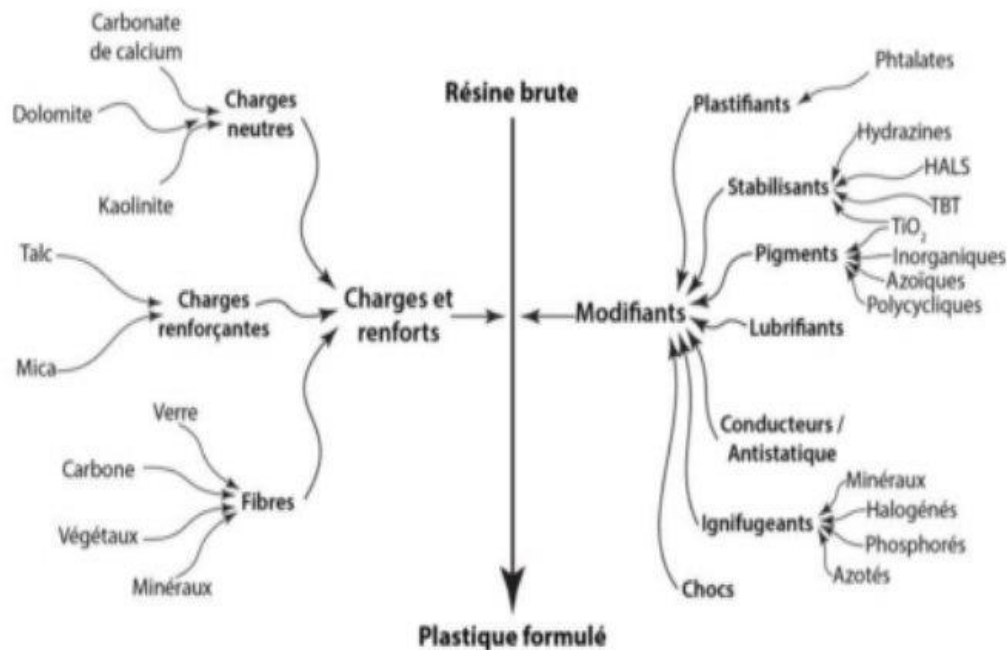


Figure 2: Rôle des additifs dans la formulation des matières plastiques (Adapté de Andrady, 1990)

2.2. Origine des matières plastiques

Les matières plastiques peuvent être classées selon leur origine et leur mode de fabrication. Cette classification permet de mieux comprendre la diversité des polymères et leur adaptation aux différents usages industriels et domestiques.

2.2.1. Origine naturelle

Les polymères naturels constituent les premières formes de matières plastiques utilisées par l'homme, bien avant l'apparition des plastiques synthétiques. Ces matériaux existent dans la nature et peuvent être utilisés directement ou après des modifications limitées (**Carrega, 2017**). Le caoutchouc naturel est l'un des premiers polymères exploités. Il est obtenu à partir du latex de certains arbres, collecté après incision de l'écorce. Ce latex, à l'origine liquide, est ensuite transformé en matériau solide, offrant une grande élasticité et des propriétés mécaniques intéressantes (**Carrega, 2017**).

La cellulose est un polymère naturel très répandu dans le règne végétal, notamment dans le bois et le coton. Elle constitue une ressource essentielle pour la fabrication de divers

matériaux. Souvent, elle subit de légères modifications chimiques afin d'améliorer ses propriétés d'usage. Polymères d'origine biologique Certains polymères naturels peuvent être produits par des micro-organismes, par fermentation de sucres ou de lipides. Ces biopolymères présentent un intérêt croissant grâce à leur biodégradabilité et leur faible impact environnemental **(Laurent B., 2020)**. Ainsi, les polymères naturels offrent une alternative renouvelable et écologique aux plastiques conventionnels.

2.2.2 Plastiques semi-synthétiques

Ces plastiques sont dérivés de polymères naturels modifiés chimiquement pour améliorer leurs propriétés physiques et mécaniques. Par exemple, la cellulose peut être transformée en nitrate de cellulose.

Cette catégorie élargit les usages des polymères naturels tout en conservant certains avantages de leur origine biologique.

2.2.3 Plastiques synthétiques d'origine pétrochimique

Les plastiques synthétiques sont entièrement fabriqués à partir de ressources fossiles telles que le pétrole, le gaz naturel ou le charbon **(Fig. 3)**. Des réactions chimiques complexes permettent d'obtenir des matériaux aux propriétés variées, adaptés à de nombreuses applications industrielles. Ces plastiques représentent aujourd'hui la majorité des matières plastiques utilisées dans le monde.

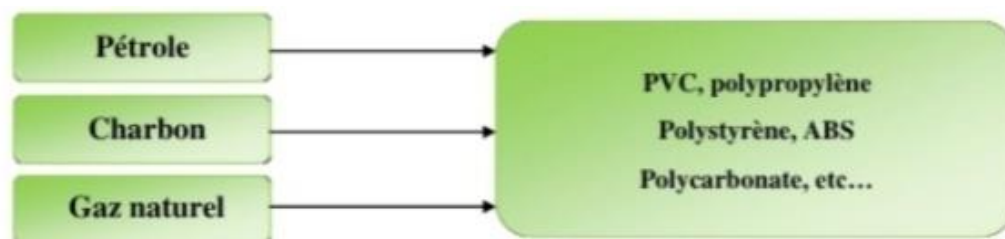


Figure 3 : Origine pétrochimique des matières plastiques à partir des ressources fossiles.

2.2.4 Plastiques biosourcés

Les plastiques biosourcés sont produits en totalité ou en partie à partir de ressources renouvelables (biomasse végétale, amidon, cellulose, etc.). Ils permettent de réduire la dépendance aux ressources fossiles. Toutefois, leur biodégradabilité dépend de leur structure chimique et des traitements subis. Ces matériaux constituent une alternative plus écologique dans le développement durable des plastiques (**Laurent Basilico, 2020 ; Gélinas, 2013**).

3. Structure chimique des matières plastiques

3.1 Généralités sur les polymères

Les polymères, appelés couramment « matières plastiques », occupent aujourd’hui une place très importante dans la vie quotidienne. Ils sont largement utilisés dans plusieurs domaines, allant des objets usuels aux applications industrielles et technologiques. Cette importance s’explique par la diversité de leurs propriétés, puisqu’ils peuvent être rigides ou souples, légers, résistants, isolants et parfois conducteurs (**Callister & Rethwisch, 2020**). Sur le plan chimique, les polymères sont constitués de macromolécules formées par la répétition de petites unités appelées monomères. Ce phénomène, appelé polymérisation, conduit à la formation de longues chaînes moléculaires. Ces chaînes peuvent présenter différentes structures, notamment linéaires, ramifiées ou réticulées, ce qui influence directement les propriétés physiques et mécaniques du matériau. De plus, les macromolécules peuvent s’entremêler entre elles, renforçant ainsi la cohésion et la résistance du polymère. Ainsi, la structure chimique des polymères joue un rôle essentiel dans la détermination des caractéristiques des matières plastiques.

Le concept de macromolécule a été développé au début du XX^e siècle grâce aux travaux d’Hermann Staudinger, qui a démontré que les polymères sont constitués de longues chaînes moléculaires liées par des liaisons covalentes, ce qui a permis le développement des matériaux plastiques modernes (**Boudet, 2003**).

3.2 Notion de monomère et de polymère

La compréhension des polymères repose sur deux notions fondamentales le monomère et le polymère :

- Un polymère : est défini comme une macromolécule formée par la répétition d'unités de base appelées monomères, reliées entre elles par des liaisons covalentes **(Callister & Rethwisch, 2020 ; Nicaud, 2004)**.
- Un monomère : constitue l'élément structural de base. Il s'agit généralement d'une petite molécule possédant des groupements chimiques réactifs, lui permettant de s'associer à d'autres monomères. Sa composition chimique varie selon la nature du polymère et implique fréquemment des éléments tels que le carbone, l'hydrogène ou l'oxygène **(Laurent, 2013)**.

La formation des polymères s'effectue à travers une réaction chimique appelée polymérisation, au cours de laquelle les monomères s'assemblent progressivement pour donner naissance à des chaînes macromoléculaires. Ce processus dépend de plusieurs paramètres, notamment la température, la pression et la présence de catalyseurs **(Laurent Basilico et al., 2020)**. Un autre paramètre important est le degré de polymérisation, qui correspond au nombre d'unités monomères constituant une chaîne. Lorsqu'il est faible, on parle d'oligomères, tandis qu'un degré élevé conduit à la formation de polymères présentant des propriétés mécaniques plus développées, telles que la résistance, l'élasticité ou la flexibilité **(Rey, 2007)**.

3.3 Processus de polymérisation

La polymérisation correspond à un processus chimique au cours duquel des molécules simples, appelées monomères, s'assemblent pour former des structures macromoléculaires. Ce phénomène est à l'origine des propriétés physiques et mécaniques spécifiques des matériaux polymères.

Selon le mécanisme réactionnel impliqué, il existe principalement deux grandes catégories de polymérisation : la polymérisation par addition et la polymérisation par condensation (**Bonten, 2019 ; McKeen, 2019**).

3.3.1 Polymérisation par addition

La polymérisation par addition, également appelée polymérisation en chaîne, met en jeu des monomères contenant des liaisons multiples, généralement de type double liaison. L'ouverture de ces liaisons permet aux unités monomériques de se lier entre elles pour former une chaîne polymère.

Ce mécanisme se déroule en trois étapes fondamentales (**Fig. 4**) :

- Initiation : formation d'espèces réactives (souvent des radicaux libres) à partir d'un initiateur, permettant d'amorcer la réaction.
- Propagation : ajout successif de monomères à la chaîne en croissance, entraînant son allongement progressif.
- Terminaison : arrêt de la croissance de la chaîne, soit par combinaison de deux chaînes, soit par désactivation des espèces actives. Ce type de polymérisation conduit généralement à des polymères linéaires ou faiblement ramifiés, tels que le polyéthylène (PE), le polystyrène (PS) et le polychlorure de vinyle (PVC) (**Bonten, 2019 ; McKeen, 2019**).

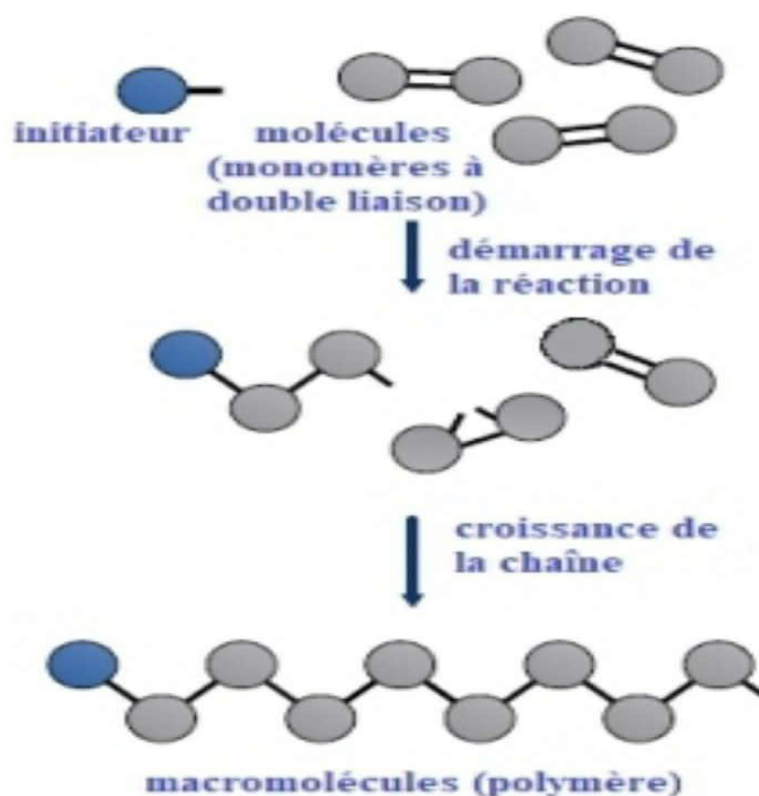


Figure 4:Schéma simplifié de la polymérisation par addition montrant les étapes d'initiation, de propagation et de terminaison. Source : adapté de Bonten (2019)

3.3.2 Polymérisation par condensation

La polymérisation par condensation, ou polymérisation par étapes, repose sur la réaction entre des monomères porteurs de groupes fonctionnels réactifs. Contrairement à la polymérisation par addition, ce processus s'accompagne de la formation de sous-produits de faible masse molaire, tels que l'eau ou certains alcools (**Fig. 5**). Pour que la réaction se poursuive efficacement, ces sous-produits doivent être éliminés du milieu réactionnel. Les monomères impliqués sont généralement bifonctionnels, ce qui favorise la formation progressive de longues chaînes polymériques.

Parmi les matériaux obtenus par ce type de mécanisme figurent notamment les polyamides (nylon) ainsi que le polyéthylène téréphtalate (PET). Ces polymères peuvent présenter une certaine sensibilité à l'humidité et aux températures élevées, en raison de réactions de dégradation telles que l'hydrolyse (McKeen, 2019).

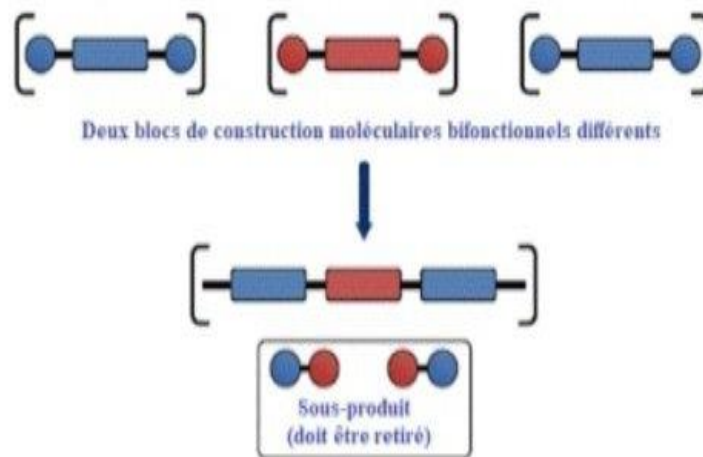


Figure 5:Schéma illustratif de la polymérisation par condensation impliquant des monomères bifonctionnels avec formation d'un sous-produit (eau ou alcool). Source : adapté de McKeen (2019)

4. Caractéristiques physico-chimiques des plastiques

L'utilisation des matières plastiques a connu une expansion importante ces dernières années grâce à leurs propriétés avantageuses et leur bon rapport qualité/prix. Ces matériaux permettent de fabriquer une grande variété de produits adaptés à différents usages industriels et domestiques (Callister & Rethwisch, 2020). Les matières plastiques se distinguent par plusieurs caractéristiques essentielles : Faible densité, ce qui les rend très légères, bonne résistance mécanique, durabilité élevée et Excellentes propriétés d'isolation thermique et électrique.

Ainsi, une résistance chimique face aux acides, bases et solvants. Facilité de mise en forme et de transformation, imperméabilité à l'eau et aux gaz renforçant leur durabilité.

4.1. Propriétés physiques

Les propriétés physiques des plastiques dépendent de leur structure moléculaire et de leur composition. Ils sont généralement légers, facilitant leur transport et leur manipulation. Selon le type de plastique, ils peuvent être rigides ou flexibles, opaques ou transparents. Ils possèdent également de bonnes propriétés d'isolation thermique et électrique, ce qui explique leur utilisation dans de nombreux secteurs industriels (**Fried, 2021**).

Cependant, la plupart des plastiques présentent une faible biodégradabilité et une grande résistance au vieillissement. Au fil du temps, ils se fragmentent en microplastiques, contribuant ainsi à la pollution environnementale (**Geyer, Jambeck & Law, 2017**).

4.2. Propriétés chimiques

Sur le plan chimique, les plastiques sont constitués de macromolécules riches en carbone, ce qui leur confère une grande stabilité. Ils présentent une bonne résistance aux agents chimiques, notamment acides, bases et solvants, et résistent à la corrosion. Leur imperméabilité à l'eau et aux gaz contribue à leur durabilité dans diverses conditions d'utilisation (**Ravve, 2012**).

Ces caractéristiques expliquent pourquoi les plastiques sont largement utilisés dans de nombreux environnements, mais elles soulignent également leur persistance dans la nature, posant des défis majeurs pour la gestion des déchets plastiques.

5. Classification des matières plastiques

5.1 Selon la structure Thermoplastiques, thermodurcissables, élastomères

Les matières plastiques peuvent être classées selon leur structure moléculaire, qui influence directement leurs propriétés physiques, chimiques ainsi que leur comportement lors de la transformation.

On distingue généralement trois grandes familles : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères.

5.1.1 Thermoplastiques

Les thermoplastiques représentent la famille la plus utilisée. Ils ont la particularité de devenir malléables lorsqu'ils sont chauffés et de se solidifier en refroidissant, sans modification chimique. Cette propriété est liée à leur structure constituée de chaînes linéaires ou légèrement ramifiées (**Nicaud, 2004**). On distingue deux types principaux :

- Les thermoplastiques amorphes, caractérisés par une structure désordonnée et une bonne résistance aux chocs.

- Les thermoplastiques semi-cristallins, possédant des zones ordonnées, ce qui leur confère une meilleure résistance mécanique et chimique (**Alin & Dessarthe, 1996**).

Parmi les exemples les plus courants, on peut citer le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS), le PVC et le PET. Ces matériaux sont largement utilisés et facilement recyclables.

5.2.2 Thermodurcissables

Les thermodurcissables se caractérisent par une transformation irréversible lors de leur mise en forme. Une fois durcis, ils ne peuvent plus être remoulés. Leur structure tridimensionnelle fortement réticulée leur confère une grande rigidité et une bonne résistance thermique (**Dessarthe et al., 1997**).

Ils sont utilisés dans la fabrication de résines, de vernis et de matériaux composites.

Parmi les exemples courants, on trouve les polyuréthanes, les phénoplastes et les polyesters insaturés (**Addou, 2009**).

5.2.3 Élastomères

Les élastomères sont des polymères caractérisés par leur grande élasticité. Ils peuvent subir des déformations importantes et retrouver leur forme initiale après relâchement de la contrainte. Cette propriété est liée à leur structure constituée de chaînes longues faiblement réticulées, formant un réseau souple.

Parmi les exemples les plus connus, on peut citer le caoutchouc naturel, le SBR, l'EPDM et le néoprène, largement utilisés dans les pneus, les joints et les matériaux souples (**Abbou, 2009**).

Cette classification permet de mieux comprendre le comportement des matières plastiques en fonction de leur structure, ce qui facilite le choix du matériau le plus adapté selon l'application envisagée

5.2. Selon la biodégradabilité

Les matières plastiques peuvent être classées selon leur capacité à se dégrader dans l'environnement. Il y a des plastiques non biodégradables, plastiques biodégradables d'origine fossile et plastiques biodégradables d'origine biologique (**Figure 6**).

Cette classification repose principalement sur la structure chimique des polymères ainsi que sur les mécanismes impliqués dans leur dégradation, comme le montrent plusieurs études scientifiques (**Temoor et al., 2018**).

Elle permet de mieux comprendre les différences de comportement environnemental des polymères.

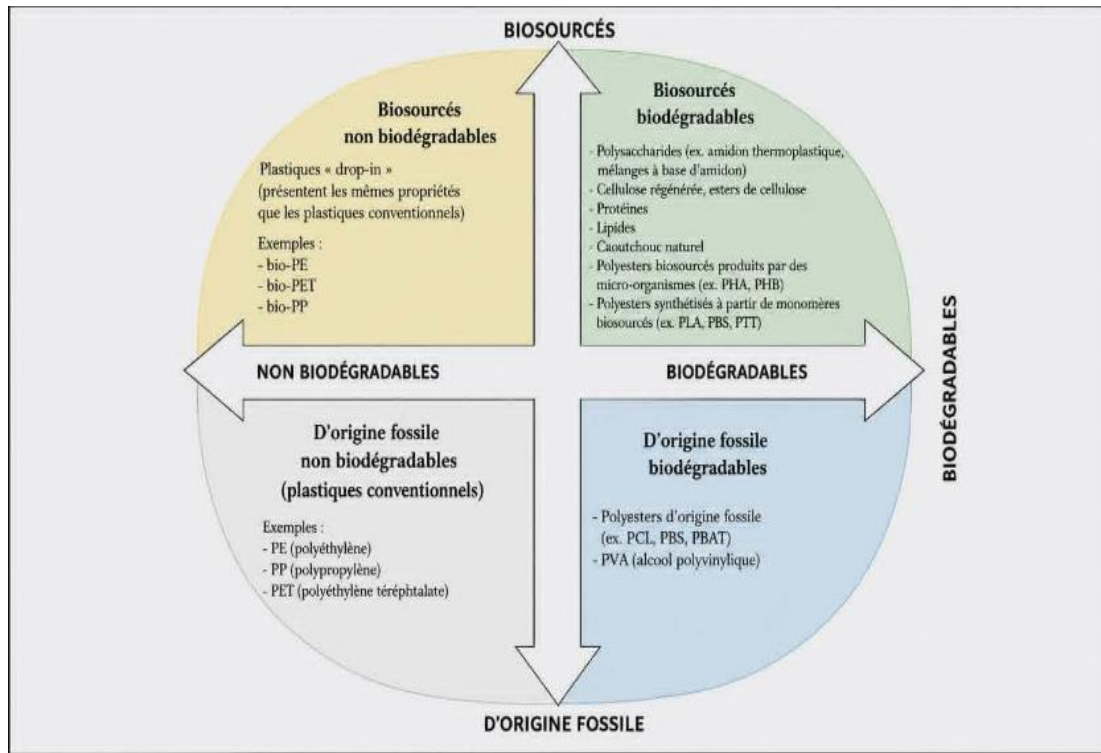


Figure 6: Classification des plastiques biodégradables et non biodégradables selon leur origine (biosourcé et fossile)

(Adapté de Batori et *al.*, 2018)

✚ Les plastiques non biodégradables

La majorité des plastiques utilisés actuellement appartiennent à la catégorie des polymères non biodégradables ou faiblement biodégradables, dont la dégradation dans l'environnement est extrêmement lente (**Krueger et al., 2015**). Ces matériaux sont principalement issus de ressources pétrochimiques et se caractérisent par un poids moléculaire élevé, résultant de la répétition d'un grand nombre d'unités monomères (**Ghosh et al., 2013**). Cette structure leur confère une grande stabilité chimique, ce qui limite leur intégration dans les cycles naturels de dégradation (**Vijaya & Reddy, 2008**).

Parmi les plastiques les plus couramment utilisés figurent le polyéthylène (PE), le polychlorure de vinyle (PVC), le polystyrène (PS), le polyéthylène téréphtalate (PET) ainsi que le polyuréthane (PUR).

En raison d'une gestion inadéquate des déchets, ces matériaux s'accumulent dans l'environnement et constituent une source importante de pollution (**Krueger et al., 2015**). Afin de limiter leur impact environnemental, certaines approches consistent à incorporer des additifs tels que l'amidon ou des agents pro-oxydants afin de favoriser leur fragmentation. Toutefois, l'efficacité réelle des plastiques dits oxo-biodégradables reste controversée (**Vijaya & Reddy, 2008 ; Reddy, 2008**).

Les plastiques biodégradables

Les plastiques biodégradables se distinguent par leur capacité à être décomposés par des micro-organismes en substances simples telles que le dioxyde de carbone, l'eau et la biomasse. Cette dégradation peut se produire en conditions aérobies ou anaérobies et repose sur l'action d'enzymes spécifiques (**Wackett & Hershberger, 2001 ; Shah et al., 2008**).

La biodégradabilité d'un polymère dépend de plusieurs facteurs, notamment sa structure chimique, son poids moléculaire, sa cristallinité ainsi que la présence de groupes fonctionnels ou d'additifs (**Artham & Doble, 2008**).

Plastiques biodégradables d'origine biologique

Les plastiques biodégradables d'origine biologique sont issus de ressources renouvelables telles que l'amidon ou la cellulose. Ils présentent l'avantage d'être facilement assimilés par les micro-organismes, ce qui en fait une alternative intéressante aux plastiques conventionnels (**Kale et al., 2007**).

L'amidon, en particulier, est largement utilisé en raison de son abondance, de son faible coût et de sa biodégradabilité dans certaines conditions environnementales (**Chattopadhyay et al., 2011 ; Nanda et al., 2010**).

Parmi les polymères biosourcés, les polyhydroxyalcanoates (PHA) occupent une place importante. Produits par fermentation bactérienne de sucres et de lipides, ils sont utilisés dans les domaines de l'emballage, de la médecine et de l'industrie pharmaceutique (**Philip et al., 2007 ; Flieger et al., 2003**).

Leur biodégradation dépend fortement des conditions environnementales et de la nature des micro-organismes impliqués (**Chen & Patel, 2011**). L'acide polylactique (PLA), obtenu à partir de ressources renouvelables telles que le maïs ou la canne à sucre, constitue également un polymère biodégradable largement utilisé. Il présente de bonnes propriétés mécaniques et peut être totalement dégradé par certains micro-organismes (**Ikada et Tsuji, 2000 ; Anderson et Shive, 2012**).

Plastiques biodégradables d'origine fossile

Peuvent également présenter un certain degré de biodégradabilité, bien que leur dégradation soit généralement plus lente (**Vert et al., 2002 ; Hoshino et al., 2003**). Parmi ces matériaux, on peut citer le succinate de polyéthylène (PES) et la polycaprolactone (PCL), qui peuvent être dégradés par des micro-organismes spécifiques dans des conditions appropriées (**Tribedi & Sil, 2014 ; Wu, 2005**).

Autres polymères dégradables

D'autres types de polymères présentent des propriétés de dégradation particulières. L'éthylène-alcool vinylique (EVOH) est utilisé comme barrière à l'oxygène dans les emballages multicouches, bien que son coût relativement élevé limite son utilisation (**Shah et al., 2008**). Par ailleurs, les plastiques photodégradables contiennent des additifs qui permettent une dégradation sous l'effet des rayonnements ultraviolets.

Leur efficacité dépend toutefois de plusieurs facteurs environnementaux tels que l'intensité lumineuse, la localisation géographique et les conditions climatiques (**Shah et al., 2008**).

6. Principaux types de plastiques et leurs usages

Le tableau suivant présente les principaux types de plastiques ainsi que leurs usages.

Tableau 1: les principaux types de plastiques (Callister et Rethwisch, 2020 ; Boudet, 2003 ; Ravve, 2012)

Type de plastique	Abréviation	Principales propriétés	Usages / Exemples	Symbole
Polyéthylène téréphtalate (PET)	PET	• Léger, transparent • Bonne résistance aux gaz • Bonne stabilité chimique	• Bouteilles d'eau et de boissons • Emballages alimentaires • Produits cosmétiques	
Polyéthylène haute densité (PEHD)	PEHD	• Rigide et résistant • Résistant à la chaleur • Résistant aux produits chimiques	• Bouteilles de détergents • Contenants alimentaires • Jouets, objets du quotidien	
Polychlorure de vinyle (PVC)	PVC	• Durable et polyvalent • Bonne résistance chimique • Flexibilité améliorée par additifs	• Tuyaux et conduites • Matériaux de construction • Emballages, câbles	
Polyéthylène basse densité (PEBD)	PEBD	• Souple et léger • Flexible • Résistant à l'humidité	• Films plastiques • Sacs plastiques • Emballages alimentaires	
Polypropylène (PP)	PP	• Rigide • Résistant à la chaleur • Bonne résistance chimique	• Emballages alimentaires • Contenants pour produits pharmaceutiques • Objets domestiques	
Polystyrène (PS)	PS	• Léger et rigide • Isolant thermique • Fragile (non résistant aux chocs)	• Emballages • Vaisselle jetable • Matériaux isolants (polystyrène expansé)	
Polycarbonate (PC)	PC	• Transparent • Très résistant aux chocs • Bonne résistance mécanique et thermique	• Bouteilles réutilisables • Équipements industriels • Dispositifs de sécurité (écrans, lunettes, etc.)	

7. Production et consommation du plastique

7.1. Évaluation de la production mondiale du plastique

Depuis les années 1950, la production mondiale de plastiques a fortement augmenté, passant d'environ 2 millions de tonnes à plusieurs centaines de millions de tonnes aujourd'hui (**Plastics Europe, 2020**). Cette croissance est principalement portée par les industries alimentaires, pharmaceutiques, médicales et de l'emballage, qui utilisent largement ces matériaux. En 2013, la production mondiale était de 299 millions de tonnes et a atteint 311 millions de tonnes en 2014, ce qui correspond à près de 10 000 kg de plastique produits chaque seconde, soit environ 8 % de la consommation mondiale de pétrole (Fédération des producteurs de plastique, 2014).

Répartition régionale : la Chine domine la production mondiale avec 26 %, suivie de l'Europe (20 %), tandis que l'Afrique et le Moyen-Orient contribuent plus modestement (10 %) (**Geyer, Jambeck et Law, 2017**). Après un ralentissement lié à la crise économique de 2008, la production a repris sa croissance, notamment après la pandémie de COVID-19, stimulée par la demande en plastiques médicaux et emballages. Selon les données récentes, la production mondiale a atteint 360 millions de tonnes en 2020 et 390,7 millions de tonnes en 2021, avec une forte augmentation en Asie, tandis que la part européenne a légèrement diminué (**Plastics Europe, 2022**) (**Fig. 7**).

Enjeux environnementaux : le recyclage des plastiques reste limité à environ 9 % de la production, et une grande partie est incinérée, mise en décharge ou rejetée dans l'environnement, ce qui entraîne des impacts écologiques importants (**Gaudiaut, 2023**).

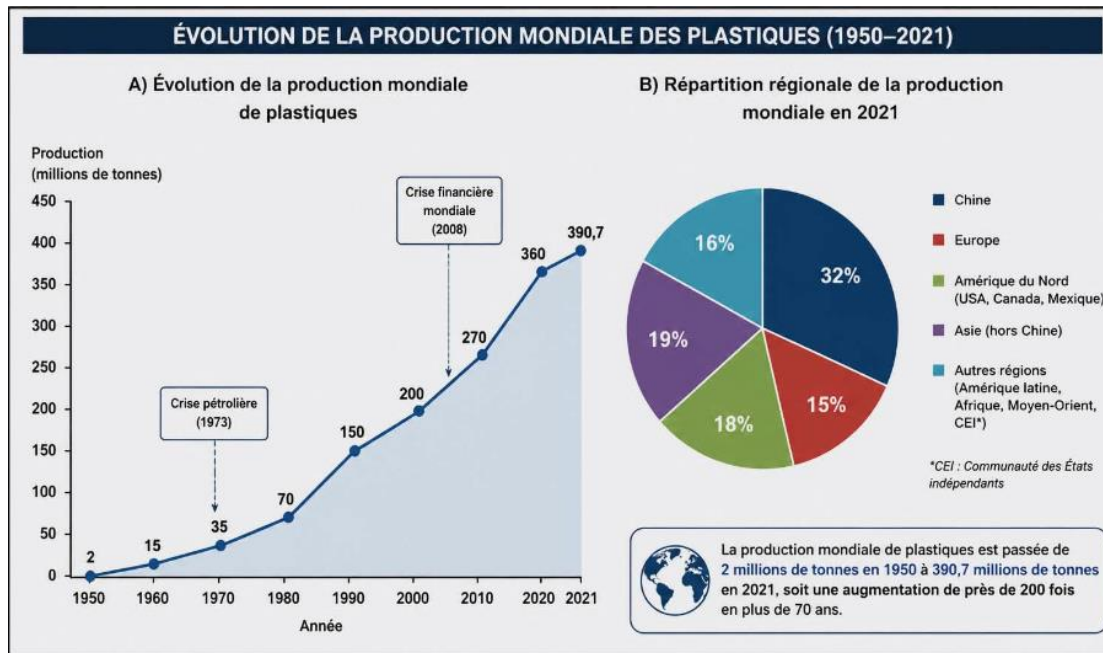


Figure 7: Évaluation de la production mondiale des plastiques (1950 – 2021) et répartition régionale en 2021

Source : Adapté de Plastics Europe (2022) et Geyer, Jambeck et Law (2017).

7.2. Consommation du plastique en Algérie

La consommation des matières plastiques en Algérie a connu une progression régulière au cours des dernières années, en lien avec le développement de l'industrie locale et l'augmentation de la demande dans plusieurs secteurs, notamment l'emballage, le bâtiment et les produits de consommation courante. D'après les données disponibles, les importations de matières premières destinées à l'industrie plastique ont atteint environ 1,7 milliard de dollars en 2015, 1,9 milliard en 2016 et ont dépassé les 2 milliards de dollars en 2017 (NWA, 2020). Ces chiffres mettent en évidence une dépendance importante de l'Algérie vis-à-vis des intrants importés pour soutenir la production nationale du plastique. Cette croissance de la consommation traduit également l'importance croissante des plastiques dans la vie quotidienne et dans les activités industrielles du pays.

Cependant, cette évolution s'accompagne de défis significatifs, notamment en matière de gestion des déchets plastiques et de mise en place d'un recyclage efficace. L'amélioration des systèmes de valorisation et de gestion des déchets plastiques constitue donc un enjeu essentiel pour garantir un développement durable et maîtrisé du secteur plastique en Algérie.

8. Pollution par le plastique en Algérie

La pollution plastique constitue aujourd'hui l'un des principaux enjeux environnementaux en raison de l'augmentation continue de la production et de l'utilisation des matières plastiques à l'échelle mondiale. Bien que ces matériaux présentent de nombreux avantages dans différents secteurs (emballage, construction, agriculture ou encore transport), leur usage intensif, notamment sous forme de produits à usage unique, a favorisé leur accumulation dans l'environnement (**Shah, 2020 ; Atlas de plastique, 2020**).

D'une manière générale, la faible prise de conscience des consommateurs concernant le cycle de vie des plastiques, depuis leur production jusqu'à leur élimination, limite l'adoption de comportements plus responsables (**Breyne et al., 1995**). De plus, la persistance de ces matériaux dans les milieux naturels s'explique par leur très faible biodégradabilité, certains plastiques pouvant mettre plusieurs centaines d'années à se dégrader (**Wright et Kelly, 2017**).

À l'échelle mondiale, la production annuelle de plastiques atteint environ 400 millions de tonnes, dont une part importante est destinée aux emballages, ce qui accentue la pression sur les systèmes de gestion des déchets (**Atlas de plastique, 2020 ; Pietrelli et al., 2018**). Dans le contexte algérien, cette problématique est particulièrement marquée. L'augmentation de la production des déchets solides est étroitement liée à l'urbanisation rapide, au développement des activités touristiques et à la croissance des modes de consommation (**Derraik, 2002 ; Graca et al., 2017**).

Les déchets plastiques sont principalement constitués de sacs à usage unique, d'emballages alimentaires et de bouteilles, ainsi que de fragments issus de la fragmentation progressive des plastiques **(Nel et al., 2016)**.

Par ailleurs, la concentration élevée de la population dans les zones urbaines a contribué à une augmentation importante des déchets ménagers. Les systèmes de gestion existants rencontrent encore des difficultés importantes en raison de contraintes organisationnelles, techniques et comportementales, notamment le manque de tri à la source et la faible implication des citoyens **(Brahim, 2012 ; Cheniti et al., 2013)**. Malgré certaines initiatives mises en place par l'Agence Nationale des Déchets (AND) visant à promouvoir le tri et la valorisation des déchets, les résultats restent limités, en raison d'une application partielle sur le terrain et d'un manque de suivi **(Cheniti, 2014 ; AND, 2015)**.

Ainsi, la production nationale de déchets atteint environ 16 millions de tonnes par an, tandis que le taux de recyclage des plastiques ne dépasse pas 5 % **(Wamda, 2017 ; Djemaci, 2018)**. Les déchets plastiques représentent également près de 17 % des déchets ménagers, ce qui reflète leur importance dans le flux global des déchets solides **(AND, 2018)**. En outre, l'Algérie figure parmi les pays à forte consommation de sacs plastiques, avec environ 7,7 milliards de sacs utilisés chaque année, soit près de 200 sacs par habitant **(PNUE, 2023)**. Cette consommation excessive contribue fortement à l'aggravation de la pollution plastique, en particulier dans les zones urbaines et côtières.

En somme, la pollution plastique en Algérie résulte d'une combinaison de facteurs liés à la consommation élevée, à l'insuffisance des systèmes de gestion des déchets et au manque de sensibilisation environnementale. Cette situation met en évidence la nécessité de renforcer les stratégies de gestion, de réduction et de valorisation des déchets plastiques afin de limiter leur accumulation dans l'environnement.

Partie 2 : Toxicité du plastique sur la santé humaine et l'environnement

1. Origine anthropique et sources de toxicité des plastiques

La toxicité des plastiques est étroitement liée aux activités humaines, en particulier à l'augmentation progressive de leur production ainsi qu'à leur utilisation massive dans de nombreux domaines. Au fil des décennies, la production mondiale a connu une évolution considérable, passant d'environ 1,5 million de tonnes dans les années 1950 à plus de 300 millions de tonnes actuellement. Cette croissance importante a conduit à une accumulation significative des plastiques dans l'environnement (**Geyer et al., 2017 ; Plastic Europe, 2019**).

Les activités anthropiques interviennent également de manière déterminante dans la dispersion des déchets plastiques. Les rejets issus des zones urbaines, des activités industrielles ainsi que du transport maritime représentent des sources majeures de contamination. Il est généralement admis qu'une proportion importante des plastiques présents dans les océans, estimée à près de 80 %, provient de sources terrestres, en lien avec une gestion insuffisante des déchets et des eaux usées (**Mattsson et al., 2015**). Par ailleurs, le stockage non contrôlé ou le rejet direct des déchets dans l'environnement facilite leur transfert vers les milieux aquatiques et terrestres (**Jambeck et al., 2015**).

Le faible taux de recyclage constitue également un facteur aggravant. En effet, seule une fraction limitée des plastiques est recyclée, tandis que le reste est incinéré, stocké en décharge ou dispersé dans l'environnement. Cette situation favorise une pollution durable et contribue à la présence continue des plastiques dans les différents compartiments environnementaux (**Geyer et al., 2017**).

En outre, les plastiques représentent une source non négligeable de substances chimiques potentiellement toxiques. Lors de leur fabrication, différents additifs sont incorporés afin d'améliorer leurs propriétés, tels que les phtalates ou le bisphénol A (BPA). Ces composés peuvent être libérés progressivement au cours du temps et entraîner des effets néfastes sur la santé humaine, notamment des perturbations du

système endocrinien ainsi que des altérations des fonctions reproductrices (**Dematteo, 2011 ; Bryant et al., 2016**).

Ainsi, la combinaison entre une production croissante, une gestion inadéquate des déchets et la présence d'additifs chimiques explique en grande partie l'origine de la toxicité des plastiques ainsi que leurs impacts sur l'environnement et la santé humaine.

2. Formation et typologie des particules plastiques toxiques

Les plastiques présents dans l'environnement donnent naissance, au fil du temps, à des particules de très petite taille, principalement les microplastiques et les nanoplastiques.

Ces particules sont aujourd'hui considérées comme une forme importante de pollution émergente, en raison de leurs impacts écologiques et sanitaires (**Eriksen et al., 2014**).

2.1. Pollution insidieuse liée aux microplastiques

Les microplastiques constituent une pollution diffuse et persistante dans l'ensemble des compartiments environnementaux. En raison de leur petite taille, ils sont facilement dispersés dans l'air, l'eau et les sols, ce qui favorise leur contact avec les organismes vivants. Cette ubiquité augmente fortement le risque d'exposition et leur potentiel d'impact biologique et écologique.

Ils peuvent ainsi agir comme vecteurs de substances toxiques, en transportant et en concentrant divers polluants présents dans l'environnement, ce qui amplifie leur dangerosité.

2.2. Pollution émergente liée aux nanoplastiques

Les microplastiques peuvent évoluer vers une fraction encore plus fine appelée nanoplastiques, caractérisée par une taille extrêmement réduite (inférieure à 1 μm). À cette échelle, les particules présentent une surface spécifique très élevée, ce qui augmente leur réactivité et leur interaction avec les systèmes biologiques.

Cette taille réduite facilite leur passage à travers les barrières biologiques ainsi que leur accumulation dans différents tissus. De plus, les nanoplastiques peuvent adsorber divers

contaminants tels que les métaux lourds et les polluants organiques persistants, augmentant ainsi leur biodisponibilité et leur toxicité dans les chaînes alimentaires (Woodall et al., 2014 ; Seltenrich, 2015).

2.3. Importance de la taille dans la toxicité des particules plastiques

La toxicité des particules plastiques dépend fortement de leur taille. En effet, plus les particules sont petites, plus leur surface spécifique est importante, ce qui augmente leur réactivité chimique et leurs interactions avec les systèmes biologiques. (Wright, S. L. & Kelly, F. J. 2017 ; Gigault J. et al., 2018)

Ainsi, les micro- et nanoplastiques ne représentent pas uniquement une pollution physique, mais également un vecteur de toxicité physique, chimique et biologique. Leur présence peut induire divers effets biologiques tels que le stress oxydatif, les réponses inflammatoires et des perturbations cellulaires et physiologiques. (Prata, J. C. et al., 2020 ; Yee, M. S-L. et al., 2021)

3. Dispersion environnementale et voies d'exposition

La pollution plastique, notamment sous forme de microplastiques et de nanoplastiques, se caractérise par une dispersion large et multi-compartimenté au sein de l'ensemble des milieux environnementaux.

Ces particules sont aujourd'hui détectées dans l'air, les eaux de surface et profondes, ainsi que dans les sols, ce qui met en évidence leur capacité de transport à longue distance, leur persistance dans le milieu, ainsi que leur tendance à s'accumuler dans différents écosystèmes (Eriksen et al., 2014).

Dans l'atmosphère, les microplastiques peuvent être transportés sur de longues distances par les masses d'air, notamment lorsqu'ils proviennent de la fragmentation de déchets plastiques ou de la remise en suspension de particules déjà déposées.

Dans les milieux aquatiques, leur dispersion est assurée par les courants fluviaux et marins, favorisant leur dépôt dans les zones à faible hydrodynamisme, leur accumulation

dans les sédiments, ainsi que leur incorporation dans les organismes vivants (**Galgani et al., 2015 ; Browne et al., 2008**).

De même, les sols constituent un compartiment important d'accumulation et de transfert, recevant ces particules via les activités agricoles, les retombées atmosphériques et l'épandage de boues issues des stations d'épuration.

Cette présence simultanée dans l'air, l'eau et le sol favorise leur intégration progressive dans les réseaux trophiques. En effet, les organismes aquatiques et terrestres peuvent ingérer ou absorber ces particules, entraînant des phénomènes de bioaccumulation ainsi qu'un transfert trophique vers les niveaux supérieurs (**Kashiwada, 2006 ; Von Moos et al., 2012**).

Par ailleurs, les microplastiques possèdent une forte capacité d'adsorption de contaminants chimiques tels que les métaux lourds et les polluants organiques persistants, ce qui renforce leur potentiel de toxicité et leur rôle dans la diffusion des contaminants au sein des écosystèmes (**Rochman et al., 2014 ; Bakir et al., 2014**).

Chez les organismes marins, l'exposition est souvent favorisée par la confusion entre les particules plastiques et les proies naturelles, ainsi que par la colonisation de leur surface par des biofilms microbiens.

Une fois ingérées, ces particules peuvent provoquer divers effets biologiques et physiques, allant de l'obstruction du système digestif à des perturbations métaboliques et physiologiques, et peuvent être transférées le long de la chaîne alimentaire jusqu'aux niveaux trophiques supérieurs (**Wright et al., 2013 ; Cole et al., 2016**).

Enfin, chez l'être humain, l'exposition aux microplastiques se fait principalement selon trois voies complémentaires : l'ingestion d'eau et d'aliments contaminés, l'inhalation de particules en suspension dans l'air et par le contact cutané. Cette diversité des voies d'exposition met en évidence le caractère ubiquitaire de cette pollution et confirme son transfert progressif à travers les différents compartiments environnementaux jusqu'à l'homme.

4.Interactions des microplastiques avec les contaminants environnementaux

Les microplastiques constituent un support important dans la dynamique des polluants présents dans l'environnement, en raison de leur capacité à adsorber diverses substances hydrophobes. Ce phénomène de sorption représente un enjeu environnemental majeur, puisqu'il influence la mobilité, la persistance ainsi que la biodisponibilité des contaminants dans les différents compartiments écologiques.

En milieu marin, plusieurs études ont montré que les microplastiques peuvent concentrer des polluants organiques persistants (POP), tels que le DDT, les polychlorobiphényles (PCB) et les dioxines (**Mato et al., 2001 ; Teuten et al., 2009**). Ainsi, ces particules agissent comme des vecteurs de transport, facilitant la dispersion de substances toxiques dans les écosystèmes aquatiques.

Dans les environnements d'eau douce, les microplastiques interagissent également avec différents contaminants émergents, notamment les résidus pharmaceutiques, les produits de soins personnels et les retardateurs de flamme. Ces substances proviennent principalement des rejets domestiques et industriels, et s'intègrent dans des flux complexes de pollution liquide et solide (**Ashton et al., 2010**).

Les mécanismes responsables de ces interactions reposent sur des processus d'adsorption physique et chimique, ainsi que sur le remplissage des pores de la matrice polymère. La migration des contaminants est facilitée pour les molécules de faible masse moléculaire, qui diffusent plus aisément à travers la structure du plastique.

La cinétique d'adsorption dépend de plusieurs paramètres, notamment la nature du polymère, sa densité, son degré de cristallinité, ainsi que les conditions physico-chimiques du milieu environnant. De plus, les caractéristiques des polluants jouent un rôle déterminant dans l'intensité de ces interactions.

Enfin, la sorption est particulièrement favorisée dans les zones amorphes des polymères plastiques, où la structure désorganisée facilite la diffusion des contaminants. À l'inverse, les polymères présentant une forte cristallinité et des chaînes moléculaires fortement organisées montrent une capacité d'adsorption plus limitée.

5. Mécanismes de toxicité des plastiques

Les mécanismes de toxicité associés aux plastiques ne se limitent pas aux effets physiques ni à leur simple rôle de vecteurs de polluants. Ils impliquent également des interactions complexes au niveau cellulaire et moléculaire. D'après les travaux de **Robert Barouki et al. (2021)**, certains composés présents dans les plastiques peuvent se comporter comme des perturbateurs endocriniens.

Ces substances sont capables de modifier le fonctionnement du système hormonal en imitant ou en inhibant l'action des hormones naturelles, ce qui peut engendrer des effets néfastes sur le développement, la reproduction ainsi que le métabolisme.

À l'échelle cellulaire, les microplastiques et nanoplastiques peuvent provoquer un stress oxydatif en favorisant la production d'espèces réactives de l'oxygène (ROS).

Ce phénomène entraîne des altérations au niveau des macromolécules biologiques, notamment les protéines, les lipides et l'ADN, constituant ainsi un mécanisme clé de leur toxicité (**Barouki et al., 2021**). En outre, en raison de leur taille extrêmement réduite, en particulier pour les nanoplastiques, ces particules peuvent franchir les membranes biologiques et pénétrer à l'intérieur des cellules. Leur accumulation intracellulaire peut perturber plusieurs fonctions essentielles, notamment l'activité mitochondriale, ce qui affecte la production d'énergie et peut induire des processus de mort cellulaire programmée (apoptose).

Par ailleurs, des études récentes basées sur des modèles intestinaux humains in vitro ont montré que l'exposition aux microplastiques peut altérer l'intégrité de la barrière intestinale. Cette altération facilite le passage de substances toxiques vers la circulation sanguine, augmentant ainsi les risques d'effets systémiques (**Bard, 2025**). L'exposition prolongée aux microplastiques est également associée à l'apparition de réponses

inflammatoires chroniques, pouvant contribuer au développement de diverses pathologies. L'intensité de ces effets dépend non seulement de la dose d'exposition, mais aussi de la taille des particules, les plus petites étant généralement les plus réactives et potentiellement les plus toxiques.

Enfin, les microplastiques jouent un rôle important dans le transfert des contaminants chimiques le long de la chaîne alimentaire. Ils sont d'abord ingérés par les organismes de bas niveau trophique, puis transmis aux niveaux supérieurs, jusqu'à l'Homme, ce qui augmente le risque d'une exposition chronique à des substances potentiellement dangereuses.

6. Effets toxiques sur la santé humaine

L'exposition aux particules plastiques et aux composés chimiques associés peut entraîner divers effets toxiques sur la santé humaine, dont la nature dépend des propriétés des substances impliquées ainsi que de la durée d'exposition.

En effet, bien que les polymères soient généralement considérés comme peu réactifs, les risques toxicologiques sont principalement liés aux monomères résiduels et aux additifs incorporés lors de leur fabrication (**Andrady, 2003 ; Verghese et al., 2012**).

Au niveau cellulaire, certains composés libérés par les plastiques peuvent induire des effets cytotoxiques en perturbant le fonctionnement normal des cellules. Des substances telles que le styrène ou le chlorure de vinyle sont reconnues pour leur toxicité et leur potentiel cancérigène, pouvant provoquer des altérations cellulaires lors d'une exposition prolongée (**Verghese et al., 2012**).

Les effets toxiques peuvent se manifester sous forme aiguë ou chronique. L'exposition aiguë correspond à un contact de courte durée mais à forte dose, pouvant provoquer des réactions immédiates telles que des irritations ou des troubles physiologiques. À l'inverse, l'exposition chronique résulte d'un contact prolongé à faibles doses, entraînant des effets à long terme souvent plus difficiles à détecter, tels que des perturbations hormonales ou des pathologies dégénératives.

Les additifs plastiques, notamment les phtalates et les polybromodiphényléthers (PBDE), sont fortement impliqués dans ces effets. Les phtalates, utilisés comme plastifiants dans le PVC, peuvent migrer vers l'environnement puis pénétrer dans l'organisme humain. Ils agissent comme perturbateurs endocriniens, affectant le système reproducteur en réduisant la fertilité masculine et en augmentant le risque de cancers hormonodépendants, notamment de la prostate et des testicules (**Lewis, 2012 ; Andradý, 2003**).

Le système immunitaire peut également être affecté par une exposition prolongée à ces substances, en raison de leur capacité à induire des déséquilibres biologiques et des réponses inflammatoires.

De plus, certains métaux lourds présents dans les additifs plastiques, comme le plomb, exercent une toxicité spécifique en perturbant la biosynthèse de l'hémoglobine, pouvant conduire à une anémie. Ce métal présente également une affinité particulière pour le système nerveux, entraînant des effets neurotoxiques dont la gravité dépend de la durée et de l'intensité de l'exposition (**WHO, 2023**).

Au niveau du système nerveux, ces substances peuvent provoquer des altérations fonctionnelles, en particulier lors d'expositions prolongées ou à des périodes sensibles du développement, ce qui peut se traduire par des troubles neurologiques ou une diminution des capacités physiologiques.

Par ailleurs, certains plastiques utilisés dans les emballages alimentaires peuvent être à l'origine d'une contamination indirecte. Par exemple, le polyéthylène téréphtalate (PET), bien que considéré comme relativement stable, peut libérer des traces de composés tels que le trioxyde d'antimoine, notamment sous l'effet de la chaleur, favorisant ainsi le transfert de substances potentiellement toxiques vers les aliments (**Verghese et al., 2012**).

Ainsi, les effets toxiques des plastiques sur la santé humaine résultent principalement de l'exposition aux substances chimiques associées, pouvant affecter différents systèmes

biologiques, notamment les systèmes cellulaire, immunitaire, reproducteur et nerveux, et contribuer au développement de pathologies à court ou à long terme.

7. Impact écotoxicologique sur l'environnement

La pollution plastique engendre des impacts éco-toxicologiques significatifs sur l'environnement, en affectant à la fois le biotope (milieu physique) et la biocénose (ensemble des organismes vivants). Ces effets résultent principalement de l'accumulation des déchets plastiques ainsi que de la libération de substances chimiques associées.

Sur le plan du biotope, la présence de plastiques contribue à la dégradation des propriétés physico-chimiques des sols, notamment par l'accumulation progressive de contaminants issus des déchets et des activités anthropiques. Le sol constitue également un compartiment majeur de stockage des microplastiques, en raison des dépôts atmosphériques, des activités agricoles et de l'épandage de boues issues des stations d'épuration. Cette accumulation peut altérer la structure du sol, réduire sa fertilité et perturber l'activité biologique des organismes édaphiques (**Desachy, 2001**).

De même, les milieux aquatiques sont fortement impactés, que ce soit directement par le rejet de déchets plastiques dans les cours d'eau et les océans, ou indirectement par le ruissellement et les précipitations atmosphériques (**Desachy, 2013**). Cette contamination favorise la présence de métaux lourds et d'autres substances toxiques dans l'eau, altérant ainsi sa qualité et son équilibre écologique (**Louhui, 1996**).

Concernant l'air, la combustion des matières plastiques libère divers composés toxiques, notamment des hydrocarbures, des phénols et certains gaz acides, contribuant à la

dégradation de la qualité de l'air, au réchauffement climatique ainsi qu'à la formation de pluies acides **(Reichl, 2004 ; Masclet, 2005 ; Elichegaray, 2008)**.

Sur le plan de la biocénose, les impacts sont également importants et concernent l'ensemble des organismes vivants. Chez les animaux, en particulier marins, l'ingestion de débris plastiques est fréquente en raison de leur confusion avec les proies naturelles, pouvant entraîner des occlusions digestives, une réduction de l'apport alimentaire, voire la mortalité **(Derraik, 2002 ; Rios et al., 2007)**. Par ailleurs, les déchets plastiques peuvent limiter la mobilité des espèces ou provoquer leur piégeage, augmentant ainsi les risques de blessure ou de noyade.

Les végétaux ne sont pas épargnés, puisque les polluants associés aux plastiques peuvent être absorbés par les racines ou via l'atmosphère, entraînant des perturbations physiologiques, notamment au niveau de la photosynthèse et de la reproduction **(Goyffon et al., 2009)**.

Enfin, ces contaminants peuvent être transférés le long des chaînes alimentaires via les processus de bioaccumulation et de biomagnification. Les substances toxiques, qu'elles soient directement présentes dans les plastiques ou adsorbées à leur surface, peuvent ainsi être transmises d'un organisme à un autre jusqu'aux niveaux trophiques supérieurs, perturbant l'équilibre des écosystèmes **(Ramade, 2006)**.

Ainsi, la pollution plastique constitue une menace majeure pour l'environnement, en altérant les milieux naturels et en perturbant durablement le fonctionnement des écosystèmes, avec des conséquences importantes sur la biodiversité.

Partie 3: Dégradation du plastique

1.Généralité

La dégradation d'un matériau se définit comme une altération progressive de ses propriétés physico-chimiques, entraînant une diminution de ses performances initiales au cours du temps (**Vert et al., 1992**). Dans le cas des polymères plastiques, ce phénomène résulte essentiellement de transformations affectant l'organisation des macromolécules ou de la rupture des chaînes polymériques constituant la structure du matériau.

Selon l'intensité des transformations, la dégradation peut se manifester sous différentes formes. Elle peut être limitée, conduisant à la formation de fragments macromoléculaires de plus faible taille, tout en conservant une structure chimique proche de celle du matériau d'origine. À un stade plus avancé, elle implique une scission significative des chaînes polymériques sous l'effet de processus chimiques, tels que l'hydrolyse ou l'oxydation, ou encore sous l'action d'agents biologiques, notamment les micro-organismes et les enzymes (**Vert et al., 1992**).

Les produits issus de cette transformation peuvent évoluer selon plusieurs voies. Ils peuvent persister dans l'environnement sous forme de résidus dispersés, ou être intégrés dans des cycles biologiques naturels, conduisant à leur conversion en composés simples tels que le dioxyde de carbone (CO₂) et l'eau. Par ailleurs, ces produits peuvent être assimilés par des micro-organismes et participer ainsi à la formation de biomasse.

D'un point de vue général, la dégradation des plastiques se répartit en deux grandes catégories. La dégradation abiotique résulte de l'action de facteurs physico-chimiques tels que la lumière, la chaleur, l'oxygène ou l'humidité.

Et la dégradation biotique implique l'intervention d'organismes vivants, en particulier les micro-organismes, qui assurent la transformation progressive des polymères (**Calmon-Déciaud et al., 1998**). En conditions naturelles, ces deux mécanismes agissent souvent de manière conjointe, conduisant à différents niveaux de transformation, allant de la simple fragilisation à la fragmentation puis à la solubilisation du matériau.

Sur le plan normatif, plusieurs organismes ont proposé des définitions précises de la dégradation. Selon l'ISO, il s'agit d'une modification de la structure chimique d'un matériau plastique entraînant une altération de ses propriétés (**ISO 472, 1988 ; Vert et al., 1992**). De manière complémentaire, l'ASTM et le CEN définissent la dégradation comme un processus irréversible caractérisé par des changements significatifs de la structure du matériau, incluant notamment une diminution de la masse molaire, de la résistance mécanique ou de l'intégrité globale, pouvant aboutir à une fragmentation progressive.

Enfin, les polymères plastiques peuvent subir différents mécanismes de dégradation, tels que la photodégradation sous l'effet des rayonnements ultraviolets, la thermodégradation liée à l'élévation de la température, la dégradation chimique par oxydation ou hydrolyse, la dégradation mécanique sous l'effet de contraintes physiques, ainsi que la biodégradation assurée par l'action des micro-organismes (**Lacoste et Carlsson, 1992 ; Fare et al., 1999 ; Bode et al., 2001 ; Shang et al., 2003 ; Enoki et al., 2003**).

2. Mécanismes de dégradation du plastique

La dégradation des polymères synthétiques est un phénomène complexe pouvant être classé de manière générale en deux grandes catégories principales à savoir la dégradation biotique et la dégradation abiotique.

Ces deux formes de dégradation se distinguent par leurs mécanismes et sont influencées par divers facteurs physiques, chimiques et biologiques présents dans l'environnement.

De façon globale, les polymères peuvent être affectés par plusieurs mécanismes de dégradation, notamment :

- La photodégradation, principalement causée par les rayonnements ultraviolets (UV) ;
- La dégradation physique, qui regroupe les effets thermiques et mécaniques ;
- La dégradation chimique, incluant notamment l'oxydation et l'hydrolyse et ;
- La biodégradation, résultant de l'activité de micro-organismes tels que les bactéries, champignons et algues.

Ces différents mécanismes sont représentés précédemment dans la Figure 3 (**Gu, 2003 ; Shah et al., 2008 ; Singh et Sharma, 2008 ; Debroas et al., 2017**).

2.1. Dégradation abiotique du plastique

La dégradation abiotique correspond à l'ensemble des modifications des propriétés physico-chimiques des plastiques causées par des facteurs non biologiques tels que la lumière, la température, l'oxygène, l'eau ou encore les contraintes mécaniques (**Andrady, 2015**).

Dans la majorité des cas, ce type de dégradation intervient avant la biodégradation, en raison de la faible disponibilité des polymères pour les organismes vivants dans les milieux naturels (**Andrady, 2015**).

Toutefois, il est important de noter que de nombreux plastiques présents dans l'environnement possèdent un caractère hydrophobe et une très faible solubilité dans l'eau. Ainsi, des polymères tels que le polyéthylène (PE), le polypropylène

(PP), le polystyrène (PS) et le polyéthylène téréphtalate (PET) présentent une dégradation extrêmement lente, voire presque inexistante sur de longues périodes (**Andrady, 2015**).

2.1.1. Photodégradation du plastique

La dégradation des polymères débute souvent à l'échelle moléculaire à travers un processus de photo-oxydation déclenché par les rayonnements ultraviolets (**Andrady, 2011**).

En milieu aquatique, ce processus est généralement plus lent que sur les surfaces terrestres, en raison d'une exposition réduite à la lumière et de conditions environnementales moins favorables. Ainsi, les plastiques peuvent persister dans les milieux aquatiques pendant de très longues périodes, allant de plusieurs décennies à plusieurs siècles.

Ce mécanisme repose essentiellement sur des réactions radicalaires initiées par l'absorption du rayonnement solaire. Les UV-B (290–315 nm) ainsi que les UV-A (315–400 nm) sont les principales longueurs d'onde impliquées dans l'initiation de ces réactions (**Liu et al., 2019**).

2.1.2 Dégradation thermique

La dégradation thermique correspond à l'altération des plastiques sous l'effet de températures élevées.

À haute température, les polymères peuvent subir des réactions thermo-oxydatives. Lorsque l'énergie thermique dépasse le seuil d'activation, les chaînes macromoléculaires se rompent, entraînant la formation de radicaux libres (**Peterson et al., 2001 Pirsheeb et al., 2020**).

Ce phénomène dépend principalement des caractéristiques thermiques du polymère ainsi que de la disponibilité en oxygène dans le milieu (**Crawford et Quinn, 2017**).

Par ailleurs, l'association de la température élevée et des rayonnements ultraviolets peut engendrer un effet synergique, accélérant ainsi les processus d'oxydation. En conséquence, l'augmentation de la température favorise globalement la vitesse de dégradation (**Andrady et al., 2003 ; Kamweru et al., 2011**).

De plus, la présence d'humidité peut réduire l'énergie nécessaire à l'activation des réactions, ce qui facilite la dégradation thermique des polymères (**Kotoyori, 1972**).

2.1.3. Dégradation chimique du plastique

La dégradation chimique est principalement liée aux transformations des additifs intégrés dans la matrice polymérique. Ces modifications provoquent une altération progressive des propriétés du matériau et contribuent à sa fragilisation structurale (**Duwez & Nysten, 2001**).

2.1.4. Dégradation mécanique du plastique

La dégradation mécanique représente un mécanisme important de fragmentation des plastiques, notamment dans les milieux aquatiques. Elle correspond à la désintégration des matériaux sous l'effet de contraintes physiques externes (**Zhang et al., 2021**). Dans les environnements naturels, ces contraintes sont principalement dues aux chocs répétés et à l'abrasion des plastiques contre les surfaces rocheuses, sous l'action du vent et des vagues (**Zhang et al., 2021**). Les cycles de gel et de dégel peuvent également contribuer à intensifier cette fragmentation (**Pal et al., 2018**).

Ainsi, la dégradation mécanique ne se limite pas à une simple réduction de taille, mais provoque également une augmentation de la surface spécifique des particules, ce qui peut accroître leur réactivité et leur interaction avec le milieu environnant (Zhang et al., 2021).

2.2. Biodégradation ou dégradation biotique du plastique

La biodégradation désigne l'ensemble des processus par lesquels des organismes vivants participent à la transformation et à la décomposition des matières organiques, incluant certains polymères synthétiques.

Selon les conditions du milieu, ce processus peut se dérouler sous différentes formes (Gu et al., 2000) :

- **Conditions aérobies** : en présence d'oxygène, la dégradation conduit principalement à la formation de dioxyde de carbone (CO_2) et d'eau.
- **Conditions anaérobies** : en absence d'oxygène, notamment dans les sédiments ou les décharges, elle génère du CO_2 , de l'eau ainsi que du méthane (CH_4).
- **Conditions semi-aérobies** : observées par exemple dans les milieux de compostage, où la disponibilité en oxygène varie.

Dans ce contexte, la dégradation partielle des chaînes polymériques entraîne une diminution temporaire de la stabilité du matériau. Elle résulte de l'action directe ou indirecte des organismes vivants sur les plastiques. Cette action peut être de nature mécanique (morsures, fragmentation, ingestion) ou de nature biochimique via des réactions enzymatiques (Cadee, 2002 ; Dawson et al., 2018 ; Jang et al., 2018 ; Danso et al., 2019 ; Porter et al., 2019 ; Cau et al., 2020 ; Mateos-Cardenas et al., 2020).

Les micro-organismes, en particulier les bactéries et les champignons, ainsi que certains insectes, sont considérés comme les principaux facteurs de ce processus de dégradation (Crawford et Quinn, 2017).

2.2.1. Dégradation microbienne

La dégradation microbienne correspond à l'activité des micro-organismes capables de produire des enzymes responsables de la dépolymérisation des plastiques, entraînant ainsi leur transformation progressive (**Kale et al., 2015**).

Ce processus est principalement assuré par les bactéries et les champignons, qui peuvent agir sur différents types de plastiques, qu'ils soient naturels ou synthétiques. Il peut se produire dans divers environnements favorables au développement microbien (**Moharir et Kumar, 2019**).

Parmi les champignons impliqués dans ce processus, on retrouve plusieurs genres tels que *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Cladosporium*, *Verticillium*, *Thermomyces*, *Lecanicillium* et *Mortierella*, connus pour leur capacité à dégrader les polymères.

2.2.2. Dégradation enzymatique

La biodégradation repose largement sur l'action de différentes enzymes microbiennes appartenant à plusieurs familles, notamment les hydrolases, les oxydoréductases, les déhalogénases, les oxygénases et les transférases (**Saravanan et al., 2021**).

Parmi celles-ci, les hydrolases et les oxydoréductases jouent un rôle majeur dans la dégradation des composés hydrophobes, notamment certains additifs plastiques (**Carmen, 2021**).

Les polymères peuvent être classés en deux catégories selon leur sensibilité enzymatique : les polymères hydrolysables et les polymères non hydrolysables. Cette distinction dépend principalement de la présence de liaisons ester ou amide, susceptibles d'être attaquées par des enzymes extracellulaires.

Les polymères non hydrolysables tels que le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP) et le PVC présentent une dégradation enzymatique plus lente et plus complexe (**Santo et al., 2013**). Néanmoins, certaines enzymes d'origine fongique ont montré une capacité à réduire la longueur des chaînes du PE (**Sanchez, 2019**).

À l'inverse, les polymères hydrolysables comme le PET, le polyamide (PA) et le polyuréthane (PUR) sont généralement plus facilement biodégradables, grâce à l'existence de voies enzymatiques similaires à celles impliquées dans la dégradation de la cellulose ou des protéines (**Chen et al., 2019**).

Différentes enzymes interviennent dans ces processus : la cutinase, la lipase et certaines estérases participent à l'hydrolyse du PET ; la protéase, l'amidase et la cutinase sont impliquées dans la dégradation du PA ; les estérases et hydrolases bactériennes et fongiques interviennent dans l'hydrolyse du PUR (**Akutsu et al., 1998 ; Guebitz et Cavaco-Paulo, 2008 ; Russell et al., 2011**).

3. Facteurs influençant la dégradation des plastiques

La dégradation et la fragmentation des microplastiques (MP) dépendent d'un ensemble de facteurs variés, incluant des paramètres environnementaux, physico-chimiques ainsi que les caractéristiques intrinsèques des polymères (**Figure 8**).

Parmi ces facteurs, les conditions d'exposition dans le milieu naturel jouent un rôle essentiel. En effet, le vieillissement des plastiques exposés à l'environnement entraîne progressivement leur fragmentation en particules de plus en plus fines, pouvant atteindre l'échelle nanométrique.

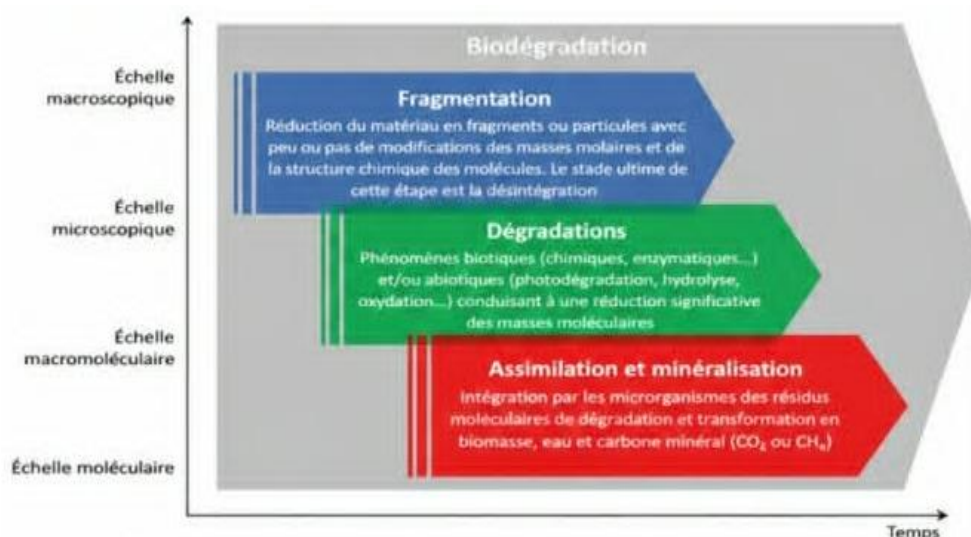


Figure 8:Processus de biodégradation des plastiques (Lagneta et al.2020)

Ce processus s'accompagne également de transformations chimiques des fragments plastiques, aboutissant à la formation de composés organiques non polymériques. Ces derniers peuvent ensuite subir des étapes successives de dégradation biologique et chimique jusqu'à leur minéralisation (**Müller et al., 2001**).

Un autre facteur déterminant est lié aux propriétés intrinsèques des polymères, notamment leur densité et leur degré de cristallinité. Les zones cristallines correspondent à des régions où les chaînes polymériques sont fortement ordonnées et compactes, ce qui réduit l'accessibilité des agents dégradants. Par ailleurs, la cristallinité influence plusieurs propriétés physiques du matériau, telles que la densité et la perméabilité. Ces paramètres conditionnent ensuite le comportement du polymère vis-à-vis de l'eau, notamment l'hydratation et le gonflement, ce qui impacte directement l'accès des micro-organismes aux sites susceptibles d'être colonisés (**Lambert et Wagner, 2018**).

En outre, les additifs chimiques incorporés dans les plastiques constituent également un facteur important. Leur nature ainsi que leur concentration peuvent influencer fortement la vitesse de dégradation. Les additifs stabilisants, tels que

les antioxydants ou les agents antimicrobiens, ont pour effet de ralentir le vieillissement des matériaux et d'augmenter leur durée de vie. À l'inverse, certains additifs d'origine biologique peuvent favoriser des processus de dégradation plus rapides en facilitant la fragmentation ou l'altération du polymère.

Enfin, la structure moléculaire du polymère représente également un facteur limitant. En effet, plus la structure est complexe et organisée, plus la résistance du matériau à la dégradation est élevée. Cela se traduit par un ralentissement des processus de fragmentation ainsi que de biodégradation.

Partie 4 : Approches biologiques et alternatives naturelles pour la dégradation du plastique

1.Introduction

Au cours des dernières décennies, l'utilisation des matières plastiques a considérablement augmenté, en raison de leurs nombreuses propriétés avantageuses, notamment leur légèreté, leur résistance et leur faible coût. Toutefois, cette utilisation intensive s'accompagne de conséquences préoccupantes sur le plan environnemental et sanitaire. En effet, les plastiques se distinguent par leur grande résistance à la dégradation, ce qui entraîne leur accumulation dans l'environnement. De plus, ils peuvent adsorber ou libérer des substances toxiques, représentant ainsi un danger potentiel pour les écosystèmes et la santé humaine. Afin de faire face à cette problématique, différentes méthodes conventionnelles de gestion des déchets plastiques ont été mises en place, notamment le recyclage, l'incinération et l'enfouissement en décharge. Cependant, ces approches présentent plusieurs limites. Le recyclage, par exemple, demeure restreint en raison de la dégradation progressive des propriétés des polymères après plusieurs cycles d'utilisation. Par ailleurs, l'incinération des plastiques conduit à l'émission de composés toxiques tels que les dioxines et les furanes, reconnus pour leurs effets nocifs, en particulier leur caractère cancérigène (**Commission européenne, 2011**). D'autre part, l'enfouissement en décharge, bien qu'il soit largement pratiqué, engendre également des impacts environnementaux significatifs, notamment la pollution des sols, la contamination des eaux souterraines et l'occupation excessive des surfaces terrestres. Ainsi, ces méthodes classiques apparaissent insuffisantes pour faire face à l'augmentation continue des déchets plastiques. Dans ce contexte, des alternatives plus respectueuses de l'environnement ont émergé, en particulier les approches basées sur la biodégradation.

Ce processus naturel repose sur l'action de micro-organismes, tels que les bactéries et les champignons, capables de transformer les polymères plastiques en composés plus simples et moins toxiques. Par conséquent, la biodégradation représente une solution prometteuse pour une gestion durable et écologique des déchets plastiques (**Seneviratne et al., 2006**).

2.Approches biologiques : de la lutte biologique à la bioremédiation

2.1. Dégradation du plastique par les champignons (Mycoremédiation)

2.1.1. Généralités sur les champignons

Les champignons, également appelés mycètes ou fungi, représentent un règne indépendant d'organismes eucaryotes. Ils se distinguent par la présence d'une paroi cellulaire riche en chitine ainsi qu'un appareil végétatif simple nommé thalle, qui peut être soit unicellulaire comme chez les levures, soit pluricellulaire sous forme d'hyphes constituant le mycélium (**Boiron, 2005 ; Djelali, 2021**). Contrairement aux plantes, ces organismes ne possèdent pas de chlorophylle et sont donc incapables de réaliser la photosynthèse. Ils adoptent ainsi un mode de nutrition hétérotrophe basé sur l'absorption de la matière organique disponible dans leur milieu (**Dighton, 2003**). Selon leur mode de vie, les champignons peuvent être saprophytes, parasites ou encore vivre en symbiose avec d'autres organismes (**Romagnesi, 1970**). Grâce à ces caractéristiques, ils occupent une place essentielle dans les écosystèmes, notamment dans les processus de décomposition et de recyclage de la matière organique. Leur aptitude à sécréter des enzymes extracellulaires leur permet de dégrader des substrats complexes en molécules plus simples facilement assimilables (**Saadi, 2008**).

2.1.2 Rôle des champignons dans la biodégradation

La biodégradation désigne un processus biologique durant lequel des micro-organismes, en particulier les champignons, altèrent la structure chimique des matériaux tels que les plastiques, en les transformant en composés plus simples (**ISO 472, 2013**).

Ce phénomène s'effectue généralement selon trois étapes principales.

La première correspond à la fragmentation, où le matériau est décomposé en particules de plus petite taille sous l'effet de facteurs physiques, chimiques ou biologiques **(Calmon-Decriaud et al., 1998)**.

Ensuite, intervient la bioassimilation, durant laquelle les micro-organismes utilisent ces fragments comme source de nutriments.

Enfin, la minéralisation permet la conversion des composés assimilés en produits simples comme le dioxyde de carbone et l'eau en conditions aérobies, ou en méthane en conditions anaérobies **(NFU 52001, 2005)**.

Les champignons présentent une efficacité particulière dans ce processus grâce à leur organisation filamenteuse. Leurs hyphes leur permettent de pénétrer au cœur des matériaux, augmentant ainsi les interactions avec les polymères **(Sanchez, 2019)**. Par ailleurs, la production de composés de surface tels que les hydrophobines favorise leur adhésion aux plastiques et améliore leur capacité de dégradation **(Yogalakshmi et Singh, 2020)**.

2.1.3. Capacité enzymatique des champignons

Le pouvoir de biodégradation des champignons est étroitement lié à leur arsenal enzymatique. Ces micro-organismes produisent des enzymes extracellulaires capables d'attaquer les liaisons chimiques des polymères plastiques, notamment les liaisons carbone-carbone et carbone-oxygène, conduisant ainsi à leur dépolymérisation **(Reddy et Matthew, 2001)**. Parmi les enzymes les plus impliquées dans ces mécanismes, on retrouve : les laccases, qui participent à l'oxydation des composés aromatiques **(Nunes et Kunamneni, 2018)** ; les peroxydases, telles que la lignine peroxydase et la manganèse peroxydase, impliquées dans la dégradation oxydative de polymères complexes **(Tuor et al., 1995)** ; les cutinases et lipases, capables d'hydrolyser les polyesters **(Chen et al., 2013)** ; ainsi que le cytochrome P450, jouant un rôle dans l'oxydation des xénobiotiques **(Fontana, 2005)**.

L'action combinée de ces enzymes permet de réduire la taille des polymères, facilitant leur transformation en molécules de faible masse molaire, plus facilement assimilables par les cellules fongiques **(Srikanth et al., 2022)**.

2.1.4. Champignons impliqués dans la dégradation des plastiques

De nombreuses recherches ont mis en évidence la capacité de différentes espèces fongiques à intervenir dans la dégradation des plastiques. Ainsi, **Ibrahim et al. (2011)** ont isolé plusieurs souches capables de dégrader le polyuréthane, avec des réductions de masse importantes observées notamment chez *Fusarium solani* et *Aspergillus flavus*. Dans une autre étude, **Saenz et al. (2019)** ont démontré que *Aspergillus niger* et *Aspergillus terreus* peuvent dégrader le polyéthylène (LDPE), avec une perte de masse pouvant atteindre 30 %, même en conditions nutritionnelles limitées. Par ailleurs, d'autres travaux ont montré que certaines espèces comme *Penicillium chrysogenum* et *Aspergillus clavatus* entraînent des modifications visibles de la structure du plastique, notamment la formation de fissures et l'apparition de nouveaux groupements fonctionnels (**Gajendiran et al., 2016 ; Zhang et al., 2019**).

Les champignons de la pourriture blanche, tels que *Phanerochaete chrysosporium*, présentent une efficacité remarquable grâce à leur système enzymatique oxydatif peu spécifique, leur permettant de dégrader des composés complexes comme la lignine ainsi que certains polymères plastiques (**Pointing, 2001 ; Borràs et al., 2010**). Enfin, selon **Ekanayaka et al. (2022)**, environ 395 souches fongiques appartenant principalement aux Ascomycètes et aux Basidiomycètes ont été identifiées comme capables de participer à la dégradation des plastiques.

2.1.5. Champignons étudiés

Dans le cadre de cette étude, l'intérêt a été porté sur deux genres fongiques reconnus pour leur potentiel dans la biodégradation :

2.1.5.1. *Trichoderma*

Le genre *Trichoderma* regroupe des champignons filamenteux fréquemment retrouvés dans le sol. Ces champignons se distinguent par leur croissance rapide sur les milieux de culture. Au cours de leur développement, le mycélium apparaît d'abord blanc puis prend progressivement une coloration verte due à la formation des conidies.

Les espèces appartenant à ce genre sont largement exploitées dans plusieurs domaines biotechnologiques grâce à leur capacité à produire diverses enzymes extracellulaires, notamment les cellulases, les protéases et les laccases, impliquées dans la dégradation des matières organiques complexes (**Kubicek et al., 2003**). Plusieurs recherches ont également montré que les espèces du genre *Trichoderma* peuvent intervenir dans les mécanismes de biodégradation des plastiques. Cette capacité est liée à leur forte activité enzymatique ainsi qu'à leur aptitude à s'adapter à différentes conditions environnementales. De plus, leur capacité de colonisation des surfaces leur permet de participer efficacement aux processus de bioremédiation environnementale.

2.1.5.2 *Aspergillus niger*

Aspergillus niger est un champignon microscopique largement distribué dans l'environnement, principalement dans le sol et les matières organiques en décomposition. Il est caractérisé par un mycélium filamenteux accompagné de spores noires facilement observables sur les milieux de culture. Cette espèce est particulièrement connue dans les domaines industriels et biotechnologiques en raison de son importante production enzymatique.

D'après plusieurs études, *Aspergillus niger* possède la capacité de participer à la dégradation de certains polymères plastiques, notamment le polyéthylène. Cette activité est liée à la production d'enzymes oxydatives et hydrolytiques capables d'altérer la structure des polymères (**Saenz et al., 2019**). Après incubation, différentes modifications peuvent être observées à la surface du plastique, telles que l'apparition de fissures ainsi qu'une réduction de la masse du matériau. Ainsi, *Aspergillus niger* représente l'un des champignons les plus étudiés dans les travaux portant sur la biodégradation des plastiques.

3. Dégradation des plastiques par les bactéries (bioremédiation)

3.1. Généralités sur les bactéries

Les bactéries sont des organismes microscopiques unicellulaires appartenant aux procaryotes, caractérisées par l'absence de noyau vrai ainsi que d'organites membranaires. Elles sont présentes dans une grande variété de milieux, notamment le sol, l'eau, l'air, ainsi que dans les organismes vivants **(Kara, 2011 ; Dominique, 2009)**. Du point de vue métabolique, les bactéries présentent une diversité importante. Certaines espèces adoptent un mode de nutrition hétérotrophe en utilisant la matière organique comme source d'énergie et de carbone, tandis que d'autres sont autotrophes et exploitent des composés minéraux pour assurer leur croissance **(Dimitrov et al., 2011)**. En outre, elles peuvent être classées selon leurs besoins en oxygène en bactéries aérobies ou anaérobies **(Pikranjit, 2017)**. Grâce à leur grande capacité d'adaptation, les bactéries sont capables de coloniser presque tous les environnements.

Cependant, malgré cette diversité, seules quelques espèces ont été étudiées pour leur rôle dans la biodégradation des plastiques, la majorité des recherches étant réalisées en conditions de culture pure **(Dimitrov et al., 2011)**. Par ailleurs, plusieurs travaux ont montré que certaines bactéries peuvent dégrader différents types de polymères, qu'ils soient naturels ou synthétiques, en les utilisant comme source de carbone et d'énergie, principalement à travers des mécanismes de minéralisation **(Yogalakshmi et Singh, 2020)**.

3.2. Enzymes bactériennes impliquées

La biodégradation des plastiques par les bactéries repose essentiellement sur la production d'enzymes extracellulaires capables d'attaquer la structure des polymères et de les transformer en composés plus simples.

De manière générale, ce processus débute par une étape d'hydrolyse enzymatique, suivie de réactions d'oxydation qui permettent la dégradation progressive des macromolécules plastiques **(Chandra et al., 1998)**.

Parmi les enzymes impliquées dans ce phénomène, on peut citer : les hydrolases, responsables de la rupture des liaisons chimiques par hydrolyse ; les oxydases et peroxydases, intervenant dans les réactions d'oxydation ; ainsi que certaines enzymes spécifiques comme la PETase et la MHETase, connues pour leur capacité à dégrader le polyéthylène téréphtalate (PET) (**Yoshida et al., 2016**). Ces différentes enzymes assurent la transformation des polymères en molécules intermédiaires, qui sont ensuite assimilées par les bactéries comme source d'énergie et de carbone.

3.3. *Bacillus subtilis*

Bacillus subtilis est une bactérie largement étudiée dans les domaines de la biodégradation et du biocontrôle, en raison de sa grande capacité d'adaptation à différents milieux et de sa production de nombreux composés biologiquement actifs. Il s'agit d'une bactérie Gram positif, sporulée, très répandue dans les sols. Cette espèce est particulièrement connue pour sa capacité à produire des substances antimicrobiennes ainsi que diverses enzymes extracellulaires impliquées dans la dégradation de matières organiques complexes (**Yogalakshmi et Singh, 2020**).

Selon Sharga et Lyon (1998), la souche *Bacillus subtilis* BS 107 est capable de synthétiser des composés à activité antibiotique qui inhibent la croissance de plusieurs bactéries et champignons phytopathogènes. Les auteurs ont également montré que ces substances gardent leur efficacité dans différentes conditions de température et de pH, ce qui traduit leur stabilité. De plus, cette souche présente un effet antagoniste notable contre *Erwinia carotovora*, agent responsable de la jambe noire et de la pourriture molle de la pomme de terre (**Sharga et Lyon, 1998**).

Par ailleurs, les travaux de **Utkhede (1984)** ont montré que certaines souches de *Bacillus subtilis* peuvent freiner le développement de *Phytophthora cactorum*, responsable de la pourriture du collet chez le pommier. Cette activité est essentiellement liée à la production d'antibiotiques diffusibles et d'enzymes extracellulaires qui limitent la croissance des microorganismes pathogènes (**Utkhede, 1984**). Enfin, en plus de son rôle dans le biocontrôle, *Bacillus subtilis* intervient également dans certains processus de biodégradation environnementale.

Plusieurs études ont rapporté sa capacité à participer à la dégradation partielle de certains polymères plastiques grâce à ses capacités enzymatiques et métaboliques (**Giacomucci et al., 2019**). Ainsi, cette bactérie représente un microorganisme prometteur dans les stratégies de bioremédiation et de réduction de la pollution plastique (**Yogalakshmi et Singh, 2020**)

4. Micro-organismes du sol

4.1 Diversité microbienne du sol

Le sol peut être considéré comme un milieu vivant complexe, caractérisé par une richesse importante en micro-organismes. Il abrite en effet plusieurs groupes d'organismes microscopiques, notamment les bactéries et les champignons, ainsi que les protozoaires et les algues unicellulaires, qui interagissent en permanence entre eux et avec leur environnement (**Grima et al., 2002**). Cette diversité microbienne joue un rôle essentiel dans le maintien de l'équilibre biologique du sol.

4.2 Rôle dans la fertilité du sol

Selon **Davet (1996)**, l'activité des micro-organismes dans le sol est très importante et influence directement la croissance des plantes. Ces micro-organismes interviennent dans les cycles biogéochimiques, en particulier ceux du carbone et de l'azote, en assurant la transformation de la matière organique en éléments minéraux assimilables (**Lashermes, 2023**). Ce processus permet d'enrichir le sol en nutriments et contribue ainsi à sa fertilité (**Abbadie, 2018**).

En outre, les micro-organismes du sol jouent un rôle majeur dans la décomposition de la matière organique. Les bactéries et les champignons hétérotrophes assurent la dégradation des résidus d'origine végétale et animale en composés plus simples, ce qui facilite le recyclage de la matière dans l'écosystème (**Saadi, 2008**). Certains champignons saprotrophes, notamment les espèces ligninolytiques, sont capables de dégrader des composés complexes tels que la lignine (**Lahna, 2018**).

4.3 Rôle dans la dégradation des plastiques

Les micro-organismes constituent une solution naturelle intéressante pour la dégradation des polluants, notamment les plastiques. Cette capacité est liée à leur activité enzymatique.

Les enzymes produites par ces micro-organismes agissent comme des catalyseurs biologiques qui accélèrent les réactions de dégradation des polymères (**Grima, 2002**). On distingue les exoenzymes, qui agissent au niveau des extrémités des chaînes en libérant des monomères, et les endoenzymes, qui provoquent la rupture interne des chaînes polymériques (**Amer et al., 2007**).

La biodégradation des plastiques se déroule en plusieurs étapes successives. Elle commence par l'adhésion des micro-organismes à la surface du matériau, suivie par la formation de biofilms (**Lobelle et Cunliffe, 2011**). Ensuite, les polymères sont progressivement dégradés en molécules plus petites grâce à l'action enzymatique, puis transformés en produits finaux tels que le dioxyde de carbone, l'eau et parfois le méthane (**Tokiwa et al., 2009**).

Ce processus peut se produire en conditions aérobies ou anaérobies selon la disponibilité en oxygène (**Priyanka et Archana, 2012**). Certaines espèces microbiennes présentent un potentiel important dans ce domaine. Par exemple, des bactéries comme *Ideonella sakaiensis* ainsi que des champignons tels que *Aspergillus tubingensis* ont montré leur capacité à dégrader certains polymères plastiques (**Selim, 2021**). Cette capacité est liée à leur potentiel métabolique et à la production d'enzymes spécifiques impliquées dans ces mécanismes (**Dussault, 2016**).

L'activité des micro-organismes et l'efficacité de la biodégradation dépendent de plusieurs facteurs, tels que les caractéristiques du polymère (notamment sa masse molaire), ainsi que les conditions environnementales comme la température, le pH, l'humidité et la disponibilité en matière organique (**Chandra et al., 1998**). De plus, la structure du sol et la répartition des résidus influencent également la biomasse et l'activité microbienne (**Vian, 2009**).

Ainsi, les micro-organismes du sol jouent un rôle essentiel à la fois dans la fertilité et l'équilibre écologique des sols, tout en représentant une source naturelle prometteuse pour la dégradation des plastiques dans le cadre des stratégies de bioremédiation.

5. Les huiles essentielles

Dans un contexte marqué par l'augmentation de la pollution plastique, il devient important de rechercher des solutions plus écologiques. Parmi ces solutions, les alternatives naturelles prennent une place de plus en plus importante, notamment par les huiles essentielles, grâce à leur origine végétale et à leurs nombreuses propriétés biologiques.

Les huiles essentielles sont des extraits aromatiques obtenus à partir de différentes parties des plantes comme les feuilles, les fleurs, les fruits ou encore les racines. Elles correspondent à la fraction volatile responsable de l'odeur caractéristique des plantes. D'un point de vue physico-chimique, il s'agit généralement de liquides peu miscibles dans l'eau mais solubles dans les solvants organiques, avec une forte volatilité **(Mohammedi, 2006, Bardeau, 2009)**. Elles appartiennent à plusieurs familles botaniques telles que les Myrtacées, les Rutacées et les Lamiacées. Leur composition chimique peut varier selon plusieurs paramètres, notamment l'espèce, la partie de la plante utilisée ainsi que les conditions environnementales **(Belaiche, 1979 ; Bruneton, 1999)**.

5.1 Composition chimique

Sur le plan chimique, les huiles essentielles présentent une composition complexe dominée principalement par les composés terpéniques, en particulier les monoterpènes et les sesquiterpènes. On retrouve également certains composés aromatiques dérivés du phénylpropane. Ces différents constituants sont à l'origine des activités biologiques observées **(Bruneton, 1999 ; Svoboda et Hampson, 1999)**.

5.2 Activités biologiques et mécanisme d'action

Les huiles essentielles possèdent plusieurs activités biologiques importantes, notamment des propriétés antimicrobiennes, anti-inflammatoires et antioxydantes **(Edris, 2007)**. L'activité antimicrobienne est liée à la présence de composés comme les terpènes, les phénols et les aldéhydes, qui peuvent inhiber la croissance des micro-organismes **(Bakkali et al., 2008)**. Leur action se fait principalement par la perturbation de la membrane cellulaire, du métabolisme interne et des mécanismes de communication cellulaire **(Hyldgaard et al., 2012 ; Nazzaro et al., 2013)**. En plus de cela, elles présentent une activité antioxydante importante grâce à leur richesse en composés phénoliques, capables de neutraliser les radicaux libres et de limiter les réactions d'oxydation **(Miguel, 2010 ; Teixeira et al., 2013)**.

Le mode d'action des huiles essentielles repose principalement sur leur capacité à modifier la perméabilité des membranes cellulaires des micro-organismes. Elles peuvent également perturber les échanges ioniques et affecter la production d'énergie cellulaire. Ces effets sont liés au caractère lipophile de leurs constituants **(Sikkema et al., 1995 ; Oussalah et al., 2006)**.

5.3. Huiles essentielles étudiées

Dans cette étude, certaines huiles essentielles ont été particulièrement considérées, notamment celles de citron, d'orangé et d'eucalyptus. Elles sont riches en composés bioactifs, ce qui leur confère une activité antimicrobienne intéressante. De ce fait, elles peuvent être utilisées dans des applications environnementales, par exemple comme agents naturels intégrés dans des matériaux biodégradables ou dans des systèmes de conservation **(Atarés et Chiralt, 2016)**.

5.3.1. Huile essentielle de citron

L'huile essentielle de citron est obtenue par extraction à partir du zeste de *Citrus limon*, une espèce appartenant à la famille des Rutacées. Sa composition chimique est principalement dominée par les composés terpéniques, avec le limonène comme constituant majoritaire, ce qui explique en grande partie ses propriétés biologiques. Cette huile est reconnue pour ses activités antimicrobiennes, antifongiques et antioxydantes. Son efficacité est liée à l'action de ses constituants sur les micro-organismes, notamment par la perturbation de l'intégrité des membranes cellulaires et l'altération de certains processus métaboliques internes (**Bakkali et al., 2008**).

Ainsi, l'huile essentielle de citron fait l'objet de nombreuses recherches, notamment dans les domaines environnemental et agroalimentaire, où elle est envisagée comme un agent naturel pouvant être intégré dans des matériaux biodégradables ou des systèmes d'emballage actifs.

5.3.2. Huile essentielle d'orange

Dans la même continuité, l'huile essentielle d'orange est extraite des zestes de *Citrus sinensis*, appartenant également à la famille des Rutacées. Sa composition est proche de celle de l'huile essentielle de citron, avec une forte proportion de limonène, accompagnée d'autres composés terpéniques qui participent à son activité biologique. Elle présente des propriétés antimicrobiennes et antioxydantes intéressantes, lui permettant de limiter le développement de plusieurs microorganismes, notamment certaines bactéries et champignons. Son action repose sur l'interaction de ses composés avec les structures cellulaires des agents microbiens. Par ailleurs, plusieurs études ont mis en évidence son intérêt dans les applications écologiques, en particulier dans les systèmes de conservation et les formulations biodégradables. Son origine naturelle, associée à sa volatilité, en fait une alternative intéressante aux additifs chimiques de synthèse utilisés dans certains matériaux plastiques.

5.3.3. Huile essentielle d'eucalyptus

L'huile essentielle d'eucalyptus est obtenue à partir des feuilles de différentes espèces du genre *Eucalyptus*, appartenant à la famille des Myrtacées. Elle est principalement caractérisée par une forte teneur en eucalyptol (1,8-cinéole), un composé reconnu pour ses propriétés antimicrobiennes et antiseptiques. Son mécanisme d'action repose essentiellement sur l'altération de la membrane cellulaire des micro-organismes, entraînant ainsi une inhibition progressive de leur croissance (**Hyldgaard et al., 2012**). Grâce à ses propriétés biologiques, elle est largement utilisée dans divers secteurs tels que l'industrie pharmaceutique, alimentaire et environnementale. De plus, son incorporation dans les matériaux biodégradables représente une approche prometteuse pour le développement d'alternatives naturelles aux plastiques conventionnels.

5.4. Applications

Des travaux récents ont montré que l'incorporation des huiles essentielles dans des matrices biodégradables, comme le PLA ou l'amidon, permet d'améliorer certaines propriétés, notamment les activités antifongiques et antioxydantes. Cette approche contribue au développement d'emballages actifs capables de prolonger la conservation des aliments tout en réduisant l'utilisation de produits chimiques (**Atarés et Chiralt, 2016**).

Les huiles essentielles, en particulier celles de citron, d'orange et d'eucalyptus, représentent une alternative naturelle intéressante aux plastiques conventionnels. Toutefois, leur utilisation nécessite encore des études approfondies afin de mieux comprendre leur stabilité, leur efficacité à long terme ainsi que leurs limites.



Matériel et méthodes

PARTIE I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Dans le contexte actuel marqué par l'accumulation croissante des déchets plastiques et leurs impacts toxicologiques sur l'environnement et la santé, la recherche de solutions alternatives durables constitue un enjeu scientifique majeur.

Dans cette optique, la présente étude expérimentale s'inscrit dans une démarche de valorisation des moyens naturels, en particulier les micro-organismes du sol et certains extraits biologiques, en tant qu'alternatives écologiques potentielles pour la dégradation des plastiques et la réduction de leur toxicité. Ainsi, cette partie pratique vise à explorer le potentiel biologique de différentes approches naturelles, en combinant microbiologie et toxicologie environnementale dans le but de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans la biodégradation et la résilience des sols face aux polluants plastiques.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer le potentiel de certains agents biologiques naturels, en particulier les micro-organismes (champignons et bactéries) ainsi que des extraits naturels, dans la biodégradation des plastiques.

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- Étudier l'action des souches fongiques (*Trichoderma*, *Aspergillus niger*)
- Tester la bactérie du genre *Bacillus Subtilis* dans la dégradation du plastique.
- Évaluer l'intérêt des huiles essentielles comme agents naturels.
- Mettre en évidence le rôle des micro-organismes du sol fertile.

Donc, nous avons pris les souches fongiques de l'étudiante Attar rania qui a déjà travaillée sur ce domaine l'année passée. Elle a choisi au hasard deux sites de différentes cultures à Ouled Mimoun (**Figure 9**) situé au nord-est de la wilaya de Tlemcen (environ 32Km).

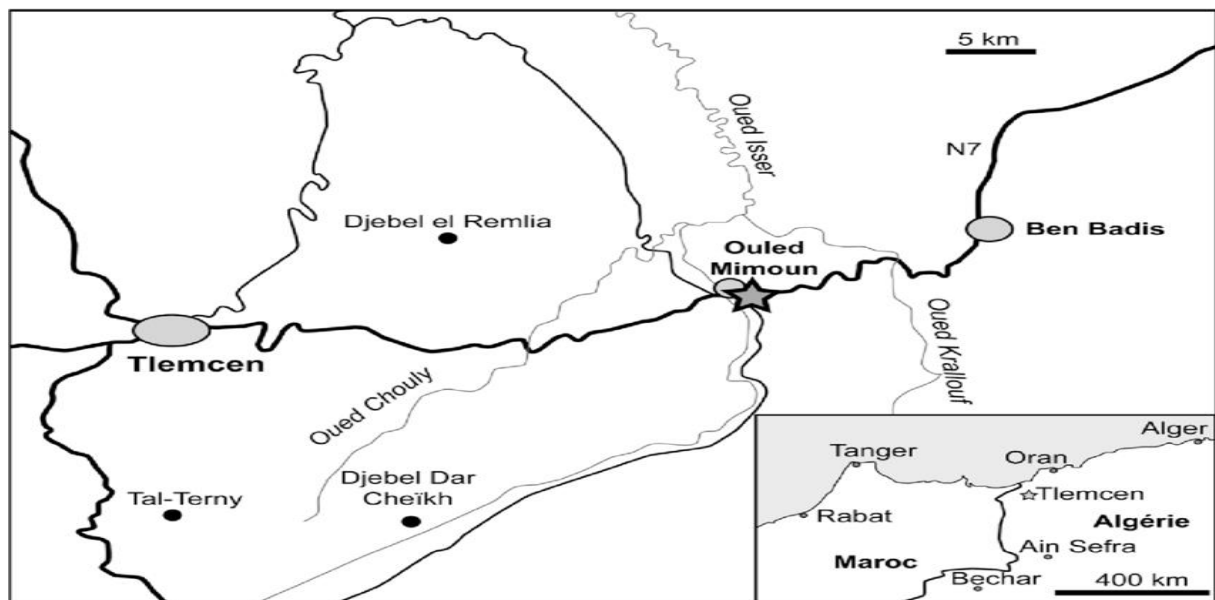


Figure 9: Carte de la zone d'étude d'Ouled Mimoun

(https://www.researchgate.net/figure/Carte-de-localisation-du-gisement-dOuled-Mimoun-Ouest-de-lAlgerie-Location-map-of_fig1_236960553)

Les échantillons ont été prélevés par l'étudiante le 04/02/2025 et correctement conservés (**Photo. 1**). Elle a prélevé trois échantillons à partir de propriété privée qui cultivent des carottes et des petits pois verts depuis plusieurs années et les prélèvements sont effectués au hasard et sur différents points (au centre, en bordure, en profondeur et en surface).



Photo 1: les échantillons des champs étudiés

PARTIE II : ETUDE MICROBIOLOGIQUE

Notre projet de fin d'étude a été réalisé au sein du laboratoire (LEGEN) de l'université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen (**Photo. 2**) durant 30 jours s'étale du 12/04/2026 au 12/05/2026.

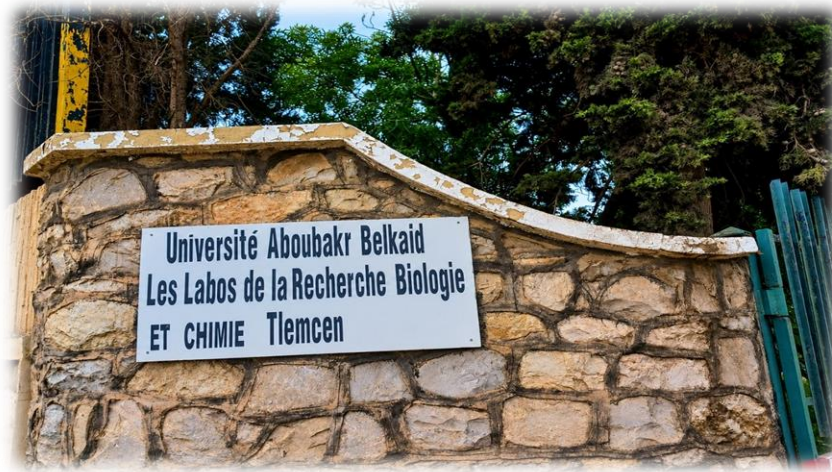


Photo 2:labo de recherche (photo personnelle)

Le travail expérimental a été structuré en plusieurs étapes complémentaires, incluant :

- La préparation du matériel biologique
- La remise en culture des souches de références disponibles
- Leur observation et leur exploitation dans les essais réalisés au laboratoire.

1.Le plastique

Pour notre expérience on a utilisé les sachets transparents (sachet de la congélation alimentaire), qui sont considérés comme l'un des principaux polluants de type PE rejetés dans l'environnement, ils sont aussi un problème majeur en terme des déchets.

Les sachets ont été découpés en petits morceaux de 3 cm² et ont été pesé à l'aide d'une balance analytique pour chacun des tests utilisés dans ce travail (**Photo. 3**).



Photo 3:les morceaux en plastique découpés et pesés (photo personnelle)

2. Étude des champignons

2.1 Origine des souches fongiques

Dans le cadre de cette étude, les souches fongiques utilisées proviennent de travaux pratiques antérieurs réalisés au laboratoire par une collègue au cours de l'année précédente, à partir d'échantillons de sol prélevés dans la région d'Ouled Mimoun (wilaya de Tlemcen).

En effet, en raison de contraintes expérimentales rencontrées durant la période de réalisation de ce travail, notamment des travaux de maintenance au niveau du laboratoire ainsi qu'un retard dans le démarrage des manipulations, il n'a pas été possible de reproduire les étapes d'isolement à partir des échantillons de sol.

Ainsi, les souches ont été récupérées sous forme de cultures déjà disponibles et préalablement identifiées à l'aide de **Mme Kholkhal.W**, puis remises en culture afin d'assurer leur viabilité et leur exploitation expérimentale.

Le protocole d'isolement initial reposait sur :

- L'ensemencement des échantillons du sol sur milieu PDA acidifié à un pH compris entre 4,5 et 5 en y ajoutant 1 ml d'acide lactique à 25 % pour chaque flacon de 500 ml (**Photo. 4**), conformément à la méthode décrite par (**Abdelkhalek M. 2017**).

,



Photo 4: milieu PDA préparé et stérilisé

Suivi d'une incubation contrôlée et de phases de purification successives permettant l'obtention de souches pures.

➤ L'identification des isolats fongiques

L'identification a été réalisée sur la base de caractères macroscopiques (aspect, couleur, texture des colonies), et microscopiques (structures sporulées), en s'appuyant sur des clés de détermination reconnues.

Cette démarche a permis de confirmer l'appartenance des souches étudiées aux genres *Trichoderma* et *Aspergillus niger*, connus pour leur potentiel dans les processus de biodégradation.

2.2. Préparation du sol stérilisé

Le sol échantillonné sur le terrain a été transporté dans des sachets en plastique au laboratoire, ou il a été étalé sur les paillasses, nous avons laissé sécher à température ambiante au laboratoire, ensuite il est broyé manuellement et tamisé à travers un tamis.

Le sol tamisé est placé dans des flacons en verre puis stérilisé dans une cocotte-minute pendant 20 minutes à température 120°C (**Photo. 5**).



Photo 5:sol après stérilisation (photo personnelle)

3. Etude de la bactérie *Bacillus subtilis*

L'étude s'est également intéressée aux bactéries du genre *Bacillus subtilis*, reconnues pour leur capacité d'adaptation à différents environnements et leur implication dans les processus biologiques du sol.

Les isolats bactériens ont été préparés et observés selon les techniques microbiologiques usuelles afin d'évaluer leurs caractéristiques morphologiques et leur potentiel d'intégration dans les essais expérimentaux.

Notre souche de référence (*Bacillus subtilis*), (**Photo. 6**) provient du laboratoire de microbiologie de département de biologie par M^{elle} **Bouali.W.**



Photo 6:la bactérie *Bacillus subtilis*

3.1. Préparation du milieu de culture

Un milieu de culture solide de type gélose nutritive a été préparé en dissolvant 7 g de poudre de gélose nutritive dans 250 ml d'eau distillée. Le milieu a ensuite été stérilisé dans une cocotte-minute pendant 30 minutes à 120°C puis coulé dans des boîtes de Pétri jusqu'à ce qu'ils soient solides (**Photo. 7**).



Photo 7:Préparation du milieu de gélose nutritif

3.2. Ensemencement bactérien après solidification,

Les boîtes ont été ensemencées avec la bactérie *Bacillus*, puis incubées dans une étuve pendant 24 heures afin de permettre la croissance et la multiplication bactérienne (**Photo. 8**).

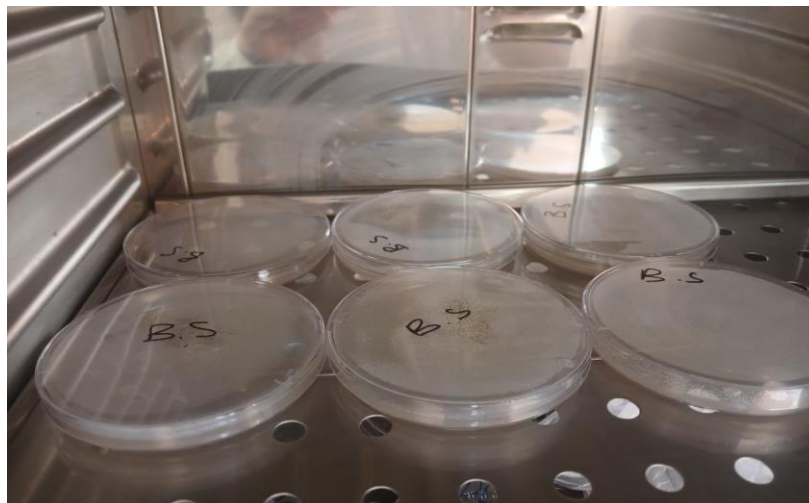


Photo 8:incubation de la bactérie bacillus subtilis (photo personnelle)

4. Prélèvement du sol fertile

L'objectif de cette expérience était d'étudier la capacité des micro-organismes du sol à participer au processus de biodégradation du plastique dans des conditions naturelles contrôlées. Pour cela, nous avons utilisé un sol fertile (**Photo. 9**).

Le sol fertile de notre étude a été prélevé d'un pot d'une plante d'intérieur de maison.



Photo 9:sol fertile (photo personnelle)

5. Les huiles essentielles

Les huiles essentielles de citron, d'orange et d'eucalyptus ont été considérées comme des alternatives naturelles d'intérêt biologique. Leur utilisation s'inscrit dans une approche écologique visant à exploiter leurs propriétés antimicrobiennes dans des stratégies de lutte respectueuses de l'environnement.

Trois huiles essentielles ont été sélectionnées dans cette étude *Citrus limonum*, *citrus sinensis* et *Eucalyptus radiata* (**Photo, 10**). L'extraction a été faite par Mr. Benmansour. Enseignant au département de chimie.

Nous avons choisi au hasard trois concentrations de [10] µl, [20] µl et [50] µl à l'aide d'une micropipette pour les trois huiles et testé par les deux méthodes suivantes.



Photo 10: les huiles essentielles utilisés (photo personnelle)

PARTIE III : TEST DE BIODEGRADATION DU PLASTIQUE (LUTTE BIOLOGIQUE / BIOREMEDIATION)

1. Test de biodégradation du plastique par les champignons

Afin d'évaluer de manière globale et approfondie la capacité des champignons, (*Trichoderma* et *Aspergillus niger*) à dégrader le plastique, nous avons sélectionné deux milieux différents, l'un solide (le sol stérilisé) et l'autre liquide (milieu czapek) ainsi une analyse comparative de leur activité dans des conditions différentes.

1.1. En milieu liquide

Le milieu liquide utilisé dans notre étude est celui de milieu czapek "(**Photo, 11**)."

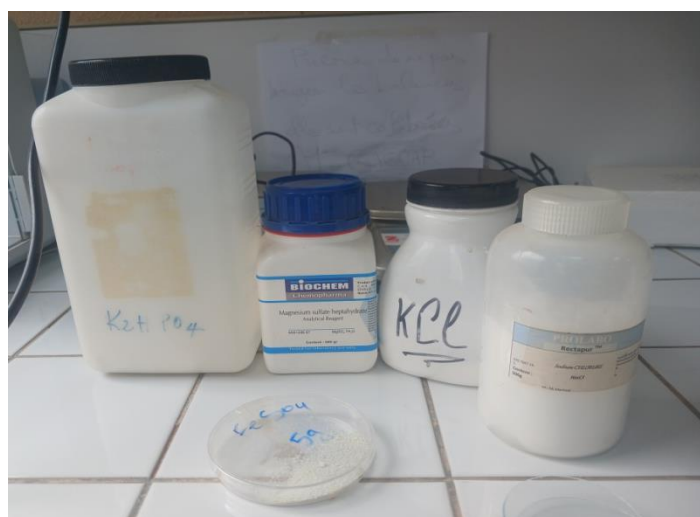


Photo 11: Préparation du milieu czapek

La méthode consiste à utiliser des sachets en plastiques commerciaux (type sachets de congélation). Ces derniers ont été découpés en petits morceaux de 3 cm² et ont été pesé à l'aide d'une balance.

Quatre fragments fongiques ont été introduits dans des flacons de 250 ml contenant chacun 100 ml de milieu Czapek liquide (**Photo. 12**) selon le protocole modifié de (**Sanchez., 2019**).

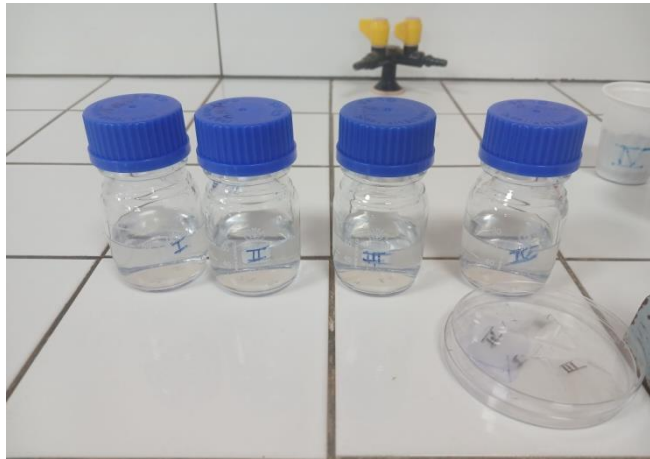


Photo 12:les flacons contenant le milieu Czapek

L'ensemble a été stérilisé à cocotte-minute pendant 20 minutes à 120°C. Après stérilisation, les souches fongiques sélectionnées ont été inoculées. Le témoin a été mis en place contenant seulement du plastique sans champignons. L'incubation a ensuite été effectuée à 25°C pendant une durée de 30 jours dans une étuve.

Les échantillons après un mois ont été extraits ; nettoyés ; séchés soigneusement ; puis repesés. La lecture, c'est une différence entre la première pesée des morceaux en plastique et la deuxième pesée.

1.2. En milieu solide

Le milieu solide utilisé dans cette étude était constitué d'un sol stérilisé.

Le protocole de la méthode est de placer le sol stérilisé dans des gobelets également stériles ; avec un morceau de plastique de 3 cm² (préalablement pesé). Ensuite d'introduire les champignons sélectionnés sous forme d'un disque mycélien de *Trichoderma* et *Aspergillus niger* afin d'évaluer l'effet des champignons sur la biodégradation du plastique (**Photo, 13**).



Photo 13: Les gobelets contenant les champignons dans le milieu solide

Le gobelet témoin contient uniquement un morceau de plastique sans disque mycélien.

Afin d'éviter la photo dégradation, les gobelets ont été recouverts par du papier aluminium puis ont été placés dans une étuve pendant 30 jours.

Après la période d'incubation, les échantillons ont été extraits ; nettoyés ; séchés soigneusement ; puis repesés. Pour la lecture, il suffit juste de voir s'il y a une différence entre la première pesée des morceaux en plastique et la deuxième pesée.

2. Test de biodégradation du plastique par la bactérie *Bacillus subtilis*

Cette étude vise à comparer l'efficacité de la bactérie *Bacillus subtilis* dans la dégradation du plastique selon deux approches expérimentales différentes, et à évaluer l'impact du contact direct entre la bactérie et le matériau plastique.

Après incubation, des fragments du plastique préalablement stérilisés et pesés ont été déposés à la surface du milieu contenant la culture bactérienne. Trois répétitions ont été réalisées pour cette première méthode afin d'assurer la fiabilité des résultats (**Photo. 14**).

Une seconde méthode a été adoptée, les fragments du plastique ont été placés en premier dans les boîtes de pétri ensuite la bactérie *Bacillus* a été inoculée directement à la surface des échantillons de plastique. Cette expérience a également été réalisée en trois répétitions.

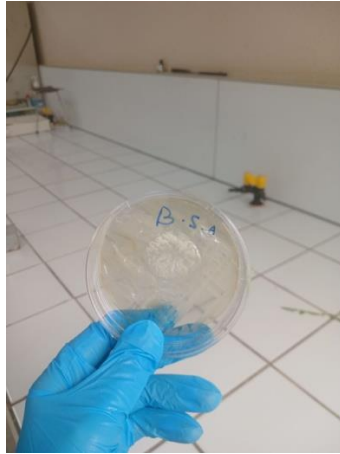


Photo 14: biodégradation du plastique par la bactérie *Bacillus subtilis*

3. Test de biodégradation du plastique par les microorganismes du sol fertile

Le sol a été réparti dans six gobelets préparés dans des conditions appropriées pour l'expérimentation. Les fragments de plastique préalablement stérilisés et pesés ont ensuite été introduits dans chaque gobelet. Les échantillons ont été maintenus pendant une durée de 30 jours afin de permettre l'action des micro-organismes présents naturellement dans le sol sur le plastique (**Photo. 15**).



Photo 15: des gobelets contenant du sol fertile et le plastique (photo personnelle)

4. Test de biodégradation du plastique par les huiles essentielles

Des fragments de plastique ont été préalablement stérilisés et pesés, puis placés dans des boîtes de Pétri en vue de leur traitement par les huiles essentielles.

La première méthode consiste à une application directe de chaque huile essentielle avec les trois différentes concentrations sur les échantillons de plastique. Deux répétitions ont été réalisées pour chaque concentration.

Une seconde méthode a été mise en œuvre par les mêmes concentrations d'huiles essentielles (10, 20 et 50 μ l) ont été utilisées. Un volume de 1 ml d'eau distillée a été ajouté et une goutte de Tween (agent tensioactif) a été incorporée afin de favoriser le mélange avec l'huile et la dispersion sur toute la surface.

Deux répétitions ont été également réalisés pour chaque concentration des trois huiles étudiées (**Photo. 16**).

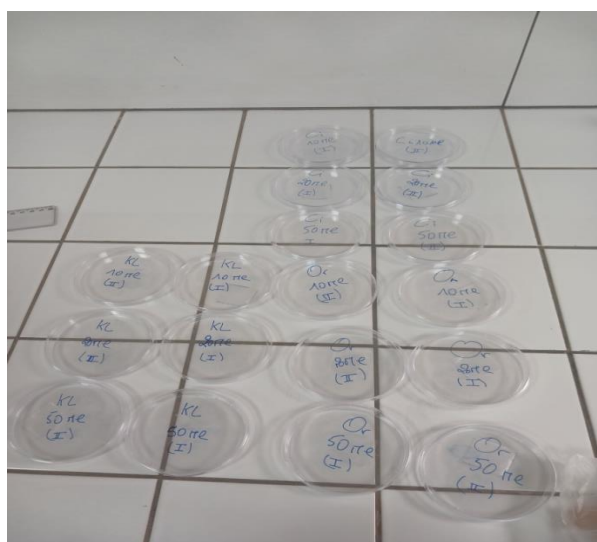


Photo 16:boites de pétries contenant différents dosages des trois huiles (Photo personnelle)



Résultats et discussion

I. Résultats

Les résultats obtenus au cours de cette étude sont présentés sous forme de tableaux et de figures afin de mettre en évidence l'effet des différents microorganismes et les huiles essentielles sur la biodégradation du plastique.

L'analyse de ces résultats permet d'évaluer la capacité biodégradable des souches étudiées dans les différentes conditions expérimentales.

1.Résultats du test de biodégradation du plastique par les champignons

Les résultats obtenus pour les souches fongiques étudiées sont présentés sous forme de tableaux et de figures. Leur analyse permet d'évaluer la capacité de *Trichoderma* et d'*Aspergillus niger* à dégrader le plastique dans les différentes conditions expérimentales.

1.1. En milieu liquide

Le **tableau 2** présente les résultats de la masse du plastique avant et après incubation dans le milieu liquide

Tableau 2:Évolution de la masse du plastique après incubation avec les champignons en milieu liquide

Les souches des champignons	La masse de plastique avant l'incubation	La masse de plastique après l'incubation
<i>Trichoderma</i>	0,0073g	0,0070g
<i>Aspergillus niger</i>	0,0076g	0,0072g
<i>Témoin</i>	0,0066g	0,0066g

Nous remarquons que la masse du plastique a diminué après l'incubation avec la souche *Trichoderma*, passant de 0,0073 g à 0,0070 g.

En parallèle, la souche *Aspergillus niger* aussi présente une diminution de la masse passant de 0,0076 g à 0,0072g après incubation.

Nous avons calculé le pourcentage de dégradation sur le milieu liquide, les résultats sont mentionnés dans la **figure 10**. Pour chaque test nous avons utilisé un témoin pour comparer les résultats de l'effet de ces souches sur la dégradation du plastique.

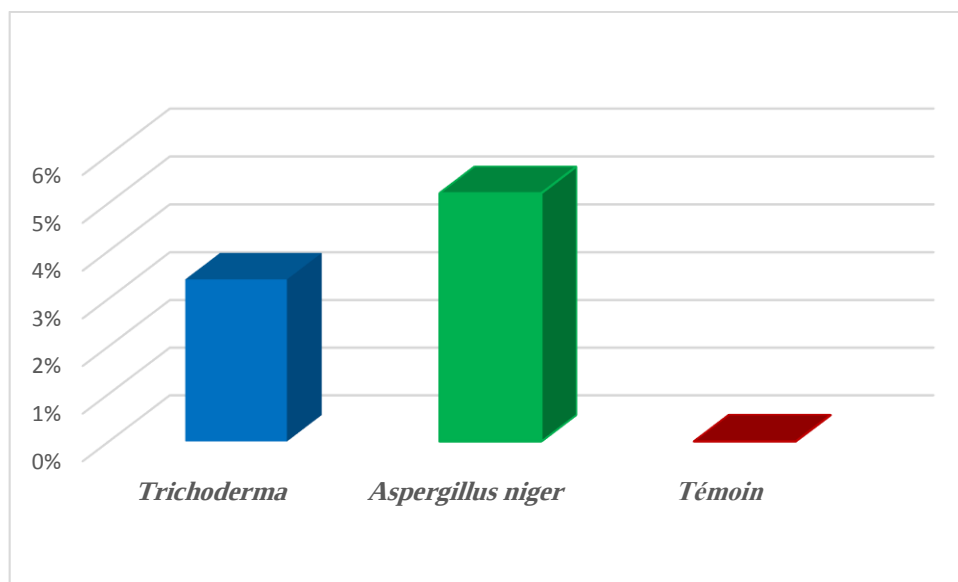


Figure 10: Pourcentage de dégradation du plastique par les champignons

Nous remarquons que le pourcentage de dégradation du plastique d'*Aspergillus niger* est de 5,2% supérieur à celui de la souche *Trichoderma* avec un pourcentage de dégradation de 3,4 % en milieu liquide.

1.2. En milieu liquide

Une fois la masse du plastique mesurée avant et après l'incubation, nous avons obtenu des résultats mentionnés sur le **tableau 3**.

Tableau 3:Évolution de la masse du plastique après incubation avec les champignons en milieu liquide

Les souches des champignons	La masse de plastique avant l'incubation	La masse de plastique après l'incubation
<i>Trichoderma</i>	0,0068g	0,0067g
<i>Apargilus niger</i>	0,0058g	0,0058g
<i>Témoin</i>	0,0063g	0,0063g

Nous remarquons que la masse du plastique a diminué après l'incubation pour la souche *Trichoderma*, la masse est passée de 0,0068g à 0,0067g. Quant à la souche *Aspergillus niger*, la masse du plastique est resté stable après incubation.

Après avoir calculé les pourcentages de dégradation sur milieu solide, on a obtenu les résultats suivants (**Fig. 11**).

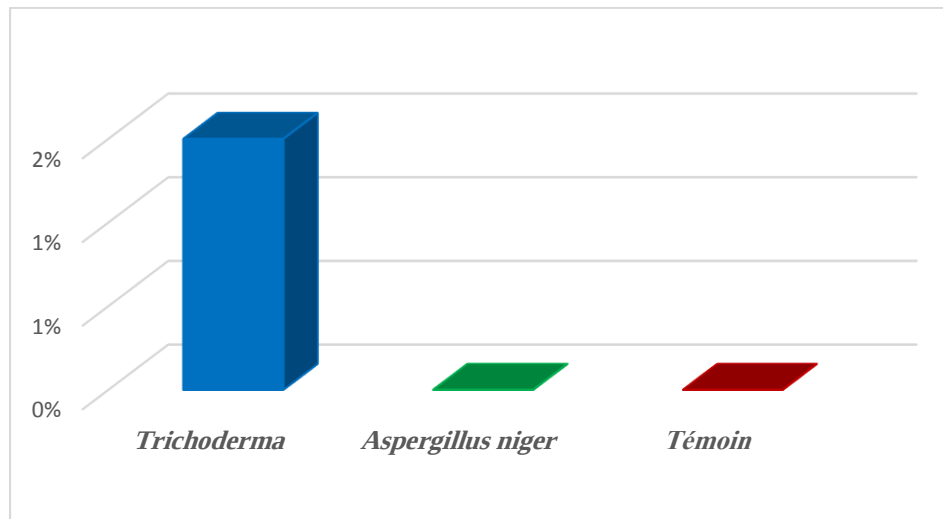


Figure 11: Pourcentage de dégradation du plastique par les champignons

La souche *Trichoderma* enregistre un pourcentage de 1,5 % de dégradation, tandis qu'*Aspergillus niger* ne présente aucune dégradation.

Nous remarquons que le pourcentage de dégradation du plastique en milieu liquide est plus important à celui du milieu solide.

2. Résultats du test de biodégradation du plastique par *Bacillus subtilis*

Afin d'évaluer la capacité biodégradatrice de *Bacillus subtilis*, deux méthodes expérimentales ont été appliquées. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableaux et permettent de suivre l'évolution de la masse du plastique avant et après incubation.

2.1. Test de biodégradation par la méthode 1

Nous avons utilisé trois essais pour effectuer le test de biodégradation du plastique par la bactérie *Bacillus subtilis* avec une première méthode qui consiste à déposer le fragment du plastique pesé directement sur la culture bactérienne.

**Tableau 4:Évolution de la masse du plastique après incubation avec *Bacillus subtilis*
(Méthode 1)**

Les essais expérimentales	La masse du plastique avant l'incubation	La masse du plastique après l'incubation
E1	0,0081g	0,0076g
E2	0,0076g	0,0075g
E3	0,0078g	0,0076g

Nous remarquons que la masse du plastique a diminué après l'incubation avec *Bacillus subtilis* dans les trois essais successivement.

-Pour l'essai E1, la masse est passée de 0,0081g à 0,0076g.

-Pour l'essai E2, elle est passée de 0,0076g à 0,0075g,

-Pour l'essai E3, la masse a diminué de 0,0078g à 0,0076g.

Ces résultats montrent une dégradation du plastique pour les trois essais. Le pourcentage de dégradation est représenté dans la figure suivante.

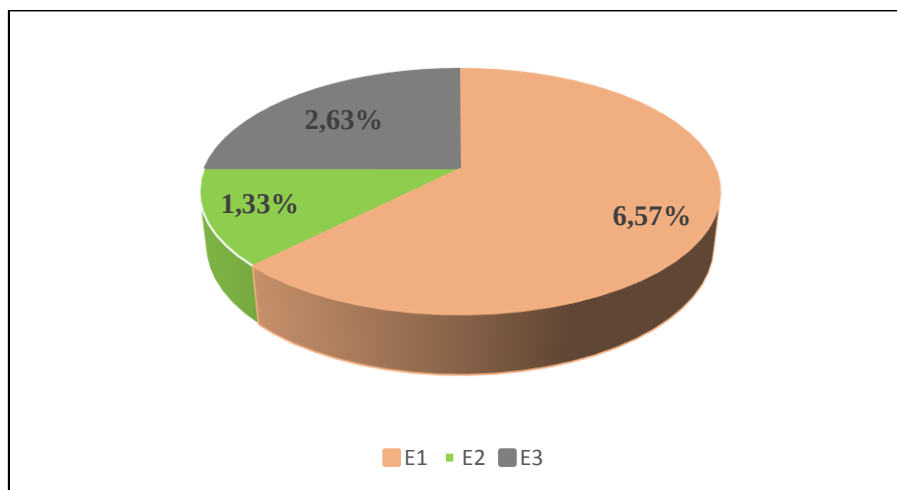


Figure 12: pourcentage de dégradation du plastique par *Bacillus subtilis* pour les trois essais par méthode 1

Nous remarquons pour les trois essais qu'il y a une différence significative concernant la dégradation du plastique par la même bactérie. Le premier essai présente le pourcentage de dégradation le plus important avec 6,5% suivi de l'essai 3 avec 2,6% et enfin de l'essai 2 avec 1,3%.

2.2. Test de biodégradation du plastique par la méthode 2

Les résultats obtenus par la méthode 2 sont présentés dans le **tableau 5**.

Tableau 5:Évolution de la masse du plastique après incubation avec *Bacillus subtilis* (Méthode 02)

Les essais expérimentales	La masse du plastique avant l'incubation	La masse du plastique après l'incubation
E'1	0,0081g	0,0070g
E'2	0,0076g	0,0067g
E'3	0,0079g	0,0068g

Nous remarquons que la masse du plastique a diminué après l'incubation avec *Bacillus subtilis* pour les trois essais par la deuxième méthode.

- Pour l'essai E'1, la masse est passée de 0,0081g à 0,0070g.
- Pour l'essai E'2, elle est passée de 0,0076g à 0,0067g,
- Pour l'essai E'3, la masse a diminué de 0,0079g à 0,0068g.

Le pourcentage de dégradation du plastique par *Bacillus subtilis* avec la deuxième méthode est représenté dans la **figure 13**.

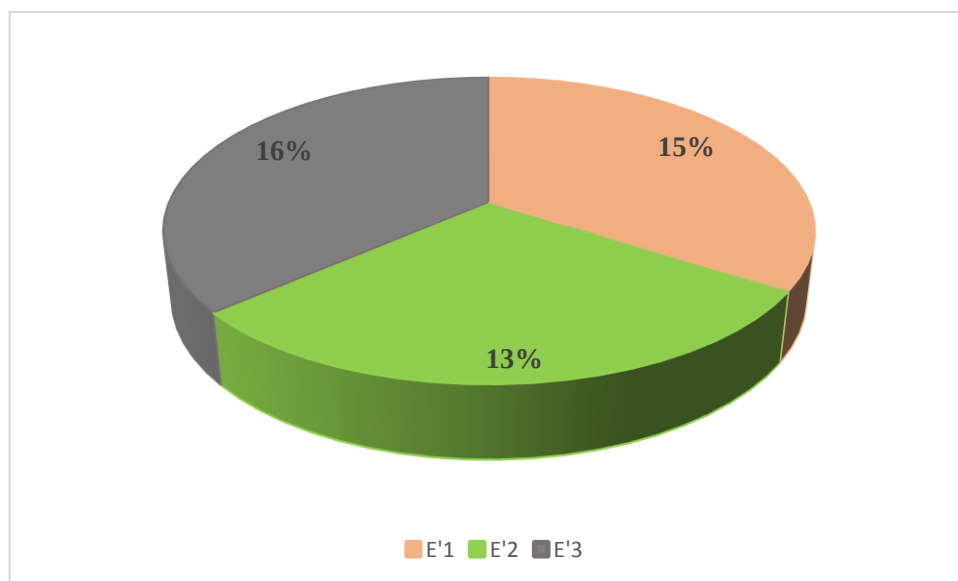


Figure 13: pourcentage de dégradation du plastique par *Bacillus subtilis* pour les trois essais par la méthode 2

La figure montre que le pourcentage de dégradation par *Bacillus subtilis* par la deuxième méthode est plus important dans l'essai E'3 avec 16% suivi de E'1 avec 15% et enfin de E'2 avec 13%. Dans l'ensemble, nous remarquons qu'il y a une bonne dégradation du plastique par cette bactérie.

La dégradation du plastique par *Bacillus subtilis* par les deux méthodes montrent un pourcentage de dégradation par la méthode 2 beaucoup plus important à celui réalisé par la méthode 1. Cela peut se traduire par le dépôt de culture bactérienne directement sur le fragment du plastique facilitant le contact direct avec la matière.

3. Test de biodégradation du plastique par des microorganismes du sol fertile

Afin d'évaluer l'effet des microorganismes du sol fertile sur la biodégradation du plastique, six essais expérimentaux (E"1 à E"6) ont été réalisés à partir des microorganismes du sol fertile. Les résultats obtenus sont présentés dans le **tableau 6** illustrant la variation de la masse des échantillons de plastique avant et après incubation, selon les différentes conditions expérimentales adoptées.

Tableau 6: Variation de la masse du plastique avant et après incubation avec les microorganismes du sol fertile

Les essais expérimentaux	Masse du plastique avant l'incubation	Masse du plastique après l'incubation
E"1	0,0076	0,0076
E"2	0,0061	0,0056
E"3	0,0067	0,0064
E"4	0,0062	0,0060
E"5	0,0087	0,0082
E"6	0,0071	0,0069

Nous remarquons que la masse du plastique a diminué après incubation dans la plupart des essais réalisés avec les microorganismes du sol fertile. Pour l'essai E"1, aucune variation de la masse n'a été observée, celle-ci restant constante à 0,0076 g avant et après incubation. En revanche, pour les essais E"2, E"3, E"4, E"5 et E"6, une diminution de la masse du plastique a été enregistrée, passant respectivement de 0,0061 g à 0,0056 g, de 0,0067g à 0,0064g, de 0,0062g à 0,0060g, de 0,0087g à 0,0082g et de 0,0071g à 0,0069g.

Ces résultats montrent que les microorganismes du sol fertile possèdent une capacité variable de dégradation du plastique selon les essais étudiés. Cela est peut-être due à la diversité de microorganismes dans le sol.

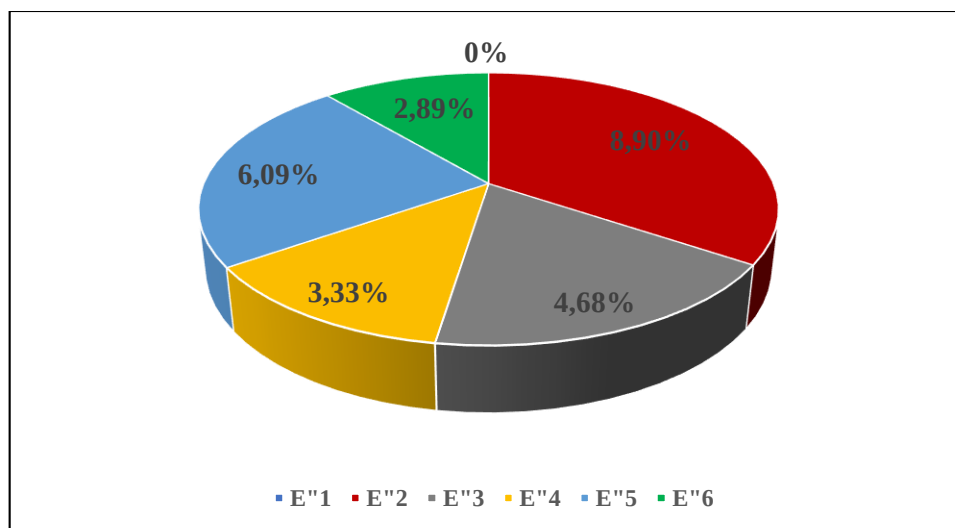


Figure 14: Variation des pourcentages de biodégradation du plastique selon les différents essais (E"1 à E"6)

Nous remarquons que les pourcentages de dégradation du plastique varient selon les essais réalisés. L'essai E"2 présente le pourcentage de dégradation le plus élevé avec 8,9%, suivi de l'essai E"5 (6,09%), puis E"3 (4,68 %) et E"4 (3,3 %). L'essai E"6 enregistre une faible activité de dégradation avec 2,8% tandis que l'essai E"1 ne présente aucune dégradation (0 %).

Ces résultats montrent que les microorganismes du sol fertile possèdent une capacité variable de biodégradation du plastique selon les conditions expérimentales étudiées, ce

qui confirme l'hétérogénéité de leur activité enzymatique et leur efficacité différente d'un essai à un autre.

4. Résultats du test de dégradation du plastique par les huiles essentielles

Afin d'évaluer l'effet des huiles essentielles sur la dégradation du plastique, différentes concentrations des huiles essentielles de citron, d'orange et d'eucalyptus ont été testées selon deux méthodes.

4.1. Tests de dégradation du plastique des huiles essentielles par la méthode 1

Les résultats obtenus sont présentés dans le **tableau 7** montrant la variation de la masse du plastique avant et après introduction des huiles essentielles.

Tableau 7: Variation de la masse du plastique avant et après introduction des huiles essentielles (Méthode 1)

L'huile essentiel	Les concentrations	La masse initiale du plastique	La masse finale du plastique
Citron	10 µL	0,0071	0,0069
	20 µL	0.0075	0.0072
	50 µL	0.0070	0.0066
Orange	10 µL	0.0086	0.0085
	20 µL	0.0067	0.0065
	50 µL	0.0070	0.0067
Eucalyptus	10 µL	0.0075	0.0074
	20 µL	0.0083	0.0081
	50 µL	0.0078	0.0075

Après calcul des pourcentages de dégradations du plastique par les huiles essentielles de la première méthode, les résultats sont présentés dans la **figure 15** avec les différentes concentrations.

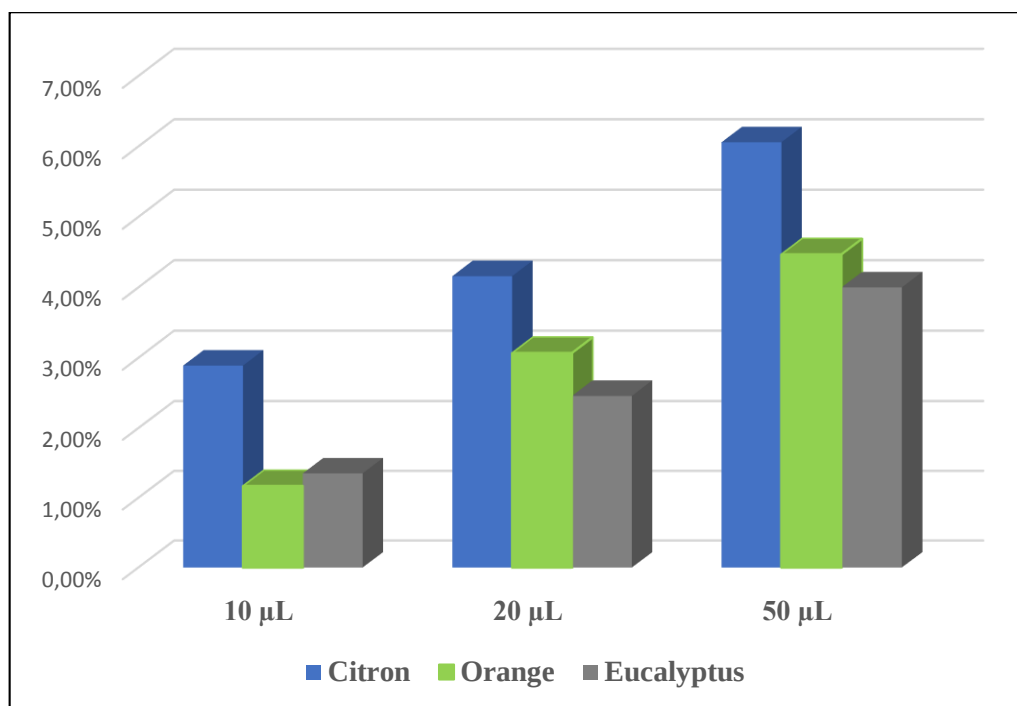


Figure 15: Pourcentage de dégradation du plastique par les trois huiles essentielles à 10, 20 et 50 µl (méthode 1)

Les résultats de la figure précédente montrent des variations du pourcentage de dégradation du plastique selon les huiles essentielles testées ainsi que leurs concentrations.

A la concentration 10 µL L'huile essentielle de citron présente le pourcentage le plus élevé de (2,8%), ce qui indique une activité de dégradation du plastique légèrement plus importante par rapport aux deux autres huiles pour la même concentration. L'huile essentielle d'orange et celle d'eucalyptus affichent la même valeur (1%), ce qui traduit une activité de dégradation faible et similaire dans ces conditions expérimentales.

À la concentration de 20 μ L, l'huile essentielle de citron présente toujours le pourcentage le plus élevé avec (4,1%), ce qui indique une meilleure dégradation du plastique à cette concentration. Cela indique que le citron possède aussi une efficacité supérieure par rapport aux deux autres huiles. Les huiles essentielles d'orange et d'eucalyptus présentent les valeurs de 3,07% et 2,46% successivement, ce qui traduit une activité de dégradation modérée et similaire (**Fig. 15**).

À la concentration de 50 μ L, l'huile essentielle de citron présente le pourcentage le plus élevé (6%), ce qui indique une activité de dégradation du plastique plus importante à cette concentration. Cela traduit une efficacité maximale du citron parmi les huiles testées.

L'huile essentielle d'orange affiche une valeur intermédiaire de 4,47%, indiquant une activité de dégradation modérée mais significative. En revanche, l'huile essentielle d'eucalyptus présente le pourcentage le plus faible (4%), ce qui montre une activité de dégradation plus limitée par rapport aux deux autres huiles.

Les résultats des trois huiles essentielles au final montrent une variation du pourcentage de dégradation du plastique selon les huiles essentielles testées et leurs concentrations. L'huile essentielle de citron présente le pourcentage le plus élevé, ce qui indique une meilleure dégradation du plastique par rapport aux autres huiles essentielles. Les huiles essentielles d'orange et d'eucalyptus présentent le même pourcentage, indiquant une activité de dégradation presque similaire.

Nous remarquons aussi pour les trois huiles essentielles étudiées que le pourcentage de dégradation du plastique augmente chaque fois avec la concentration de l'huile essentielle (**Fig. 15**).

Tableau 8: Variation de la masse du plastique avant et après incubation avec les huiles essentielles (Méthode 2)

L'huile essentiel	Les concentrations	La masse initiale du plastique	La masse finale du plastique
Citron	10 µL	0,0071	0,0069
	20 µL	0.0063	0.0061
	50 µL	0.0074	0.0071
Orange	10 µL	0.0077	0.0075
	20 µL	0.0072	0.0070
	50 µL	0.0075	0.0072
Eucalyptus	10 µL	0.0063	0.0064
	20 µL	0.0072	0.0071
	50 µL	0.0069	0.0068

4.2. Test de dégradation du plastique par l'huile essentielle par la méthode2

Nous avons utilisé dans la deuxième méthode les mêmes concentrations des huiles essentielles de citron, orange et eucalyptus mélangé à 1ml d'eau distillé pour avoir une solution et faire une comparaison. Les résultats sont mentionnés dans le **tableau 8**.

Nous remarquons que la masse du plastique a globalement diminué après introduction des différentes concentrations des huiles essentielles testées, bien que les variations restent moyennes selon les concentrations.

Pour l'huile essentielle de citron, la masse du plastique est passée de 0,0071g à 0,0069g à une concentration de 10 μ L, de 0,0063g à 0,0061g à une concentration de 20 μ L et de 0,0074g à 0,0071g à 50 μ L. ces résultats indique qu'il y a une diminution de la masse du plastique quel que soit la concentration.

Concernant l'huile essentielle d'orange, la masse a également diminué de 0,0077g à 0,0075g à la concentration de 10 μ L, de 0,0072g à 0,0070g à la concentration de 20 μ L et de 0,0075g à 0,0072g à 50 μ L. Cela se traduit par un effet modéré mais régulier sur la réduction de la masse du plastique. Quant à l'huile essentielle d'eucalyptus, les variations sont très faibles : la masse est passée de 0,0064g à 0,0063g à une concentration de 10 μ , de 0,0072g à 0,0071g à une concentration de 20 μ L et de 0,0069g à 0,0068g à 50 μ L. Ces résultats indiquent une faible diminution de la masse du plastique comparée aux autres huiles essentielles.

Après calcul du pourcentage de dégradation du plastique par les huiles essentielles par la deuxième méthode, les résultats sont représentés dans la figure suivante.

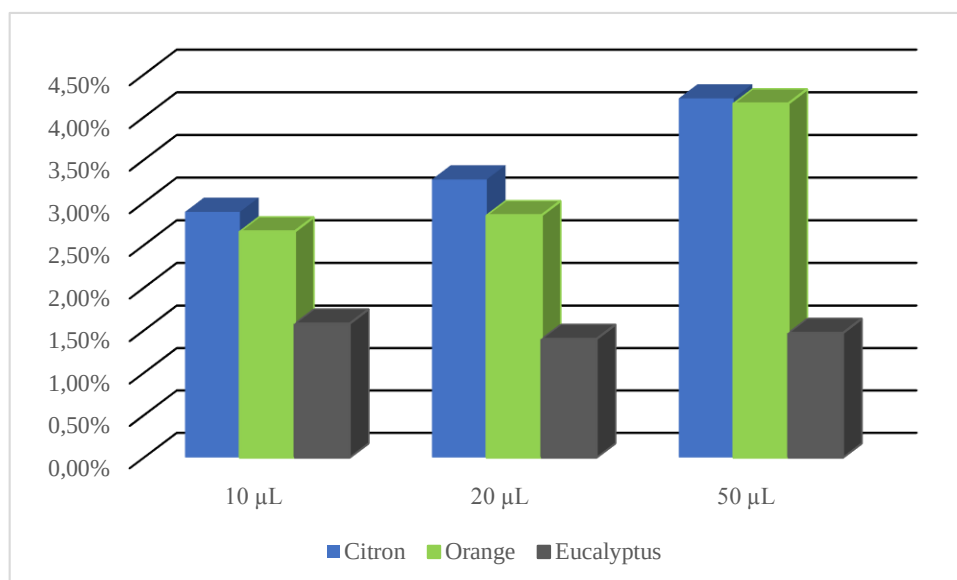


Figure 16: Pourcentage de dégradation du plastique par les trois huiles essentielles à 10, 20 et 50 µl (méthode 2)

Nous remarquons dans la figure précédente que l'huile essentielle du citron possède un pourcentage de dégradation plus fort à celui de l'orange et d'eucalyptus à une concentration de 10, 20 et 50µL.

Pour l'huile essentielle d'orange, les pourcentages de dégradation du plastique sont moyens entre 2,66% et 4,16% pour les trois concentrations utilisées.

Enfin, eucalyptus présente les pourcentages de dégradation du plastique les plus faibles par rapport aux autres huiles pour les trois concentrations et ne dépassent pas le 1,6 % (**Fig. 16**).

Ces résultats montrent une augmentation progressive du pourcentage de dégradation plus marqué à des concentrations plus fortes. Cette deuxième méthode présente des pourcentages moins importants par rapport à la première méthode qui semble plus efficace où nous avons utilisé directement les huiles essentielles sur la matière du plastique.

II. Discussion

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que les microorganismes testés possèdent une capacité variable à biodégrader le plastique. La diminution de la masse observée après incubation indique que ces microorganismes sont capables d'utiliser partiellement le polymère comme source alternative de carbone et d'énergie. Toutefois, les taux de dégradation enregistrés demeurent relativement faibles, ce qui peut être expliqué par la nature du polyéthylène, caractérisé par une structure hydrophobe et une forte stabilité chimique limitant son attaque par les microorganismes.

Les résultats obtenus avec les champignons *Aspergillus niger* et *Trichoderma sp.* ont montré une réduction de la masse des échantillons plastiques après incubation, suggérant leur capacité à participer au processus de biodégradation. Cette activité pourrait être liée à la production d'enzymes extracellulaires capables d'altérer progressivement les chaînes polymériques.

Les résultats obtenus dans notre étude sont comparables à ceux rapportés par **Brunner et al. (2018)**, qui ont montré que plusieurs espèces fongiques sont capables de coloniser la surface des polymères et de contribuer à leur altération progressive. De même, **Khan et al. (2017)** ont obtenu des résultats plus importants que ceux observés dans notre étude, en démontrant la capacité d'*Aspergillus tubingensis* à dégrader le polyuréthane. Cette différence pourrait être liée à la nature du polymère utilisé, aux conditions expérimentales ou à la durée d'incubation.

Les résultats obtenus avec *Trichoderma sp.* peuvent également être expliqués par le fort potentiel enzymatique de ce genre fongique, mis en évidence par **Kubicek et al. (2003)**. Par ailleurs, les observations réalisées dans notre travail rejoignent celles de **Chonde et al. (2012)**, qui ont rapporté une diminution significative du poids du Nylon 6 après incubation avec *Trametes versicolor*.

De même, **Maisto et al. (2024)** ont montré la capacité d'*Agaricus bisporus* à dégrader le polyéthylène basse densité. Bien que les taux de dégradation obtenus dans notre étude soient plus modestes, ces travaux confirment le potentiel des champignons dans la biodégradation des matières plastiques.

Concernant les bactéries, les résultats obtenus avec *Bacillus subtilis* montrent une diminution de la masse des échantillons plastiques après incubation, indiquant sa capacité à participer à la dégradation du polymère.

Ces résultats sont en accord avec ceux d'**Enny Z. et al. (2017)**, qui ont montré que des bactéries appartenant aux genres *Bacillus* et *Pseudomonas* peuvent coloniser les surfaces plastiques, former des biofilms et provoquer une diminution de leur masse.

Les résultats obtenus dans notre étude concordent également avec ceux de **Devi et al. (2019)**, qui ont observé une dégradation du polyéthylène par des souches de *Bacillus sp.* et *Pseudomonas sp.*.

De même, **Yoshida et al. (2016)** ont démontré que *Ideonella sakaiensis* est capable d'utiliser le PET comme seule source de carbone grâce à des enzymes spécialisées. Bien que le polymère étudié dans notre travail soit différent, ces observations confirment le rôle important des bactéries dans les mécanismes de biodégradation des plastiques.

Les essais réalisés avec les microorganismes du sol fertile ont également montré une diminution de la masse des échantillons plastiques après incubation. Cette activité pourrait être attribuée à l'action combinée des différentes populations microbiennes présentes naturellement dans le sol. Selon **Ochoa et al. (2013)**, les microorganismes du sol produisent diverses enzymes extracellulaires capables de transformer des substrats complexes en molécules plus simples assimilables.

Les résultats obtenus dans notre étude soutiennent cette hypothèse, puisque les microorganismes du sol fertile ont montré une activité biodégradable notable. Ces observations rejoignent également celles de **Zettler et al. (2019)**, qui ont mis en évidence l'existence de communautés microbiennes diversifiées colonisant naturellement les déchets plastiques dans l'environnement.

Les auteurs ont montré que ces communautés forment des biofilms facilitant l'adhésion des microorganismes au polymère et favorisant sa dégradation progressive.

Malgré les capacités biodégradables observées, les taux de dégradation enregistrés demeurent relativement faibles. Cette observation est également rapportée par **Andrady (2015), Charles et al. (2019)**, qui ont indiqué que la biodégradation complète des plastiques est généralement lente en raison de la complexité structurale des polymères synthétiques.

Les différences observées entre les résultats de notre étude et ceux rapportés dans la littérature peuvent être attribuées à plusieurs facteurs, notamment la nature du plastique utilisé, la durée d'incubation, les conditions environnementales ainsi que les caractéristiques biologiques des microorganismes testés.

Par ailleurs, les résultats obtenus avec les huiles essentielles montrent une activité antimicrobienne variable selon l'huile utilisée. L'huile essentielle de citron a présenté la meilleure efficacité, suivie de l'huile essentielle d'orange, tandis que l'huile essentielle d'eucalyptus a montré l'activité la plus faible. Cette différence peut être liée à la composition chimique spécifique de chaque huile essentielle ainsi qu'à la concentration de ses composés actifs.

Les résultats obtenus dans notre étude sont en accord avec ceux de **Teneva et al. (2019)**, qui ont montré que les huiles essentielles d'agrumes possèdent une activité antimicrobienne importante grâce à la présence de composés bioactifs tels que le limonène. La meilleure efficacité de l'huile essentielle de citron observée dans notre étude pourrait ainsi être expliquée par sa richesse en composés actifs.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus confirment que les champignons, les bactéries ainsi que les microorganismes du sol fertile et les huiles essentielles possèdent un potentiel intéressant pour la biodégradation des matières plastiques. Bien que les taux observés restent limités, les études réalisées sont globalement en accord avec celles rapportées dans la littérature, elles sont prometteuses ce qui permet de souligner l'intérêt des approches biologiques dans la gestion des déchets plastiques et le contrôle des microorganismes.

Conclusion

La problématique de la pollution plastique constitue aujourd'hui un enjeu environnemental majeur à l'échelle mondiale, en raison de la production massive de polymères synthétiques et de leur forte persistance dans les différents compartiments de l'écosystème. Cette résistance à la dégradation favorise leur fragmentation progressive en microplastiques, responsables de multiples impacts écologiques et sanitaires sur les milieux naturels et la santé humaine. Dans ce contexte, la présente étude s'inscrit dans une approche de valorisation des solutions biologiques visant la biodégradation du plastique. Elle a porté sur l'évaluation du potentiel de différents agents microbiens, notamment les champignons (*Aspergillus niger*, *Trichoderma* sp.), la bactérie *Bacillus subtilis*, ainsi que des micro-organismes du sol fertile et de l'effet de trois huiles essentielles (citron, orange et eucalyptus).

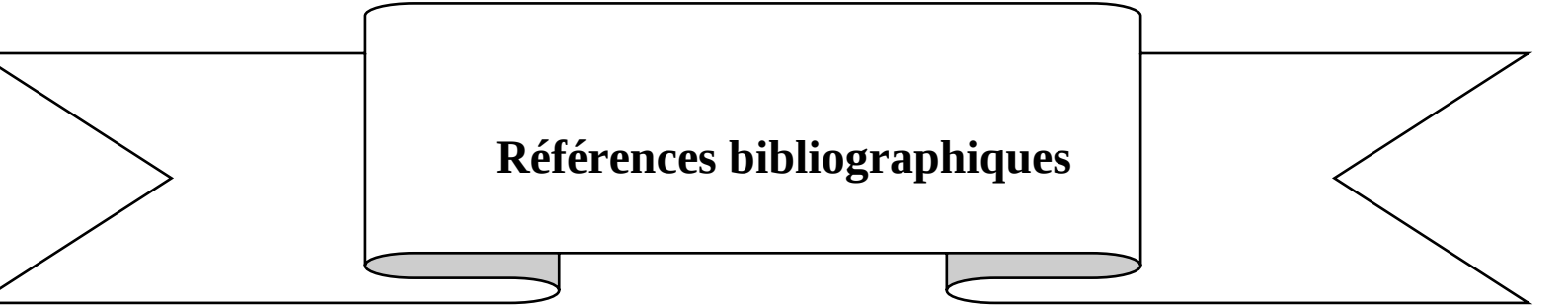
Les résultats obtenus ont montré que les microorganismes étudiés présentent une capacité importante de biodégradation traduite par une diminution de la masse du plastique. *Bacillus subtilis* s'est distinguée par la meilleure performance globale, suivie des souches fongiques, confirmant ainsi le rôle central des bactéries et des champignons dans les mécanismes de biodégradation des polymères. Les microorganismes du sol fertile ont également démontré une activité intéressante, mettant en évidence le potentiel biotechnologique de la diversité microbienne.

Par ailleurs, les huiles essentielles ont montré une activité modérée, dépendante de leur nature et de leur concentration, suggérant un effet complémentaire pouvant influencer indirectement par les interactions entre microorganismes et substrats plastiques.

Globalement, cette étude confirme que la biodégradation microbienne représente une voie prometteuse, écologique et durable pour la gestion et la réduction des déchets plastiques. Toutefois, les performances observées restent limitées et nécessitent une optimisation approfondie des conditions expérimentales afin d'envisager une application à plus grande échelle.

À la lumière des résultats obtenus, plusieurs perspectives peuvent être envisagées afin de compléter et approfondir ce travail.

- Il serait tout d'abord pertinent d'étendre la durée des expérimentations afin d'évaluer plus précisément la cinétique de la biodégradation et son évolution dans le temps.
- Une optimisation des paramètres physico-chimiques (température, pH, humidité, concentration microbienne) ainsi que l'étude des interactions synergiques entre différentes souches bactériennes et fongiques pourraient permettre d'améliorer significativement l'efficacité du processus de dégradation.
- Par ailleurs, l'identification enzymatique et l'analyse moléculaire des mécanismes impliqués permettraient de mieux comprendre les voies biologiques responsables de l'attaque des polymères plastiques et d'ouvrir la voie à des applications biotechnologiques plus avancées.
- Enfin, il serait intéressant d'élargir cette étude à différents types de plastiques (PE, PP, PET, LDPE...) ainsi qu'à des conditions environnementales réelles afin de se rapprocher des systèmes naturels et d'évaluer la faisabilité d'une application industrielle des procédés de biodégradation microbienne.



Références bibliographiques

- **ABBADIE L., 2018.** Écologie des sols et fonctionnement des écosystèmes. Paris : Éditions Quae.
- **ABBOU A., 2009.** Les matériaux polymères et leurs applications industrielles. Éditions Universitaires, Alger, 256 p.
- **ADDOU A., 2009.** Matériaux polymères et matériaux composites. Office des Publications Universitaires, Alger, 312 p.
- **AHMED T., SHAHID M., AZEEM F., RASUL I., SHAH A.A., NOMAN M., HAMEED A., MANZOOR N., MANZOOR I. et MUHAMMAD S., 2018.** Biodegradation of plastics : current scenario and future prospects for environmental safety. Environmental Science and Pollution Research, 25(pp. 7287–7298).
- **AKUTSU Y., NAKAJIMA-KAMBE T., NOMURA N. et NAKAHARA T., 1998.** Purification and properties of a polyurethane-degrading enzyme from Comamonas acidovorans. Applied and Environmental Microbiology, 64(1), pp. 62–67.
- **ALIN J. et DESSARTHE P., 1996.** Les matières plastiques : propriétés et applications. Technique et Documentation, Paris, 278 p.
- **AMER A. et al., 2007.** Enzymatic degradation of polymeric materials. Journal of Applied Polymer Science, 104, pp. 123–130.
- **ANDERSON K.S. et SHIVE M.S., 2012.** Biodegradation and biocompatibility of PLA and related polymers. Advanced Drug Delivery Reviews, 64, pp. 72–82.
- **ANDRADY A.L., 1990.** Plastics and their impacts in the environment. Polymer Degradation and Stability, 28, pp. 1–13.
- **ANDRADY A.L., HAMID S.H., HU X. et TORIKAI A., 2003.** Effects of increased solar ultraviolet radiation on materials. Journal of Photochemistry and Photobiology B, 46, pp. 96–103.

- **ANDRADY A.L., 2003.** *Plastics and the Environment*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- **ANDRADY A.L. et NEAL M.A., 2009.** Applications and societal benefits of plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364, pp. 1977–1984.
- **ANDRADY A.L., 2011.** Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(pp. 1596–1605.
- **ANDRADY A.L., 2015.** Persistence of plastic litter in the oceans. In: *Marine Anthropogenic Litter*. Springer, Cham, pp. 57–72.
- **ARTHAM T. et DOBLE M., 2008.** Biodegradation of aliphatic and aromatic polycarbonates. *Macromolecular Bioscience*, 8, pp. 14–24.
- **ATARÉS L. et CHIRALT A., 2016.** Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 48, pp. 51–62.
- **AUBRY J., 2014.** *Histoire des matières plastiques*. Éditions Lavoisier, Paris, 220 p.
- **BAKIR A., ROWLAND S.J. et THOMPSON R.C., 2014.** Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions. *Environmental Pollution*, 185, pp. 16–23.
- **BAKKALI F., AVERBECK S., AVERBECK D. et IDAOMAR M., 2008.** Biological effects of essential oils: A review. *Food and Chemical Toxicology*, 46(2), pp. 446–475.
- **BARDEAU F., 2009.** *Les huiles essentielles*. Paris : Éditions Jouvence.

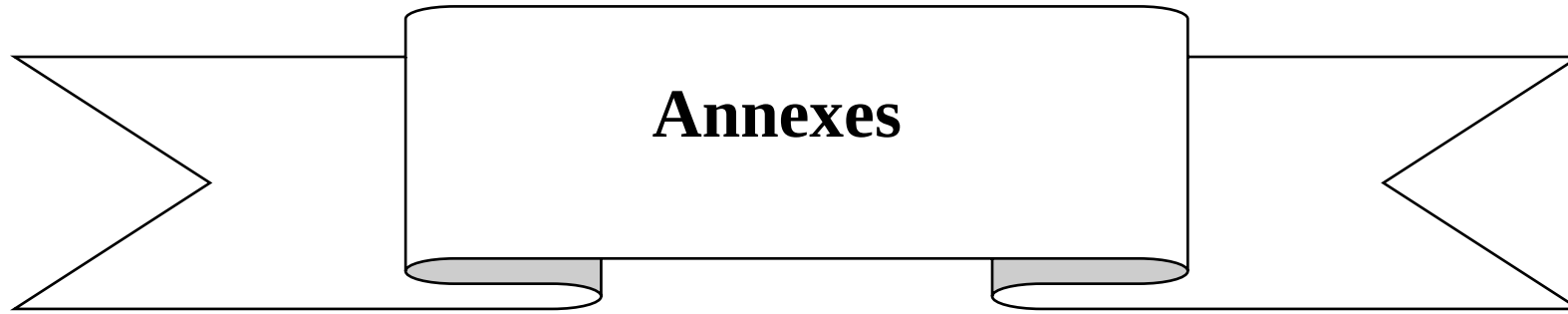
- **BAROUKI R. et al., 2021.** The COVID-19 pandemic and global environmental change: Emerging research needs. *Environmental Health Perspectives*, 129(6), 65001.
- **BATORI V., ÅKESSON D., ZAMANI A. et al., 2018.** Biodegradation of plastic polymers under different environmental conditions. *Journal of Polymers and the Environment*, 26, pp. 325–337.
- **BELAICHE P., 1979.** Traité de phytothérapie et d'aromathérapie. Paris : Maloine.
- **BODE H.B., ZEECK A., PLÜCKHAHN K. et JENDROSSEK D., 2001.** Physiological and chemical investigations into microbial degradation of synthetic polymers. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 55, pp. 318–323.
- **BOIRON P., 2005.** Mycologie médicale. Paris : Elsevier Masson. **BONTEN C., 2019.** *Plastics Technology: Introduction and Fundamentals*. Hanser Publishers, Munich, 368 p.
- **BORRÀS E., BLÁNQUEZ P., SARRÀ M. et CAMINAL G., 2010.** Biodegradation of plastics by white-rot fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 87, pp. 101–112.
- **BOUDET A., 2003.** Voyages au cœur de la matière plastique : les microstructures des polymères. Éditions CNRS, Paris, 196 p.
- **BROWNE M.A., DISSANAYAKE A., GALLOWAY T.S., LOWE D.M. et THOMPSON R.C., 2008.** Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel *Mytilus edulis*. *Environmental Science & Technology*, 42(13), pp. 5026–5031.
- **BRUNETON J., 1999.** Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales. Paris : Tec & Doc.

- **BRUNNER I., FISCHER M., RÜTHI J., STIERLI B. et FREY B., 2018.** Ability of fungi to degrade synthetic polymers and colonize plastic surfaces. *Applied and Environmental Microbiology*, 84, pp. 1–12.
- **CALLISTER W.D. et RETHWISCH D.G., 2020.** *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10^e édition, Wiley, New York, 960 p.
- **CALMON-DECRIAUD A., BELLON-MAUREL V. et FEUILLOLEY P., 1998.** Biodegradability of materials. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 42, pp. 203–211.
- **CARREGA M., 2017.** *Les polymères naturels et leurs applications*. Dunod, Paris, 210 p.
- **CHANDRA R. et RUSTGI R., 1998.** Biodegradable polymers. *Progress in Polymer Science*, 23, pp. 1273–1300.
- **CHATTOPADHYAY S., RAY S. et DUTTA P., 2011.** Biodegradable polymers and starch-based materials. *Progress in Polymer Science*, 36, pp. 1767–1789.
- **CHEN G.Q. et PATEL M.K., 2011.** Plastics derived from biological sources: present and future. *Chemical Reviews*, 112, pp. 2082–2099.
- **CHEN C.C., HAN X., KO T.P., LIU W. et GUO R.T., 2019.** Structural studies reveal the molecular mechanism of PET degradation. *Journal of Biological Chemistry*, 294, pp. 113–124.
- **CHONDE S.G., REDDY M.M. et SHAH S., 2012.** Biodegradation of Nylon 6 by *Trametes versicolor*. *International Journal of Environmental Sciences*, 3(2), pp. 789–796.

- **CRAWFORD C.B. et QUINN B., 2017.** Microplastic Pollutants. Elsevier, Amsterdam, 315 p.
- **DANSO D., CHOW J. et STREIT W.R., 2019.** Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(19), e01095-19.
- **DAVET P., 1996.** Vie microbienne du sol et production végétale. Paris : INRA.
- **DEBROAS D., MONE A. et TER HALLE A., 2017.** Plastics in the North Atlantic garbage patch. *Science of the Total Environment*, 599–600, pp. 1222–1232.
- **DERAIRK J.G.B., 2002.** The pollution of the marine environment by plastic debris. *Marine Pollution Bulletin*, 44(9), pp. 842–852.
- **DIGHTON J., 2003.** Fungi in Ecosystem Processes. New York : Marcel Dekker.
- **GEYER R., JAMBECK J.R. et LAW K.L., 2017.** Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.
- **GHOSH S.K., PAL S. et RAY S., 2013.** Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, pp. 4339–4355.
- **GU J.D., 2003.** Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 52, pp. 69–91.
- **HARSHVARDHAN K. et JHA B., 2013.** Biodegradation of low-density polyethylene by marine bacteria from pelagic waters, Arabian Sea, India. *Marine Pollution Bulletin*, 77(1–2), pp. 100–106.

- **HOPEWELL J., DVORAK R. et KOSIOR E., 2009.** Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 364(1526), pp. 2115–2126.
- **KRUEGER M.C., HARMS H. et SCHLOSSER D., 2015.** Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99, pp. 8857–8874.
- **PATHAK V.M., 2017.** Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach. *Bioresources and Bioprocessing*, 4(15), pp. 1–31.
- **PLASTICS EUROPE, 2018.** Plastics – The Facts 2018. Bruxelles.
- **PLASTICS EUROPE, 2019.** Plastics – The Facts 2019. Bruxelles.
- **PLASTICS EUROPE, 2020.** Plastics – The Facts 2020. Bruxelles.
- **PLASTICS EUROPE, 2022.** Plastics – The Facts 2022. Bruxelles.
- **ROCHMAN C.M., HOH E., HENTSCHEL B.T. et KAYE S., 2013.** Long-term field measurement of sorption of organic contaminants to plastic pellets. *Environmental Science & Technology*, 47(3), pp. 1646–1654.
- **SHAH A.A., HASAN F., HAMEED A. et AHMED S., 2008.** Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), pp. 246–265.
- **SHIMAO M., 2001.** Biodegradation of plastics. *Current Opinion in Biotechnology*, 12(3), pp. 242–247.
- **THOMPSON R.C., OLSEN Y., MITCHELL R.P. et al., 2004.** Lost at sea: where is all the plastic? *Science*, 304(5672), p. 838. URBANEK A.K.,

- **RYMOWICZ W. et MIROŃCZUK A.M., 2018.** Degradation of plastics and plastic-degrading bacteria in cold marine habitats. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(18), pp. 7669–7678.
- **YOSHIDA S., HIRAGA K., TAKEHANA T. et *al.*, 2016.** A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351(6278), pp. 1196–1199.
- **ZETTLER E.R., MINCER T.J. et AMARAL-ZETTLER L.A., 2013.** Life in the “Plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science & Technology*, 47(13), pp. 7137–7146

A decorative banner with a central white rectangular box containing the word "Annexes". The banner has a light gray background and features a stylized ribbon or scroll design on the left and right sides, with pointed ends.

Annexes

Matériels utilisés :

Le plastique (le polluant) :

Pour notre expérience on a utilisé les sachets transparents PE (sachet de la congélation alimentaire), qui sont considérés comme l'un des principaux polluants rejetés dans l'environnement, ils sont aussi un problème majeur en terme des déchets

Les matériaux biologiques :

Les matériaux biologiques utilisés dans la biodégradation de plastiques sont :

les champignons (Trichoderma , Aspergillus Niger)

La bactérie *Bacillus*

Les huiles essentielles (citron, orange, eucalyptus)

Les micro-organismes

Matériel de laboratoire :

Gros matériel :

- Balance de précision
- Incubateur (étuve)
- Agitateur magnétique

Petit matériel :

- Barreau magnétique
- Pinces
- Spatule
- Bec Bunsen
- Scalpels
- Pipette

Verrerie :

- Boîtes de péries
- Bécher
- Flacons
- Emporte pièce 1cm de diamètre

Matériel consommable :

- Papier aluminium
- Stylo permanente
- Les gobelets
- Les huiles essentielles

Produits chimiques :

- PDA
- Poudre de gélose nutritive
- Eau distillé (HO)
- Sulfate de magnésium (MgSO_4)
- Chlorure de sodium (Na Cl)
- Chlorure de potassium (KCl)
- Sulfate de fer (FeSO_4)
- Dihydrogénophosphate de potassium (KH_2PO_4)

Mode d'emploi

Préparation de milieu czapek :

- Il est préparer à partir d'une solution contenant :
- 2g de NaCl
- 0,5g de MgSO_4
- 0,5g de KCl ,
- 1g de KH_2Po_4 et
- 0,001g de FeSO_4

dissoudre dans 500ml d'eau distillé

Mode d'emploi

Préparation de milieu de gélose nutritif :

Le milieu a été préparé en dissolvant 7 g de poudre de gélose nutritive dans 250 ml d'eau distillée. a ensuite été stérilisé dans une cocotte-minute pendant 30 minutes à 120°C puis coulé dans des boîtes de Pétri jusqu'à ce qu'ils soient solides .

Mode d'emploi

Préparation de milieu de PDA :

Le milieu PDA a été acidifié à un pH compris entre 4,5 et 5 en y ajoutant 1 ml d'acide lactique à 25 % pour chaque flacon de 500 ml d'eau distille et 21g de poudre .

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم إمكانات بعض العوامل البيولوجية الطبيعية في التحلل الحيوي للبلاستيك، وذلك باستعمال الفطريات والبكتيريا والكائنات الحية الدقيقة الموجودة في التربة والزيوت الأساسية. أظهرت النتائج أن فطر *Aspergillus niger* أظهر قدرة على التحلل الحيوي بلغت 6.49٪، في حين سجل *Trichoderma sp.* نسبة تحلل بلغت 5.23٪. كما أظهرت بكتيريا *Bacillus subtilis* انخفاضاً ملحوظاً في كتلة البلاستيك بنسبة تحلل بلغت 10.54٪. كما ساهمت الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في التربة في عملية التحلل الحيوي. وفيما يتعلق بالزيوت الأساسية، أظهر الزيت الأساسي لـ *Citrus limon* نسبة تحلل بلغت 4.03٪، يليه *Citrus sinensis* بنسبة 4.26٪، بينما سجل *Eucalyptus globulus* قيمة تراوحت بين 1.32٪ و 2.08٪. تبرز هذه النتائج الأهمية الكبيرة لهذه العوامل البيولوجية باعتبارها بدائل بيئية واعدة في مجال التحلل الحيوي للبلاستيك والحد من آثاره البيئية. كما يمكن أن يشكل استخدامها مقارنة مستدامة في إطار استراتيجيات المعالجة الحيوية للنفايات البلاستيكية.

الكلمات المفتاحية: سمية البلاستيك، التحلل الحيوي، الفطريات، البكتيريا، الكائنات الحية الدقيقة في التربة، الزيوت الأساسية، المعالجة.

Abstract

This study aims to evaluate the impact of selected biological agents on plastic biodegradation, focusing primarily on fungal species *Aspergillus niger* and *Trichoderma sp.* the bacterial strain *Bacillus subtilis*, soil microorganisms, and some selected essential oils. The research findings proved that all tested agents contributed to the biodegradation process, but with a different level of effectiveness. *Bacillus subtilis* exhibited the highest biodegradation rate (10.54%), followed by *Aspergillus niger* (6.49%) and *Trichoderma sp.* (5.23%). Soil microorganisms also contributed to plastic degradation. Among the essential oils, *Citrus limon* and *Citrus sinensis* which showed biodegradation rates of 4.03% and 4.26%, respectively, whereas *Eucalyptus globulus* exhibited lower values ranging from 1.32% to 2.08%. These findings highlight the significant role of these biological agents and natural product in the biodegradation process. Demonstrating their potential as environmentally sustainable alternatives for plastic waste bioremediation.

Keywords: Plastic toxicity, biodegradation, fungi, bacteria, soil microorganisms, essential oils, and bioremediation.

Résumé

Cette étude vise à évaluer le potentiel de certains agents biologiques naturels dans la biodégradation du plastique par des champignons, bactérie, des microorganismes du sol et des huiles essentielles. Les résultats ont révélé qu'*Asp.niger* a présenté une capacité de biodégradation atteignant 6,49 % contre *Trichoderma sp.* Avec 5,23 %. *Bacillus subtilis* a montré une diminution importante de la masse du plastique avec 10,54 %. Les microorganismes du sol ont aussi participé au processus de biodégradation et enfin l'H.E *Citrus limon* montre une dégradation de 4,03 % suivi de *Citrus sinensis* avec 4,26 % et d'*Eucalyptus globulus* avec des valeurs comprises entre 1,32 % et 2,08 %.

Ces résultats mettent en évidence le potentiel biologique important comme alternatives écologiques prometteuses à la biodégradation du plastique et à la réduction de leur impact environnemental. Leur utilisation pourrait constituer une approche durable dans le cadre des stratégies de bioremédiation des déchets plastiques.

Mots-clés : Toxicité du plastique, biodégradation, champignons, bactérie, microorganismes du sol, huiles essentielles et bioremédiation.