



Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبو بكر بلقايد - تلمسان

Université ABOUBEKR BELKAID – TLEMEN

كلية علوم الطبيعة والحياة، وعلوم الارض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, et des Sciences de la Terre et de l'Univers

Département d'écologie et environnement

Laboratoire de recherche Ecologie et Gestion des Ecosystèmes Naturels

MÉMOIRE

Présenté par

ATTAR Rania

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Toxicologie Industrielle et Environnementale

Thème

Recherche des champignons dégradants la toxicité des polluants synthétiques de l'environnement

Soutenu le 29 juin 2025, devant le jury composé de :

Présidente	Mme Haddam Nahida	professeur	Univ. Tlemcen
Encadrante	Mme Bouayad Alam Samira	MCB	Univ. Tlemcen
Examinatrice	Mme Rahal Benguedda Meriem.W	MCA	Univ. Tlemcen

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

*J'adresse mes plus sincères remerciements à mon encadrante Madame, **BOUAYAD ALAM SAMIRA**, pour sa disponibilité, ses conseils précieux, sa patience et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie également tous les enseignants du département d'**écologie et environnement de l'Université Abou bekr Belkaid-Tlemcen**, pour leur engagement, leur professionnalisme et la qualité de l'enseignement qu'ils nous ont transmis tout au long de notre parcours universitaire.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à Madame **BRAHIMI KHOLKHAL WAHIBA** pour son soutien, ses précieux conseils et sa bienveillance tout au long de ce parcours. Sa disponibilité et son professionnalisme ont été d'une grande aide et inspiration pour moi.*

*Je remercie 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.*

*Je remercie également Madame **HADDAM NAHIDA**, présidente du jury, pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de présider cette soutenance et pour l'intérêt qu'elle a porté à mon travail.*

*Enfin, je pense avec reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail. **Merci à vous tous.***

Dédicace

*A ceux qui ont semé en moi l'amour du savoir et de la connaissance, à mes chers parents **ATTAR ALI** et **MAHDAOUI FATIMA**, battement de mon cœur et piliers de ma vie, à ceux qui ont partagé avec moi la fatigue, les nuits blanches, et qui ont toujours été mon soutien dans chaque étape.*

*A mes frères **ATTAR MOUHAMED SOUHAIB** et **ATTAR ARBI YACINE**, ma sœur **ATTAR SOUHILA**, et **TOUTE MA FAMILLE**, pour leur amour constant, leur présence rassurante, et leurs encouragements.*

*A mes amies fidèles Helal **Rihab**, Bouaoued **Fatima**, Benkhira **Ahlem**, **Meriem**, **Malak**, **Hadjer**, **Kawther** avec qui j'ai partagé les rires, les doutes et les espoirs.*

Et à toute personne proche de mon cœur, dont la présence discrète mais précieuse a été une lumière dans l'ombre ce travail modeste vous est dédié, avec gratitude et tendresse.

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى اقتراح حلول بديلة ومستدامة حول استخدام العوامل الطبيعية مثل تريكوديرما *Trichoderma* و الرشاشية السوداء *Aspergillus niger* و بنيسيليوم *Penicillium* في تحلل المواد البلاستيكية، من أجل تقليل تلوث البيئة وحماية صحة الإنسان.

يتبين من خلال النتائج أن تريكوديرما *Trichoderma* و *Asp. niger* يُظهران نشاطاً ملحوظاً في تحلل المادة البلاستيكية، حيث سُجِّل انخفاض في كتلة البلاستيك بنسبة 3% لكليهما في الوسط الصلب، وبنسبة 4% بالنسبة ل تريكوديرما *Trichoderma* و 3% بالنسبة ل *Asp. niger* في الوسط السائل. في المقابل؛ بنيسيليوم *Penicillium* لم يُسجَّل أي نشاط لتحلل مادة البلاستيك.

تمت ملاحظة تغيرات في المظهر الخارجي بالإضافة إلى نمو فطري كثيف على سطح العينات. تُبرز هذه النتائج الإمكانيات والقدرة البيولوجية الكبيرة لهذه الفطريات في المعالجة البيولوجية (المعالجة الحيوية) للنفايات البلاستيكية.

الكلمات المفتاحية:

بلاستيك، تلوث، التحلل الحيوي، تريكوديرما *trichoderma*، الرشاشية السوداء *Aspergillus niger*،

Abstract

The aim of this study is to propose alternative and sustainable solutions using natural agents like *Trichoderma*, *Aspergillus niger*, and *Penicillium* in order to break down plastic materials and helping to reduce environmental pollution and safeguarding the human health.

The results show that *Trichoderma* and *Asp. niger* exhibit significant activity in breaking down plastic materials, with a mass reduction of 3% in solid environment for both *Trichoderma* and *Asp. niger*, and a reduction of 4% for *Trichoderma* and 3% for *Asp. niger* in liquid environment. However, *Penicillium* did not show any activity to degrade plastic.

Changes in the external appearance and a heavy fungal growth on the surface of the samples, were observed. These results show the significant biological potential of these fungi in the bioremediation of plastic waste.

Keywords: plastic, pollution, biodegradation, *Trichoderma*, *Aspergillus niger*

Résumé

La présente étude a pour objectif de proposer des solutions alternatives et durables sur l'utilisation des agents naturelles *Trichoderma*, *Aspergillus niger* et *Penicillium* à dégrader les matières plastiques pour réduire la pollution de l'environnement et pour protéger la santé humaine.

Les résultats montrent que *Trichoderma* et *Asp. niger* ont une activité notable dans la dégradation de la matière plastique avec une diminution de la masse du plastique de 3% pour *Trichoderma* et *Asp. niger* en milieu solide et de 4% pour *Trichoderma* et 3% pour *Asp. niger* en milieu liquide. En revanche, *Penicillium* n'a montré aucune activité de dégradation du plastique.

Des changements dans l'apparence extérieure ainsi qu'une croissance fongique dense à la surface des échantillons ont été observés. Ces résultats mettent en évidence le potentiel biologique important de ces champignons dans la bioremédiation des déchets plastiques.

Mots clés : plastique, pollution, biodégradation, *Trichoderma*, *Aspergillus niger*.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
Partie 1 : Le plastique	
1- Définition de plastique.....	3
2- Les différents types de plastique.....	4
3- Classification des plastiques basée sur la biodégradabilité.....	6
3-1- Le plastique biodégradable.....	6
3-1-1- Plastiques biodégradables d'origine biologique.....	7
3-1-2- Plastiques biodégradables d'origine fossile.....	9
3-1-3- Autres polymères dégradables.....	11
3-2- Le plastique non biodégradable.....	11
3-2-1- Les thermoplastiques.....	12
3-2-2- Des plastiques thermodurcissables.....	13
4- Le plastique naturel.....	14
4-1- Cellulose.....	14
4-2- Hémicellulose.....	15
4-3- Lignine.....	16
5- La cause de la toxicité de plastique.....	16
Partie 2 : La pollution par le plastique	
1- Introduction.....	17
2- Les types des pollutions par le plastique.....	18
2-1- pollution par les micro plastiques.....	18
2-2- pollution par les nano plastiques.....	19

3- pollution du sol par le plastique.....	19
3-1- origine des micro plastiques du sol.....	19
3-2- sources et voies de pénétration des micro plastiques dans le sol.....	20
3-3- les effets des micro plastiques sur le sol.....	28
3-3-1- les effets des micro plastiques sur les propriétés physiques et chimiques du sol.....	28
3-3-2- effets des micro plastiques sur les microorganismes du sol.....	28
3-3-3- effets des micro plastiques sur la faune du sol.....	29
3-3-4- effets des micro plastiques sur les plantes.....	30
3-3-5- les effets sur la santé humaine.....	32
4- La pollution de plastique en Algérie.....	33

Partie 3 : La dégradation de plastique

1- Définition de la dégradation du plastique.....	35
2- Mécanismes de dégradation du plastique.....	35
2-1- Dégradation abiotique des plastiques.....	35
2-1-1- photo dégradation des plastiques.....	36
2-1-2- dégradation thermique.....	36
2-1-3- dégradation chimique des plastiques.....	37
2-1-4- dégradation mécanique des plastiques.....	37
2-2- Biodégradation ou dégradation biotique des plastiques.....	38
2-2-1- dégradation microbienne.....	40
2-2-2- dégradation enzymatique.....	40

Partie 4 : Les champignons et la lutte biologique

1- Définition des champignons.....	42
2- Classification des champignons.....	42
3- La morphologie des champignons.....	43
4- Le mode de vie des champignons.....	44

4-1- Saprophyte ou néctrophe.....	44
4-2- Parasite ou biotrophe.....	44
4-3- Symbiotique.....	45
5- Nutrition des champignons.....	45
6- La croissance des champignons.....	46
7- La reproduction des champignons.....	47
7-1- Reproduction asexuée.....	47
7-2- Reproduction sexuée.....	47

CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES

Partie I : Présentation de la zone d'étude

1- Localisation des stations d'étude et site de prélèvement.....	48
2- Prélèvement.....	49

Partie II : Etude Microbiologique

1- Isolement des champignons.....	50
1-1- Milieux d'isolement.....	50
1-2- La mise en culture.....	51
2- Purification et conservation.....	52
3- Identification.....	52
3-1- Identification macroscopique.....	53
3-2- Identification microscopique.....	53

Partie III : Test de biodégradation du plastique par les champignons isolés (lutte biologique)

1- Dégradation du plastique en milieux liquide.....	54
2- Dégradation du plastique en milieu solide (dans le sol).....	55

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSION

I – RESULTATS.....	56
1- Résultats de l'étude microbiologique.....	56
1-1- Résultats d'isolement.....	56
1-2- Résultats de purification.....	57
1-3- Résultats d'identification.....	58
1-3-1- Identification macroscopique.....	58
1-3-2- Identification microscopique.....	60
2- Résultats du test de biodégradation du plastique (lutte biologique).....	64
2-1- sur milieu liquide.....	65
2-2- sur milieu solide (sol).....	67
II – DISCUSSION.....	70
CONCLUSION.....	72
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

Listes des tableaux

Tableau 1 : les principaux types de plastiques (Andrady,2011 ; Asuquo,2018 ; Matthieu,2020).....	5
Tableau 2 : résultats d'isolement des champignons.....	57
Tableau 3 : la masse de plastique avant et après l'incubation avec chaque souche sur le milieu liquide.....	66
Tableau 4 : la masse de plastique avant et après l'incubation avec chaque souche sur le sol.....	68

Listes des figures

Figure 1 : Diagramme schématique des sources de micro plastique dans l'écosystème des sols (Yu et al., 2022).....	27
Figure 2 : Diagramme schématique montrant l'effet des micro plastiques sur les paramètres du sol, les organismes du sol, les plantes et les microorganismes, et l'adsorption d'ions (Yu et al., 2022).....	31
Figure 3 : Les différentes des structures des hyphes fongiques (Tortora et al., 2003)...	44
Figure 4 : Carte de la zone d'étude d'Ouled Mimoun (internet).....	48
Figure 5 : Pourcentage de dégradation du plastique sur le milieu liquide.....	66
Figure 6 : Pourcentage de dégradation du plastique sur le sol.....	69

Listes des photos

Photo 01 : Accumulation des déchets plastiques dans l'environnement forestier (internet).....	17
Photo 02 : Les déchets de plastique sur une plage de Béjaia (Brahim 2012).....	34
Photo 03 : site d'étude en plein champ (station 1 : champ de carotte ; station 2 : champ de petits pois).....	49
Photo 04 : les échantillons des champs étudiés.....	49
Photo 05 : préparation de PDA (A) et acidification (B).....	50
Photo 06 : préparation de l'échantillon.....	51
Photo 07 : boîtes de Pétri coulée.....	51
Photo 08 : technique de scotch.....	53
Photo 09 : préparation du sol.....	55
Photo 10 : résultats d'isolement des champignons A (R6) ; B (R4).....	56
Photo 11 : les souches pures.....	58
Photo 12 : image microscopique de la souche de penicillium.....	61

Photo 13 : image microscopique de la souche de Trichoderma.....62

Photo 14 : image microscopique de la souche de Aspergillus niger.....62

Photo 15 : image microscopique de la souche Aspergillus.....63

Photo 16 : image microscopique de la souche de Paecilomyces.....64

Photo 17 : résultats du test de dégradation sur milieu liquide.....65

Photo 18 : Résultats de test de dégradation sur le sol.....67

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'accumulation des déchets plastiques, représente une menace environnementale majeure en raison de leur résistance à la dégradation et de leurs impacts nocifs sur les écosystèmes ainsi que sur la santé humaine. Présents dans presque tous les aspects de la vie quotidienne, ces plastiques libèrent des particules toxiques de tailles micro et nanométriques, tout en contribuant aux émissions de gaz à effet de serre, ce qui accentue le réchauffement climatique (**Daussault, 2017**).

Dans ce contexte, la recherche s'oriente vers des alternatives plus durables, telles que la biodégradation par des champignons. Cette approche repose sur la bioremédiation, un procédé qui utilise des enzymes spécifiques produites par des micro-organismes pour décomposer les polluants. Contrairement aux méthodes mécaniques ou chimiques, cette solution présente l'avantage de limiter la formation de sous-produits toxiques. (**Saadi, 2008**).

Dans le cadre des recherches visant à trouver des solutions durables à la pollution plastique, les champignons se sont révélés être des agents biodégradants particulièrement efficaces. Grâce à leur production d'enzymes capables de fragmenter les structures polymériques, ils permettent une dégradation progressive des plastiques dans l'environnement naturel (**Khan et al., 2020**). Ce processus de biodégradation représente une alternative prometteuse aux méthodes traditionnelles de gestion des déchets.

En parallèle, les champignons interviennent également dans la lutte biologique en limitant naturellement la prolifération de certains organismes nuisibles, contribuant ainsi à la préservation des écosystèmes et à la promotion d'une agriculture plus durable (**Fang et al., 2021**).

Ce mémoire porte sur la capacité de biodégradation du plastique par les champignons *Trichoderma*, *Aspergillus niger* et *Penicillium* dans des conditions contrôlées. C'est un thème qui suscite un intérêt croissant dans les domaines d'écologie et de toxicologie en raison de l'abondance des déchets plastiques et leur dispersion partout dans l'environnement.

L'objectif principal de cette étude est la recherche des champignons capables de dégrader et/ ou diminuer la toxicité du plastique, tout en préservant par la suite l'environnement et la santé humaine.

Ce travail est structuré comme suit :

- Le premier chapitre présente une revue de littérature qui permet de situer notre recherche dans le contexte scientifique actuel comportant quatre parties : la première est consacrée à la définition du plastique, la deuxième à la pollution du plastique, la troisième à la dégradation du plastique puis nous avons terminé le chapitre par les champignons et la lutte biologique à savoir l'activité antifongique.
- Le deuxième chapitre présente le matériel et la méthodologie employée pour conduire l'étude. La première partie consiste en présentation de la zone d'étude, la deuxième partie à une étude microbiologique et la troisième aux tests de biodégradation du plastique par les champignons (lutte biologique).
- Les résultats obtenus sont présentés dans le troisième chapitre ensuite ils sont discutés au regard des données de la littérature.

Enfin une conclusion générale clôture ce travail avec une synthèse des principaux résultats obtenus ainsi que des perspectives que nous proposons.

A travers ce mémoire, nous espérons apporter une contribution modeste mais significative à la compréhension de la capacité des champignons pour dégrader le plastique tout en ouvrant la voie à des nouvelles pistes d'investigation en préservant à la fois la santé humaine et l'environnement.

ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

PARTIE 1 : LE PLASTIQUE**1- définition**

Le terme matière plastique désigne une substance synthétique composée de macromolécules obtenues par polymérisation ou polycondensation, pouvant être moulée ou modelée. Cette définition englobe plusieurs concepts clés : matière synthétique, macromolécule, polymérisation et polycondensation **(Rey, 2007)**.

Le mot plastique renvoie avant tout à la capacité de mise en forme, signifiant qui a le pouvoir de donner une forme. Il tire son origine du latin plasticus, lui-même issu du grec plastikos, signifiant malléable, apte à être modelé **(Rey, 1992)**.

L'invention du plastique remonte aux années 1860, lorsque le chimiste Parkes a mis au point le premier matériau plastique, connu sous le nom de Parkesine **(Streit-Bianchiet et al., 2020)**.

De l'invention des plastiques synthétiques à l'émergence des bioplastiques d'origine naturelles, l'industrie du plastique a connu une évolution constante grâce aux contributions de nombreux chimistes et chercheurs à travers le monde. Avec une consommation et une demande en constante augmentation, cette industrie occupe aujourd'hui une place centrale sur la scène mondiale **(Oktavilia, 2020)**.

Depuis plus d'un demi-siècle, les polymères synthétiques ont progressivement remplacé les matériaux naturels dans presque tous les domaines. Aujourd'hui, les plastiques sont devenus essentiels à notre quotidien. Leur stabilité et leur durabilité ont été continuellement améliorées, si bien qu'ils sont désormais considérés comme des matériaux particulièrement résistants aux influences environnementales. **(Joel, 1995)**.

Les plastiques modernes sont fabriqués à partir de matières premières inorganiques et organiques, notamment le carbone, le silicium, l'hydrogène, l'azote, l'oxygène et le chlorure. Ces matériaux de base proviennent principalement du pétrole, du charbon et du

gaz naturel (**Seymour, 1989**). Grâce à leur résistance aux attaques microbiennes, les plastiques persistent longtemps dans l'environnement. En effet, leur apparition relativement récente dans la nature n'a pas permis à l'évolution de développer des enzymes capables de dégrader ces polymères synthétiques (**Mueller, 2006**).

Aujourd'hui, les polymères synthétiques sont largement utilisés dans divers secteurs tels que l'industrie, l'agriculture, la médecine, les transports, la construction, ainsi que le stockage et les abris. Parmi ces usages, l'emballage représente environ 30 % de la consommation mondiale du plastique, en raison de leur coût abordable, de leur grande ductilité et de leur durabilité. La production et la consommation de plastiques ont connu une croissance exponentielle à l'échelle mondiale, passant de $1,7 \times 10^6$ tonnes en 1950 à $3,22 \times 10^8$ tonnes en 2015, pour une production totale estimée à $7,8 \times 10^{11}$ tonnes (**Shah et al., 2008b ; Kumar et al., 2011 ; Dey et al., 2012 ; Laskar et Kumar, 2019 ; Mishra et al., 2020**).








Grâce à leurs propriétés malléables, solides, durables, légères et peu coûteuses, les polymères synthétiques sont largement utilisés dans la fabrication de divers produits. Ils sont particulièrement prisés pour la production d'articles ménagers, d'emballages et de sacs à provisions, dont une grande partie est destinée à un usage unique (**Thompson et al., 2009**).

Cependant, leur utilisation massive soulève des préoccupations environnementales, notamment en raison de l'épuisement des ressources fossiles, de leur contribution au changement climatique et des émissions de gaz à effet de serre qui en résultent (**Abdul-Latif et al., 2020**).

2- Les différents types de plastique

Il existe une grande variété des plastiques, classés selon leur mode de fabrication et leur durabilité. On distingue sept grandes catégories principales (**Matthieu, 2020**) (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Les principaux types de plastiques non biodégradables (Andrady, 2011 ; Asuquo, 2018 ; Matthieu,2020).

Type de plastique	Symbole	Exemple
Le Polyéthylène Téréphtalate (PET)		Emballages alimentaires et Cosmétiques, bouteilles d'eau, etc.
Le Polyéthylène Haute Densité (HDPE)		Les bouteilles de produits ménagers, détergents, etc.
Le Polychlorure de Vinyle (PVC)		Fabrication des jouet, meubles et articles ménagers. Emballages du fromage et la viande.
Le Polyéthylène Basse Densité (LDPE)		Certains sacs et emballages plastiques.
Le Polypropylène (PP)		Pièces de voitures et emballages médicaux
Le Polystyrène (PS)		Le mobilier, les jouets, emballages alimentaires, produits jetables, etc.
Autres (polycarbonate, acétate de cellulose, etc.) (OTHER)		D'autres plastiques non cités comme CDs, DVDs, filtre de cigarettes, etc.

3- Classification des plastiques basée sur la biodégradabilité

Les plastiques se divisent en deux catégories en fonction de leur biodégradabilité : les plastiques biodégradables et les plastiques non biodégradables.

3-1- Les plastiques biodégradables

Les polymères, qu'ils soient biosourcés ou issus de ressources fossiles, peuvent être intégrés aux plastiques biodégradables en fonction de leur degré de biodégradabilité et de leur assimilation par les micro-organismes. La dégradation de ces plastiques repose sur un processus d'hydrolyse, qui peut être d'origine enzymatique ou non enzymatique. (**Wackett et Hershberger, 2001**).

L'efficacité des processus de biodégradation est influencée par plusieurs facteurs, notamment le type d'organisme, la nature du prétraitement et les caractéristiques du polymère. Parmi ces caractéristiques, des éléments tels que la mobilité, la cristallinité, la nature des groupes fonctionnels, la tactilité, la composition chimique, le poids moléculaire et les additifs jouent un rôle clé dans la dégradation des plastiques (**Artham et Doble, 2008**).

Lors du processus de dégradation, les micro-organismes libèrent des exo-enzymes capables de fragmenter les polymères complexes en molécules plus petites, comme les monomères et les dimères. Ces molécules de petite taille peuvent ensuite traverser les membranes semi-perméables des cellules bactériennes, où elles sont utilisées à la fois comme source d'énergie et de carbone (**Gu, 2003 ; Jayasekara et al., 2005**). La biodégradation repose sur des réactions qui peuvent se dérouler aussi bien en milieu aérobie qu'anaérobie (**Shah et al., 2008**).

3-1-1- Plastiques biodégradables d'origine biologique

Les plastiques biodégradables issus de ressources renouvelables présentent des avantages environnementaux notables dans certaines applications industrielles, notamment en raison de leur capacité à se dégrader entièrement par des processus biologiques (**Kale et al., 2007**).

Parmi ces plastiques, ceux fabriqués à partir de matériaux biosourcés comme la cellulose, l'amidon et les polymères dérivés de l'amidon sont particulièrement intéressants. Grâce à leur faible poids moléculaire, ils peuvent être directement assimilés par les micro-organismes à travers une dégradation enzymatique extracellulaire. L'amidon, en particulier, est largement utilisé dans la production de plastiques biodégradables en raison de son abondance, de sa disponibilité immédiate, de son coût relativement bas et de sa capacité à se décomposer sous certaines conditions environnementales (**Chattopadhyay et al., 2011 ; Kyrikou et Briassoulis, 2007 ; Nanda et al., 2010**).

Composé principalement d'amylopectine et d'amylase, l'amidon constitue une alternative viable aux plastiques conventionnels. Les polymères issus de l'amidon se divisent en deux grandes catégories : (a) les polymères contenant une charge d'amidon et (b) les polymères à base d'amidon (**Jayasekara et al., 2005**). La dégradation complète de ces polymères est assurée par l'action des micro-organismes tels que les bactéries, les champignons et les algues, ainsi que par divers facteurs environnementaux (**Kasirajan et Ngouajio, 2012**).

Divers micro-organismes, tels que *Variovorax paradoxus*, *Comamonas sp.*, *Aspergillus fumigatus*, *Acidovorax faecilis* et *P. lemoignei*, isolés du sol, sont capables de dégrader les bio-polymères dans des conditions aussi bien anaérobies qu'aérobies (**Shah et al., 2008**).

❖ Polyhydroxyalcanoates (PHA) :

C'est un polyester d'origine biosourcée, biodégradable, naturellement produit par la fermentation bactérienne de sucres et de lipides (**Shimao, 2001**). Grâce à leur biodégradabilité, les polymères PHA trouvent des applications dans les industries de l'emballage, ainsi que dans les domaines médicale et pharmaceutique (**Philip et al., 2007**). D'autres articles couramment fabriqués en PHA incluent les matériaux utilisés dans la restauration rapide, les outils médicaux jetables, Les Matériaux d'emballage ainsi que certaines peintures (**Flieger et al., 2003**).

La biodégradation microbienne du PHA dépend des conditions du sol et de l'environnement. En présence de sources limitées d'énergie et de carbone, les micro-organismes peuvent décomposer le PHA et l'exploiter comme source de carbone et d'énergie (**Chen et patel, 2011**). Parmi les genres bactériens capables de dégrader le PHA, *Nocardiopsis* et *Cupriavidus* (**Boyandin et al., 2013**). De meme, certains genres fongiques, tels que *Mycobacterium* et *Micromycetes*, sont également connus pour assimiler le PHA en utilisant des mécanismes aussi bien aérobies qu'anaérobies (**Boyandin et al., 2013**).

❖ L'acide polylactique (PLA) :

L'acide polylactique (PLA) est produit à l'échelle industrielle par l'entreprise Nature Works aux États-Unis, avec une capacité de 150 000 tonnes par an. Issu de ressources renouvelables telles que l'amidon de maïs, les racines de tapioca ou la canne à sucre, ce polymère est particulièrement apprécié en médecine pour sa biocompatibilité, permettant son incorporation dans les organismes humains et animaux (**Ikada et Tsuji, 2000**).

Le PLA est le principal plastique biodégradable biosourcé en raison de sa large disponibilité, de sa capacité à se dégrader naturellement et de ses excellentes propriétés mécaniques (**Liu et al., 2000**). Les produits issus de la dégradation hydrolytique du PLA sont entièrement assimilables par les micro-organismes (**Fukushima et al., 2009**).

Amycolatopsis sp. et *B. licheniformis*, récemment isolés du sol, sont capables de dégrader le PLA (Anderson et Shive, 2012 ; Fukushima et al., 2009). Lipase purifiée à partir du champignon *Cryptococcus sp.*, souche S-2, présente une homologie lointaine avec les protéines de la famille des cutinases et démontre une biodégradation efficace du PLA (Masaki et al., 2005).

3-1-2- Plastiques biodégradables d'origine fossile

Les plastiques biodégradables d'origine fossile ont trouvé diverses applications, notamment dans l'industrie de l'emballage. Cependant, la plupart d'entre eux ne se dégradent pas naturellement, ce qui pose un défi majeur en matière de gestion des déchets (Hoshino et al., 2003 ; Vert et al., 2002).

L'accumulation de leurs déchets dans l'humus représente un défi majeur pour la matrice de la contamination (Goldstein, 2005). Ces plastiques sont couramment utilisés pour l'emballage de divers produits, notamment pharmaceutiques, alimentaires, cosmétiques et chimiques. Leur dégradation s'avère extrêmement lente et implique plusieurs agents environnementaux, y compris des micro-organismes et leurs enzymes (Chen et Patel, 2011 ; Shah et al., 2008 ; Chen, 2010 ; Mir et al., 2017).

❖ Succinate de polyéthylène (PES) :

Le succinate de polyéthylène (PES) est un polyester thermoplastique. Sa fabrication repose soit sur la copolymérisation de l'oxyde d'éthylène avec l'anhydride succinique, soit sur la polycondensation de l'éthylène glycol et l'acide succinique (Hoang et al., 2007).

Dans l'industrie du plastique, le PES est employé pour la fabrication de films agricoles, comme agent de revêtement pour le papier et dans la production de sacs à provision. Ce polymère serait efficacement dégradé par une souche bactérienne mésophile appelée *Pseudomonas sp. AKS2* (Tribedi et Sil, 2014).

Contrairement au PCL, dont la dégradation est assurée par une grande diversité de microbes, le PES ne peut être dégradé que par un nombre limité de micro-organisme. Une souche thermophile capable de dégradé le PES, *Bacillus sp. TT96*, a notamment été isolée du sol (**Tokiwa et al., 2009**).

Par ailleurs, plusieurs microbes mésophiles ayant une capacité naturelle à dégrader le PES ont été isolés. Sur le plan phylogénétique, ces micro-organisme appartiennent aux genres *Bacillus* et *Paenibacillus* (**Tezuka et al., 2004 ; Tokiwa et al., 2009**).

❖ Polycaprolactone (PCL) :

La polycaprolactone est un polyester partiellement cristallin qui se dégrade facilement sous l'action de micro-organismes aérobies et anaérobies. Grâce à sa flexibilité et sa biodégradabilité, elle suscite un intérêt croissant malgré son coût élevé (**Wu, 2005**). Ce polymère est souvent combiné à d'autres copolymères pour la fabrication de matériaux d'emballage, ainsi que pour des applications biomédicales telles que les cathéters et les poches de sang (**Wu, 2005**). Les lipases et les estérases d'origine microbienne ont la capacité de dégrader la PCL (**Karakus, 2016**).

Les bactéries impliquée dans la dégradation de la PCL sont largement répandues dans l'environnement atmosphérique (**Shimao, 2001**). Une souche du genre *Aspergillus* a été identifiée comme capable de dégrader efficacement la PCL, produisant une variété de composés tels que les acides butyrique, succinique, caproïque et valérique (**Sanchez et al., 2000**).

3-1-3- Autres polymères dégradables

➤ Alcool d'éthylène vinylique (EVOH) :

L'EVOH est un polymère synthétique hydrosoluble, couramment utilisé comme barrière à l'oxygène dans les films d'emballage multicouches. Cependant, son coût élevé constitue un frein majeur à son adoption à grande échelle dans d'autres domaines des plastiques biodégradables (**Shah et al., 2008**).

➤ Plastiques photo-biodégradables :

Les plastiques photodégradables sont des polymères thermoplastiques synthétiques contenant des additifs chimiques ou des copolymères qui fragilisent leurs liaisons sous l'effet des rayons UV. Conçus pour devenir plus faibles et cassants après une exposition prolongée au soleil, ils intègrent des photo sensibilisateurs tels que les dicétones, les dérivés de ferrocène et les carbonyles. Leur efficacité varie en fonction de l'intensité de l'exposition aux UV, influencée par des facteurs comme la saison, la localisation géographique et la présence de saletés (**Shah et al., 2008**).

3-2- Les plastiques non biodégradables

La majorité des polymères de base utilisés aujourd'hui sont soit non biodégradables, soit se décomposent trop lentement pour disparaître entièrement (**Krueger et al., 2015**).

Les plastiques non biodégradables englobent aussi bien les polymères d'origine fossile que ceux biosourcés. Les polymères synthétiques issus de ressources fossiles, couramment utilisés, sont fabriqués à partir de dérivés du pétrole et d'hydrocarbures (pétrochimie). Leur structure se caractérise par un poids moléculaire élevé, dû à la répétition en grande quantité de petites unités monomères (**Ghosh et al., 2013**).

Ces plastiques possèdent une grande stabilité et s'intègrent difficilement aux cycles naturels de dégradation de la biosphère (**Vijaya et Reddy, 2008**).

Parmi ces plastiques figurent plusieurs matériaux couramment utilisés, tels que le PVC, le PP, le PS, le PET, le PUR et le PE. Une gestion inefficace des déchets et des détritiques a entraîné leur accumulation massive dans l'environnement, représentant ainsi une menace pour la planète (**Krueger et al., 2015**).

Il est donc indispensable de mettre en place des systèmes de gestion des déchets issus de ces polymères non biodégradables (**Shah et al., 2008**). Par ailleurs, l'incorporation d'amidon et pro-oxydants permet de réduire volontairement l'inertie et la résistance de certains de ces polymères aux attaques microbiennes, favorisant ainsi leur fragmentation (**Vijaya et Reddy, 2008**). Cependant, les plastiques oxo-biodégradables sont jugés non biodégradables, faute de preuves concluantes attestant leur dégradation (**Reddy, 2008**).

3-2-1- Les thermoplastiques

➤ Le polyéthylène :

Les polyoléfinés synthétiques sont des matériaux inertes dont la structure est composée exclusivement de longues chaînes carbonées. Cette particularité les rend résistantes à la dégradation par les micro-organismes (**Yamada-Onodera et al., 2001**).

Le polyéthylène est un polymère synthétique caractérisé par une forte hydrophobicité et un poids moléculaire élevé. À l'état naturel, il n'est pas biodégradable (**Kwpp et Jewell, 1992**).

Les plastiques à base de polyoléfinés, comme le polyéthylène (PE), sont couramment employés dans la fabrication de films plastiques destinés à divers produits, notamment les emballages, les sacs de transport et de magasinage, ainsi que les gobelets.

Toutefois, leur durabilité et leur stabilité dans l'environnement soulèvent des préoccupations en raison de l'insuffisance des systèmes de gestion des déchets (**Shah et al., 2008**).

➤ **Le chlorure de polyvinyle :**

Le chlorure de polyvinyle (PVC) est un plastique robuste, reconnu pour sa résistance à l'abrasion et aux produits chimiques, ainsi que pour sa faible absorption d'humidité. Il est largement employé dans le secteur du bâtiment, notamment pour la fabrication de tuyaux, de raccords, d'isolations de câbles électriques et de revêtements de sol. De plus, il est utilisé pour concevoir des articles en cuir synthétique, des semelles de chaussures, des textiles, ainsi que des tuyaux rigides et de jardin (**Braun et Bazdadaea, 1986 ; Owen, 1984**).

➤ **Polystyrène :**

Le polystyrène (PS) est un plastique synthétique largement employé dans la fabrication de gobelets jetables, d'emballages, d'équipements de laboratoire et de certains composants électroniques. Il est particulièrement apprécié pour sa légèreté, sa rigidité et ses excellentes propriétés d'isolation thermique. Toutefois, lorsqu'il subit une dégradation thermique ou chimique, il peut libérer des substances telles que le styrène, le benzène, le toluène et l'acroléine (**Tsuchii et al., 1977**).

3-2-2- Des plastiques thermodurcissables

➤ **Polyuréthane :**

Le polyuréthane (PUR) est un matériau largement employé dans divers produits tels que les meubles, les revêtements, les matériaux de construction, les fibres et les peintures. Sur le plan structural, il résulte de la réaction de condensation entre un polyisocyanate et un polyol, formant des liaisons intramoléculaires d'uréthane (-NHCOO-), qui intègrent une liaison carbonate ester (**Saunders et Frisch, 1964**).

4- le plastique naturel

Les polymères naturels sont largement présents dans la nature, sous forme de bio polymères et de matières sèches provenant des plantes (**Leschine, 1995**). La paroi cellulaire des plantes possède une constitution distincte de celle de la biomasse lignocellulosique, qui est principalement composée de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Ces éléments constituent le polymère naturel et lui confèrent sa résistance (**Perez et al., 2002 ; Premraj et Doble, 2005**).

4-1- Cellulose

Le système terrestre est reconnu pour sa production abondante de biopolymères de cellulose. La cellulose apparaît suite à sa décomposition par des micro-organismes dans divers environnements, tels que le sol, les milieux aquatiques, le compost, les digesteurs anaérobiques et dans le cadre du cycle du carbone (**Leschine, 1995**).

De nombreux micro-organismes, notamment des bactéries et des champignons, sont connus pour leur capacité à dégrader la cellulose. Ce processus se déroule en conditions aérobies, produisant du CO₂ et de l'H₂O, ou en conditions anaérobies, entraînant la formation de CO₂, CH₄ et H₂O (**Perez et al., 2002 ; Nwachkwu et al., 2010**).

La cellulose est constituée de liaisons glycosidiques β -1,4 reliant des sous-unités de D-glucose. Elle existe sous plusieurs formes, notamment cristalline et amorphe. Dans sa forme amorphe, les chaînes de cellulose sont désorganisées et plus vulnérables à la dégradation enzymatique (**Perez et al., 2002**).

Les cellulases sont des enzymes impliquées dans la dégradation des liaisons β -1,4 glycosidiques de la cellulose. Elles se divisent en deux principales catégories : les endoglucanases (EGs ou endo-1,4- β -glucanases), qui coupent les liaisons internes des chaînes de cellulose, et les cellobiohydrolases (CBHs ou exo-1,4- β -glucanases), qui agissent sur les liaisons situées aux extrémités des chaînes (**Perez et al., 2002 ; Leschine, 1995 ; Souza, 2013 ; Kameshwar et Qin, 2016**).

4-2- Hémicellulose

L'hémicellulose est un polysaccharide hétéropolymère, à la fois linéaire et ramifié, composé de divers sucres, notamment le D-xylose, le L-arabinose, le D-glucose, le D-galactose, le D-mannose, ainsi que des acides tels que l'acide D-glucuronique, l'acide D-galacturonique et l'acide 4-O-méthyl-glucuronique. Ces unités sont reliées entre elles principalement par des liaisons glycosidiques β -1,4, bien que des liaisons β -1,3 puissent également être observées, bien que plus rarement (**Perez et al., 2002 ; Leschine, 1995 ; Werner et al., 2014 ; Giudicianni et al., 2013**). Les hémicelluloses se trouvent dans les parois primaires et secondaires des plantes et représentent environ un tiers du poids sec total du bois (**perez et al., 2002 ; Jeffrie, 1994**).

En association avec la cellulose, elle forme l'essentiel de la structure des plantes, ce qui lui vaut d'être désignée sous le terme de matériaux cellulosique ou déchets cellulosique, issus des pratiques agricoles (**Petre et al., 1999**). Les xylanes sont les hémicelluloses les plus répandues et les plus abondantes, se trouvant principalement dans les parties feuillues des angiospermes et dans les tissus résineux des gymnospermes (**Horn et al., 2012 ; Hatakka, 2005**).

4-3- Lignine

La lignine est un hétéropolymère aromatique complexe, peu soluble dans l'eau. Ce polymère phénolique renforce la paroi cellulaire des plantes grâce à une liaison interne accrue. Ses propriétés uniques lui confèrent une résistance face aux stress biologiques (**Leschine, 1995 ; Petre et al., 1999 ; Perez et al., 2002 ; Hatakka, 2005 ; Souza, 2013 ; Werner et al., 2014**).

La lignine est composée de trois monolignols phényliques propioniques : le coniféryl, le sinapyl et le p-coumaryl. Une fois intégrés dans la structure de la lignine, ces alcools forment respectivement les unités guaiacyl, syringyl et p-hydroxyphényl propanol (**Perez et al., 2002 ; Horn et al., 2012 ; Carrier et al., 2012 ; Giudicianni et al., 2013**).

5- La cause de la toxicité de plastique

Les matières plastiques sont composées de diverses substances. Leur principal constituant est un corps organique macromoléculaire, auquel s'ajoutent plusieurs adjuvants, tels que des plastifiants, des charges, des catalyseurs, des agents de condensation, des stabilisants, des lubrifiants, des ignifugeants et des fongicides.

Bien que la macromolécule elle-même ne soit pas toxique, la toxicité des matières plastiques provient principalement de certains adjuvants, en particulier certains plastifiants. Parmi les plus nocifs, on retrouve l'orthotricrésyl phosphate et les diphényles chlorés, utilisés dans la fabrication des plastiques souples.

Concernant le rhodoïd, sa toxicité serait probablement liée aux plastifiants intégrés à l'acétate de cellulose lors de sa fabrication, notamment certains esters phosphoriques, comme le tricrésylphosphate. (**Lefaux R, 1952**).

PARTIE 2 : LA POLLUTION PAR LE PLASTIQUE**1- Introduction**

À mesure que la production industrielle du plastique progresse, sa consommation suit la même tendance. Par conséquent, la quantité de déchets plastiques générés annuellement ne cesse de croître (**Photo.01**). Avec le temps, ces déchets s'accumulent dans l'environnement, entraînant des risques (**Mikaël, 2017**).



Photo 01 : Accumulation de déchets plastiques dans un environnement forestier

(<https://images.app.goo.gl/crne58uEF4xaRmB57>)

La pollution plastique se caractérise par une grande diversité, due à la multitude de produits plastiques présents sur le marché. Chaque jour, des milliers de ces produits sont consommés dans notre quotidien. Parmi les types de plastiques les plus couramment utilisés, on retrouve le PE (polyéthylène), le PP (polypropylène), le PVC (polychlorure de vinyle), le PET (polyéthylène téréphtalate) et le PS (polystyrène) (**Tableau 1**).

Bien que ces plastiques se déclinent en différentes catégories, leurs usages quotidiens impliquent généralement des mélanges constitués de monomères, d'oligomères et d'additifs. De plus, les sources de pollution plastique sont multiples et complexes, résultant principalement des diverses activités humaines (**Li et al., 2020**).

Le plastique est censé suivre un cycle fermé grâce au recyclage, ou un parcours linéaire allant de sa production à son élimination, notamment par mise en décharge ou incinération. Toutefois, malgré les dispositifs de gestion des déchets en place, des résidus plastiques se retrouvent dans divers environnements, aussi bien marins que terrestres. Cette dispersion témoigne des nombreuses failles existant tout au long du cycle de vie des matières plastiques. Si la pollution plastique a d'abord été perçue comme une nuisance visuelle, elle soulève aujourd'hui des préoccupations plus graves, liées à ses impacts écologiques et toxicologiques potentiellement nocifs (**Thompson & Russell 2004**).

2- Les types des pollutions par le plastique

Sous l'effet du rayonnement UV, de l'oxygène, de la température et du stress physique, le plastique conventionnel subit une dégradation abiotique, altérant ainsi ses propriétés (**Gewert et al., 2015**). Les grands objets en plastique, en se dégradant lentement, libèrent des particules de micro-plastiques qui peuvent être transportées sur de longues distances par le vent (**Thevenon et al., 2014**).

2-1- Pollution par les micro-plastiques

Les micro-plastiques, dont la taille est inférieure à 5 mm, se divisent en deux catégories. Les micro-plastiques primaires, présents (par exemple dans les nettoyants pour le visage et les cosmétiques), entrent directement dans l'environnement. En revanche, les micro-plastiques secondaires résultent de la dégradation progressive d'objets plastiques plus volumineux (**Veiga et al., 2016**).

2-2- Pollution par les nano-plastiques

Les nano-plastiques, mesurant entre 1 et 100 nm et issus de la dégradation secondaire du plastique, présentent un rapport surface/volume élevé qui accroît leur réactivité. Cette caractéristique favorise leur agrégation avec d'autres polluants, des colloïdes naturels et des solides en suspension. En raison de ces propriétés, ils ont suscité un intérêt croissant dans la recherche environnementale ces dernières années (**Vered et al., 2019 ; Song et al., 2017**).

3-Pollution du sol par le plastique (micro-plastiques)

3-1- Origine des micro-plastiques du sol

Les sols jouent un rôle essentiel dans le maintien de la biodiversité, la régulation du cycle des nutriments et l'approvisionnement en eau potable. Il est donc crucial de disposer de connaissances actualisées sur l'origine des micro plastiques présents dans les sols, en fonction des différents types d'utilisation des terres à l'échelle mondiale. Ces dernières années, plusieurs recherches ont été menées afin de combler les lacunes dans ce domaine, longtemps négligé dans diverses régions du monde (**Lin et al., 2019 ; Shamshina et al., 2020**).

Selon **Ding et al. (2020)**, les sols agricoles peuvent être contaminés par des concentrations de micro plastiques atteignant jusqu'à 3 410 particules par kilogramme. Dans les systèmes agricoles des zones humides, l'irrigation ainsi que l'utilisation d'engrais à base d'urée enrobés de micro plastiques ont été identifiées comme les principales sources de cette pollution. Bien que l'irrigation et les engrais soient essentiels à la croissance des cultures, notamment dans les régions où l'eau se fait rare, ils contribuent également à l'accumulation de micro plastiques dans les sols (**Lin et al., 2019 ; Shamshina et al., 2020**).

Dans les systèmes agricoles pluviaux, tels que les cultures de patates douces, le paillis plastique et les boues d'épuration sont identifiés comme les principales sources de micro plastiques dans les sols (**Huang et al., 2020**). Le paillis plastique est couramment utilisé lors de la plantation des cultures afin de limiter la croissance des mauvaises herbes, de conserver l'humidité du sol et de maintenir une température optimale (**Asif et al., 2020 ; Wong et al., 2020**).

Les boues d'épuration sont considérées comme un engrais organique efficace pour favoriser la croissance du blé (**Eid et al., 2019**).

3-2- sources et voies de pénétration des micro plastiques dans le sol

L'application d'engrais chimiques, l'utilisation de films agricoles, le rejet des eaux usées, la sédimentation atmosphérique et les fuites de lixiviats provenant des décharges de déchets solides s'accumulent dans l'environnement du sol par divers canaux et représentent des sources majeures de micro plastiques (**He et al., 2018**).

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

Chaque année, l'agriculture américaine consomme environ un milliard de livres de plastique pour divers usages, notamment les films agricoles, les plateaux de semences, les bandes d'égouttement, les tuyaux d'eau et d'engrais, les pesticides, les poignées d'outils, les sacs d'ensilage et la ficelle (**Grossman, 2015**).

Une grande partie du plastique utilisé en agriculture est conçue pour une utilisation saisonnière. Par exemple, les films agricoles servent à la couverture des serres, au paillage et à l'ensilage. Généralement fabriqués en polyéthylène de faible densité et destinés à un usage unique sur une seule saison, les films de paillage en plastique représentent plus de 40 % de la consommation totale de films plastiques dans le secteur agricole (**Transparency Market Research, 2013**).

De plus, le polyéthylène (PE) et le polychlorure de vinyle (PVC) sont couramment utilisés pour la fabrication des films agricoles. Le film en PE, léger, offre une bonne transmission de la lumière, tandis que le film en PVC conserve mieux la chaleur mais présente une transmission lumineuse plus faible (**Singh et al., 2017**).

Les films de paillage en plastique présentent de nombreux avantages pour les agriculteurs, notamment la suppression des mauvaises herbes, la réduction de l'évaporation de l'eau, le maintien de la température, la limitation des dégâts causés par les insectes, la diminution du temps de récolte, l'amélioration de la qualité des cultures et l'augmentation des rendements (**Lamont, 1993, 2005 ; Kasirajan et Ngouajio, 2012**).

Introduits dans les années 1950, les films de paillage en plastique à base de polyéthylène (PE) sont largement utilisés en raison de leur disponibilité, de leur faible coût et de leur grande durabilité. Toutefois, après usage, ils doivent être retirés et éliminés. Les principales options d'élimination incluent le recyclage, l'incinération, le brûlage sur site et la mise en décharge (**Moore et Wszelaki, 2016**).

Cependant, le recyclage de ces films est difficile, car ils sont souvent souillés par de la terre, des débris et des résidus de produits agrochimiques, ce qui entraîne leur rejet par de nombreuses installations de recyclage (**Kasirajan et Ngouajio, 2012**).

De plus, leur incinération est compliquée par la présence de résidus agrochimiques, leur faible volume, leur répartition dispersée et leur utilisation saisonnière. Quant au brûlage à la ferme, il peut libérer des substances cancérigènes et est interdit dans plusieurs États américains (**Moore et Wszelaki, 2016**).

Le transport des plastiques vers une décharge représente un coût élevé pour de nombreux agriculteurs. Faute d'alternatives, certains choisissent d'enterrer ces déchets ou de les rejeter dans les cours d'eau. Ces méthodes d'élimination ont toutefois de graves conséquences environnementales (**Kasirajan et Ngouajio, 2012 ; Steinmetz et al., 2016**).

D'après les statistiques, la production mondiale de films de paillage a dépassé 3 millions de tonnes en 2021, la Chine étant l'un des principaux producteurs et consommateurs (**He et al., 2018**). La "révolution blanche" en Chine, nommée ainsi en raison de l'aspect blanc des films de paillage, a été lancée en 2009. Ce terme fait référence à l'utilisation généralisée du paillis plastique en polyéthylène (PE) sur la plupart des terres agricoles (**Hg, 2017**).

Aujourd'hui, le paillis plastique recouvre 12 % des terres agricoles en Chine, soit environ 49 millions d'acres, une superficie équivalente à la moitié de celle de la Californie (**Hg, 2017 ; Bloomberg News, 2017**).

En 2017, la Chine a utilisé 1,437 million de tonnes de films de paillage, couvrant une superficie de 18,5 millions d'hectares. Toutefois, le taux de récupération de ces films est resté inférieur à 60 % (**He et al., 2018**).

L'utilisation du plastique a permis d'augmenter les rendements de 20 à 60 %, tout en renforçant la sécurité alimentaire et en améliorant les revenus des agriculteurs (**Liu et al., 2014**).

Cependant, la collecte et l'élimination du plastique utilisé restent particulièrement complexes. Les films ultra-fins (< 0,008 mm) se fragmentent facilement en petits morceaux, laissant une grande quantité de plastique sur ou dans le sol. L'accumulation progressive de ces résidus au fil des années d'utilisation du paillis plastique a conduit à ce que l'on appelle la "pollution blanche" (**Liu et al., 2014 ; Hg, 2017 ; Bloomberg News, 2017**). Les résidus de films agricoles représentent une source majeure d'accumulation de micro plastiques dans le sol. Sous l'effet de la lumière et de l'activité microbienne, ils peuvent se fragmenter en particules encore plus petites, allant jusqu'aux nano plastiques (**He et al., 2018**). Dans les serres maraîchères de la banlieue de Shanghai, les sols de surface ayant été recouverts de films de paillage pendant plus de dix ans présentent la plus forte concentration en micro plastiques (**Hodson et al., 2017**).

Avec la large diffusion et l'adoption croissante de la technique de culture sous paillage plastique ces dernières années, l'utilisation des films agricoles à l'échelle mondiale devrait continuer à augmenter à un rythme soutenu (**Brodhagen et al., 2017**).

Le faible taux de récupération et de recyclage des films agricoles entraîne une accumulation importante de déchets sur une longue période. Ces résidus deviennent une source majeure de micro plastiques dans les sols agricoles, en raison de leur dégradation difficile et de leur persistance dans l'environnement. De plus, ils contribuent à la pollution plastique des milieux marins, ajoutant ainsi aux sources de micro plastiques dans la région (**Naeini et Cook, 2000 ; Slater et Frederickson, 2001 ; Cherif et al., 2009**).

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

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

La plupart des technologies actuelles de traitement et de compostage des boues ne permettent pas d'éliminer efficacement les micro plastiques (**Zubris et Richards, 2005**). Par conséquent, les boues agricoles et les produits de compostage constituent une source majeure de micro plastiques dans les sols agricoles.

La Chine est l'un des plus grands producteurs et utilisateurs de produits de compostage, avec une production annuelle dépassant 25 millions de tonnes et un taux d'application avoisinant 20 millions de tonnes (**Franckx, 2010**). À l'échelle mondiale, la réglementation sur la qualité et le taux d'application des produits de compostage varie selon les pays, avec des doses généralement comprises entre 30 et 35 tonnes par hectare et par an (**Hopkins et al., 2017**).

Des études ont révélé la présence de plastique dans le bétail et le fumier de volaille. Bien que des méthodes de tri avant et après le compostage permettent d'en éliminer une partie, des micro plastiques subsistent dans le produit final, avec des concentrations variant de 2,38 à 180 mg/kg (**Bläsing et Amelung, 2018**).

Une étude menée sur des terres agricoles a révélé que la concentration moyenne de plastiques dans les produits compostés atteignait 1,2 g/kg, avec certaines zones affichant des niveaux encore plus élevés de micro plastiques (**Gao et al., 2019**). Ainsi, l'utilisation massive de produits compostés a conduit à leur accumulation dans les sols, faisant de ces matériaux une source majeure de pollution par les micro plastiques.

- **Boues d'épuration :**

La concentration de micro plastiques dans les eaux usées entrant dans les installations de traitement du Clyde River était de $15,7 \pm 5,23$ particules par litre. Après traitement, cette concentration a été réduite à $0,25 \pm 0,04$ particules par litre dans les effluents, ce qui correspond à un taux d'élimination supérieur à 98 %. Toutefois, les micro plastiques extraits n'ont subi aucune dégradation significative et se sont accumulés dans les boues (**Murphy et al., 2016 ; Mintenig et al., 2017**).

Riches en azote, phosphore et autres nutriments, les boues peuvent améliorer la structure du sol et renforcer sa fertilité. Elles sont ainsi utilisées comme matière première pour le compostage et appliquées aux sols agricoles. En Chine, la production annuelle de boues est estimée entre 30 et 40 millions de tonnes. Leur utilisation ne cesse d'augmenter, et chaque année, environ 4 à 5 millions de tonnes (poids sec) sont destinées au compostage des terres cultivées dans l'Union européenne. Cependant, cette pratique entraîne également l'introduction d'environ 400 000 tonnes de micro plastiques dans les sols (**Zubris et Richards, 2005 ; Nizzetto et al., 2016 ; Willén et al., 2017**).

Concernant l'application des boues, la quantité de micro plastiques présentes dans celles-ci a atteint 63 000 tonnes en Europe et 430 000 tonnes en Amérique du Nord (**Hall, 1995**).

Ainsi, l'épandage des boues en tant qu'engrais contribue à l'accumulation de micro plastiques dans les sols. De plus, des recherches ont montré que ces boues contiennent diverses substances toxiques et potentiellement dangereuses, notamment des métaux lourds, des composés organiques persistants, des antibiotiques, des bactéries pathogènes et des œufs de parasites (**Rillig et al., 2017**).

En effet, lorsque ces substances coexistent avec les micro plastiques, elles ont tendance à s'y adsorber en surface, aggravant ainsi la pollution des sols (**Rillig et al., 2017a**).

D'après les travaux de **Lei et al. (2017)**, de nombreux nettoyeurs pour le visage et gels douche disponibles sur le marché contiennent des micro plastiques, dont le polyéthylène est le principal composant. En Chine, des estimations préliminaires indiquent que les produits de soins personnels pourraient libérer environ 39 tonnes de micro plastiques dans l'environnement naturel.

D'après **Majewsky et al. (2016)**, la concentration de polyéthylène et de polypropylène dans les eaux usées varie entre 80 et 260 mg par mètre cube.

- **Les eaux douces :**

De nombreuses recherches portent sur la présence des micro plastiques dans l'environnement aquatique. Actuellement, les eaux de surface, qui constituent une source courante d'eau pour l'irrigation agricole, sont devenues un vecteur majeur de contamination des sols par les micro plastiques (**Majewsky et al., 2016**).

De plus, leur concentration dans les eaux de surface peut varier de manière significative. D'après les études de **Dris et al. (2015)** et **Eerkes-Medrano et al. (2015)**, la quantité de micro plastiques présents dans les lacs et les rivières fluctue largement, avec des variations allant de 10^3 à 10^9 fois.

Su et al. (2016) ont réalisé une étude révélant que la majorité des micro plastiques présents dans le lac Taihu sont de nature fibreuse, avec une concentration estimée entre 1×10^4 et $6,8 \times 10^6$ particules par kilomètre carré.

Mintenig et al. (2019) ont employé la spectroscopie infrarouge par imagerie pour analyser la présence de particules plastiques dans les eaux souterraines et l'eau potable ($> 20 \mu\text{m}$). Leur étude a révélé que la concentration de micro plastiques dans les eaux souterraines variait entre 0 et 7 particules par mètre cube, avec une moyenne de 0,7 particule/m³. Les principaux polymères identifiés étaient le polyéthylène, le polyamide, le polyéthylène téréphtalate et le chlorure de polyvinyle, avec des tailles de particules comprises entre 50 et 150 μm .

- **L'usure des pneus :**

Kim et al. (2004, 2006) ont mis en évidence que les particules de caoutchouc issues de l'usure des pneus sur les routes peuvent s'infiltrer dans l'environnement des sols en bordure de route par le biais du dépôt atmosphérique ou du ruissellement de surface. Leurs recherches estiment que les émissions annuelles de poussières de pneus s'élèvent à environ 10 000 tonnes en Suède et 11 000 tonnes en Allemagne. Par ailleurs, les estimations des déchets plastiques basées sur la quantité globale de déchets plastiques diffèrent des résultats obtenus expérimentalement.

- **Dépôt atmosphérique :**

Comme le montre la **figure 1**, la déposition atmosphérique constitue un autre mécanisme par lequel les micro plastiques s'introduisent dans les sols. **Dris et al. (2016)** ont mené une étude sur l'atmosphère aux abords de Paris et ont constaté qu'environ 29 280 particules de micro plastiques par mètre carré étaient déposées quotidiennement dans l'environnement.

Parallèlement, certains chercheurs ont analysé la composition des micro plastiques fibreux présents dans ces dépôts atmosphériques. Leurs résultats indiquent que 50 % des fibres sont naturelles, 21 % sont des fibres transformées, 20 % sont synthétiques, 17 % correspondent à des fibres plastiques artificielles et 12 % sont des fibres mixtes artificielles (**Dris et al., 2016**).

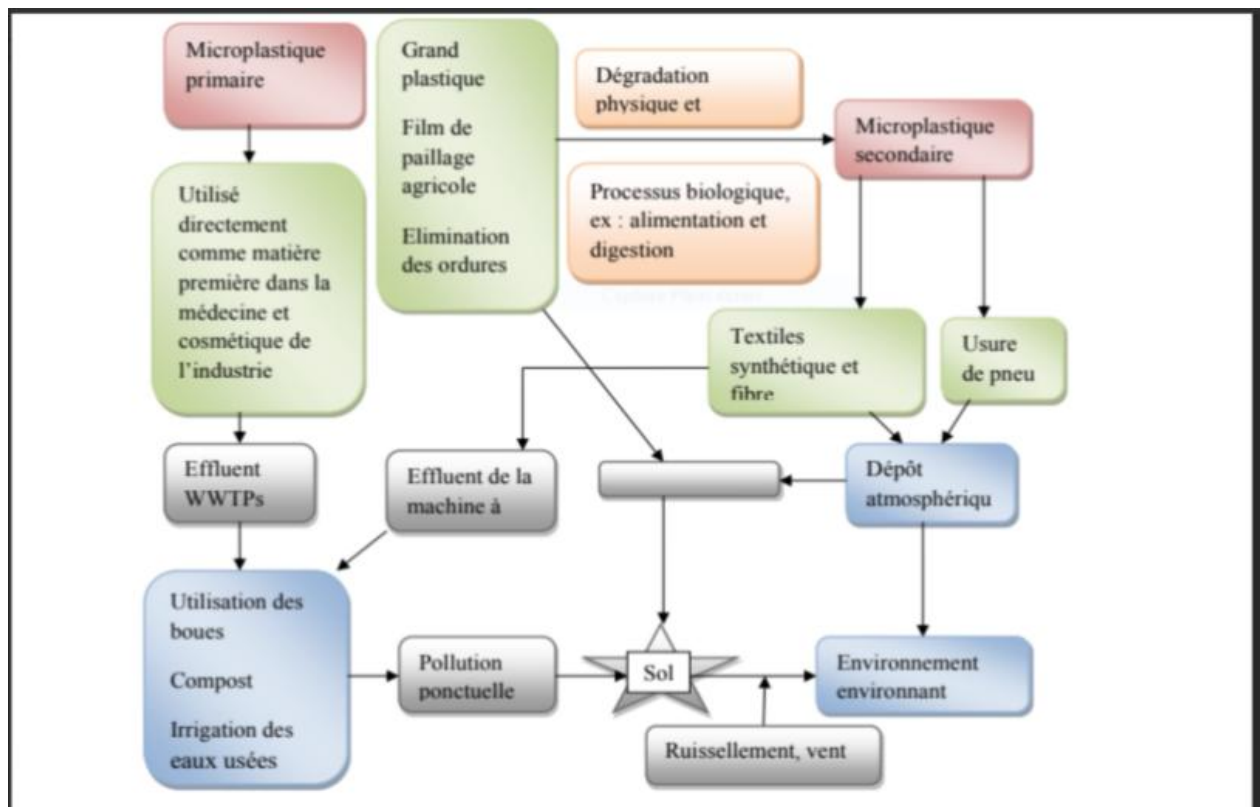


Figure 1 : Diagramme schématisé des sources de micro plastique dans l'écosystème des sols (Yu et al., 2022).

3-3- les effets des micro-plastiques sur le sol

3-3-1- Effet des micro-plastiques sur les propriétés physiques et chimiques du sol

Les micro plastiques influencent directement les propriétés physiques et chimiques du sol, ainsi que le cycle des matériaux (**Fig. 2**).

Liu et al. (2017) ainsi que **Li et al. (2020)** ont observé qu'après 30 jours d'incubation, des concentrations élevées de micro plastiques entraînent des effets significatifs sur certains éléments du sol, tels que le carbone organique dissous (DOC), l'azote organique (DON) et le phosphore organique (DOP).

Zhang et al. (2021) ont mis en évidence que la présence de micro plastiques dans les sols altère les propriétés physiques du sol, notamment en influençant la densité apparente, en modifiant la porosité et donc la capacité de rétention d'eau, ainsi qu'en perturbant la structure du sol en favorisant l'évaporation de l'humidité.

À ce jour, les études portant sur l'interaction entre les micro plastiques et les agrégats du sol demeurent limitées. La recherche sur la pollution liée aux micro plastiques en est encore à un stade préliminaire, ce qui ne permet pas, pour l'instant, de tirer des conclusions claires quant à leurs effets sur le mouvement et la rétention de l'eau dans le sol (**De Souza et al., 2019**).

3-3-2- les effets des micro plastiques sur les microorganismes du sol

Les micro-organismes du sol occupent une place essentielle dans le fonctionnement de l'écosystème pédologique. D'après plusieurs études, une activité microbienne accrue contribue à la libération d'éléments nutritifs tels que le carbone (C), l'azote (N) et le phosphore (P), facilitant ainsi les échanges de nutriments entre le sol et les plantes (**Burns et al., 2013 ; Huerta Lwanga et al., 2018**).

De nombreuses recherches ont démontré que les propriétés physico-chimiques du sol, ainsi que la disponibilité des nutriments, sont étroitement liées à l'activité de la microflore du sol (**Girvan et al., 2003 ; Arthur et al., 2012 ; Naveed et al., 2016 ; Rillig et al., 2017a**).

Toute modification, notamment au niveau de l'agrégation du sol — comme l'incorporation de microfibrilles linéaires — peut entraîner des variations dans la diversité microbienne par rapport à un sol exempt de microfibrilles (**Rillig et al., 2017a ; De Souza et al., 2018**).

La présence de micro plastiques, associée à d'autres substances toxiques, peut perturber la microflore du sol en altérant la composition des communautés microbiennes et en réduisant la biodiversité, compromettant ainsi la santé globale de l'écosystème pédologique (**Rillig et al., 2017a**).

Par ailleurs, les changements de porosité induits par les micro plastiques peuvent affecter la circulation de l'oxygène dans le sol, influençant directement la répartition et l'abondance des micro-organismes aérobies et anaérobies tout au long du profil pédologique (**Rillig et al., 2017a**).

L'activité enzymatique du sol reflète à la fois l'intensité de l'activité microbienne et la disponibilité des substrats nécessaires à l'absorption et à l'utilisation des nutriments par les micro-organismes. Ainsi, toute modification de cette activité enzymatique peut révéler d'éventuels effets néfastes des micro plastiques sur la microflore du sol (**De Souza et al., 2018 ; Rillig, 2018**).

3-3-3- Effets des micro plastiques sur la faune du sol

Les micro plastiques influencent principalement la faune du sol par l'intermédiaire des voies alimentaires (**Figure 2**). Toutefois, la complexité des systèmes biologiques, la diversité des fonctions, les variations de taille, d'habitats et de modes de vie des organismes rendent les études dans ce domaine particulièrement complexes (**Rodriguez et al., 2017 ; Rillig & Bonkowski, 2018**).

Parmi les organismes du sol, les vers de terre sont les plus étudiés à ce jour. Ils jouent un rôle clé dans le transport des micro plastiques, en les déplaçant des couches superficielles vers des zones plus profondes du sol, contribuant ainsi à leur dispersion (**Rodriguez et al., 2017 ; Rillig & Bonkowski, 2018**).

Dans leurs travaux, **Cao et al. (2017)** ont indiqué que les micro plastiques entravent de manière significative la croissance des vers de terre.

3-3-4- Effets des micro plastiques sur les plantes

Dans les écosystèmes agricoles, les micro plastiques peuvent perturber non seulement la bio masse et l'activité microbiennes du sol, ainsi que la diversité fonctionnelle, mais également nuire à la santé des plantes, en altérant le cycle des nutriments entre le sol et la végétation (**Horton et al., 2017 ; De Souza et al., 2018**) (**Fig. 2**). Cela peut indirectement influencer la germination des graines ainsi que la croissance des plantes. De plus, les micro plastiques présents dans le sol sur une longue période peuvent se dégrader et donner naissance à des nano plastiques (**Ng et al., 2018**).

Ces nano plastiques peuvent migrer à l'intérieur des plantes et s'y accumuler, avant d'être consommés par d'autres organismes à travers la chaîne alimentaire, atteignant ainsi l'être humain de manière directe ou indirecte (**Rico et al., 2011**).

D'après **Asli et Neumann (2009)** ainsi que **Ng et al. (2018)**, l'accumulation de micro plastiques dans les plantes peut perturber l'absorption et le transport des nutriments, ainsi que d'autres substances solubles essentielles, en obstruant les pores des parois cellulaires ou les connexions entre cellules.

Judy et al. (2019) ont observé que les micro plastiques n’avaient pas d’effet significatif sur la germination ni sur la biomasse du blé. Toutefois, des études complémentaires sont nécessaires afin de mieux comprendre l’impact réel des micro plastiques sur les plantes, compte tenu des lacunes actuelles dans les connaissances.

Wang et al. (2020a) ont mis en évidence que le cadmium, un métal lourd, peut coexister dans les sols avec des micro plastiques tels que le polyéthylène et le polylactique, entraînant des interactions au niveau des racines qui perturbent la symbiose racinaire et freinent la croissance des plantes.

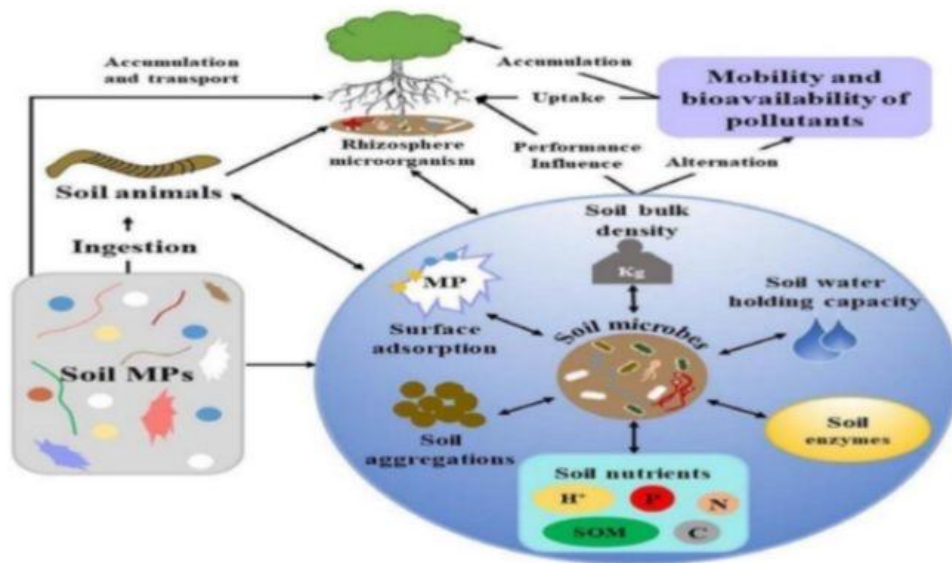


Figure 2 : Diagramme schématisant l'effet des micro plastiques sur les paramètres du sol, les organismes du sol, les plantes et les microorganismes, et l'adsorption d'ions (Yu et al., 2022).

3-3-5- Les effets sur la santé humaine

Les micro plastiques sont souvent perçus comme des substances peu réactives sur le plan chimique, inertes, de très petite taille et facilement assimilables par les organismes vivants, y compris les humains (**Dąbrowska, 2021 ; Othman et al., 2021**). Des traces de micro plastiques ont récemment été détectées dans les excréments humains (**Wang et al., 2019b**).

Selon **Katyal et al. (2020)**, certains chercheurs suggèrent que les micro plastiques pourraient pénétrer les cellules animales en étant captés par des macrophages ou par les cellules endothéliales des vaisseaux sanguins.

Les humains peuvent ingérer des micro plastiques directement à partir du sol ou des eaux souterraines, que ce soit en buvant de l'eau ou en consommant des animaux et des plantes qui les ont absorbés, ces particules étant ensuite transmises à l'homme par le biais de la chaîne alimentaire (**Ribeiro et al., 2019 ; Padervand et al., 2020 ; Zhang et al., 2020c**).

Selon **Sana et al. (2020)**, les micro plastiques peuvent également traverser la peau humaine, ce qui peut entraîner des infections cutanées.

Ils sont susceptibles d'entraîner des effets toxiques, d'induire un stress oxydatif, de provoquer une inflammation chronique de l'organisme et d'endommager les tissus (**Naqash et al., 2020 ; Shen et al., 2020b**).

4-La pollution du plastique en Algérie

La production de déchets solides en Algérie a connu une hausse significative ces dernières années. Les déchets plastiques proviennent principalement de l'urbanisation, du tourisme balnéaire et des activités récréatives (**Derraik 2002 ; Graca et al., 2017**).

En Algérie, l'insuffisance de la gestion des déchets solides et l'absence de recyclage ont entraîné une multiplication des déchets plastiques, tant dans les zones urbaines que sur les côtes. Ces déchets plastiques se composent principalement de sacs de courses, d'emballages alimentaires et de boissons, ainsi que de débris issus de la dégradation des produits en plastique (**Nel et al., 2016**).

La population urbaine en Algérie a généré un problème majeur lié aux déchets ménagers. D'après les agences gouvernementales locales et les secteurs concernés, ces derniers rencontrent des difficultés pour gérer l'augmentation continue et croissante des déchets urbains (**Brahim, 2012 ; Cheniti et al., 2013**).

La gestion des déchets solides en Algérie est confrontée à des défis organisationnels et structurels, ainsi qu'à des comportements inappropriés de la part des usagers. Un projet de tri sélectif et de réutilisation des déchets, lancé par l'Agence nationale des déchets (AND), avait pour objectif de diminuer la pression sur les centres d'enfouissement technique saturés. Cependant, ce projet n'a pas abouti (**Cheniti, 2014 ; AND, 2015**).

Ainsi, chaque année, 16 millions de tonnes de déchets sont produites (**Photo. 02**) dont seulement 5 % des déchets plastiques sont recyclés. Le gouvernement algérien a signé le système ECO JEM (système public de traitement et de valorisation des déchets d'emballages) pour encourager le recyclage, mais la situation reste inchangée (**Wamda, 2017 ; Djemaci, 2018**).

En Algérie, les déchets plastiques constituent 17 % du total des déchets ménagers (AND, 2018).



Photo 02 : Les déchets de plastique sur une plage de Béjaia (Brahim 2012).

PARTIE 3 : LA DEGRADATION DU PLASTIQUE

1-Définition de dégradation du plastique

La dégradation des polymères correspond à un processus altérant la résistance et la couleur des matériaux polymères de manière contrôlée. Elle débute par la rupture des chaînes moléculaires, marquant le début de la dégradation primaire, également appelée vieillissement. Ce processus est influencé par divers facteurs externes tels que la température et les agents chimiques, qui en déterminent la vitesse. Le terme "vieillissement" désigne ainsi les modifications des propriétés polluantes des polymères (**Kumar et al., 2011 ; Bhardwaj et al., 2012a**).

2-Mécanismes de dégradation du plastique

La dégradation des polymères synthétiques peut être divisée en deux grandes catégories : biotique et abiotique, chacune suivant des mécanismes distincts influencés par divers facteurs physiques, chimiques ou biologiques.

2-1- Dégradation abiotique des plastiques

La dégradation abiotique des plastiques désigne les altérations de leurs propriétés chimiques provoquées par des facteurs non biologiques tels que la lumière, la température, l'air, l'eau ou encore les forces mécaniques (**Andrady, 2015**).

De manière générale, cette phase abiotique précède la biodégradation, en raison de la faible biodisponibilité initiale des plastiques (**Andrady, 2015**).

2-1-1- Photodégradation des plastiques

Dans l'environnement, la dégradation des polymères synthétiques commence fréquemment au niveau moléculaire par un processus de photo oxydation déclenché par le rayonnement ultraviolet (**Andrady, 2011**).

La photodégradation des plastiques présents dans les milieux aquatiques se déroule à un rythme plus lent comparé à celle observée lors d'une exposition en milieu terrestre (**Andrady et al., 1993**).

La photo dégradation des plastiques consiste généralement en des réactions induites par les radicaux libres, déclenchées par l'exposition au rayonnement solaire. Les rayonnements ultraviolets (UV) impliqués sont principalement des UV-B à haute énergie (290 à 315 nm) et des UV-A à énergie modérée (315 à 400 nm) (**Liu et al., 2019**).

2-1-2- Dégradation thermique

La dégradation thermique désigne la dégradation du plastique causé par des températures élevées. Sous l'effet de la chaleur, les plastiques subissent des réactions d'oxydation thermique à haute température. Lorsque le polymère absorbe suffisamment de chaleur pour dépasser la barrière énergétique, les longues chaînes polymères peuvent se décomposer, générant ainsi des radicaux libres (**Pirsaheb et al., 2020 ; Peterson et al., 2001**).

La température nécessaire à la dégradation thermique dépend des propriétés thermiques du plastique ainsi que de la disponibilité de l'oxygène (**Crawford et Quinn, 2017**).

Par ailleurs, la température et le rayonnement ultraviolet peuvent exercer un effet synergique sur la dégradation des plastiques, et la vitesse des réactions d'oxydation augmente avec la hausse de la température (**Andrady et al., 2003 ; Kamweru et al., 2011**).

En outre, l'augmentation de l'humidité diminue l'énergie d'activation nécessaire à la dégradation thermique des plastiques (**Kotoyori, 1972**).

2-1-3- Dégradation chimique des plastiques

La dégradation chimique des additifs modifie les propriétés du polymère, ce qui entraîne sa fragilisation (**Duwez et Nysten, 2001**).

2-1-4- Dégradation mécanique des plastiques

La dégradation mécanique constitue un facteur clé pour les plastiques présents dans les milieux aquatiques, et désigne leur dégradation due à l'application d'une force extérieure (**Zhang et al., 2021**).

Dans l'environnement, cette force externe peut résulter de la collision et de l'abrasion entre les plastiques et les roches, provoquées par le vent et les vagues (**Zhang et al., 2021**).

Le cycle de gel et de dégel des plastiques dans les milieux aquatiques peut également provoquer une dégradation mécanique des polymères (**Pal et al., 2018**).

Ce processus génère généralement des particules de plastique de plus petite taille, classées comme micro plastiques. Cependant, la dégradation mécanique se poursuit même lorsque les particules atteignent la taille des micro plastiques (**Zhang et al., 2021**).

En conséquence, ce processus peut conduire à la formation de particules encore plus petites, appelées nano plastiques (**Lambert et Wagner, 2016**).

Dans les deux cas, la dégradation mécanique entraîne une réduction de la taille des particules, ce qui entraîne également une augmentation de la surface des particules de polymère (**Zhang et al., 2021**).

2-2- Biodégradation ou dégradation biotique des plastiques

La biodégradation est un processus par lequel des organismes vivants dégradent les substances organiques ou certains matériaux synthétiques.

Elle peut se produire de l'une des manières suivantes (**Gu et al., 2000**) :

- **Aérobie** : Ce type de biodégradation se produit dans la nature, où il génère du dioxyde de carbone et de l'eau en présence d'oxygène.
- **Anaérobie** : Ce processus se déroule dans des décharges ou des sédiments, produisant du dioxyde de carbone, de l'eau et du méthane en l'absence d'oxygène.
- **Semi-aérobie** : Cette forme de biodégradation a lieu dans des composts, parfois avec ou sans oxygène.

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

La dégradation biologique des plastiques est principalement attribuée aux micro-organismes, tels que les bactéries et les champignons, ainsi qu'aux insectes (**Crawford et Quinn, 2017**).

En raison de leur taille, les polymères synthétiques sont généralement trop volumineux pour traverser les membranes des micro-organismes. La première étape de la biodégradation consiste en la rupture des chaînes latérales ou des squelettes polymères, entraînant la formation d'unités plus petites, telles que des monomères ou des oligomères, par l'action d'enzymes extracellulaires (**Gu, 2005**).

Dans la plupart des cas, la première étape de la dépolymérisation consiste en l'hydrolyse enzymatique des liaisons amides, esters ou uréthanes. Les molécules résultantes, plus petites, peuvent ensuite être absorbées et métabolisées par des micro-organismes. Il convient de noter que l'hydrolyse abiotique peut également générer des intermédiaires, qui seront ensuite métabolisés par des micro-organismes (**Müller et al., 2001**).

En raison de leur nature solide, les plastiques conventionnels présentent généralement une biodisponibilité extrêmement faible, car seule une fraction minime du polymère est exposée aux agents de dégradation potentiels (**Battin et al., 2016**).

De plus, les polymères macromoléculaires ne peuvent pas être directement exploités par les micro-organismes. Il est donc nécessaire que des enzymes extracellulaires interviennent d'abord pour décomposer ces polymères en petites unités moléculaires, permettant ainsi leur absorption par les cellules et leur métabolisation ultérieure (**Chen et al., 2019**).

La dégradation abiotique des plastiques, qui entraîne la formation de produits de dégradation de faible poids moléculaire ainsi que la création de fractures et de pores à la surface des polymères, peut accélérer les processus de biodégradation (**Wu et al., 2019**).

La biodégradation, notamment la minéralisation microbienne, est une méthode de gestion des déchets compatible par rapport à d'autres techniques (**Schink et al., 1992**).

La bio remédiation constitue la méthode la plus écologique pour gérer les déchets. Les sites pollués ne cessent d'augmenter en raison des stratégies de gestion des déchets, qui proviennent principalement des zones industrielles et des activités communautaires. Des organismes biologiques, tels que les procaryotes (bactéries) et les eucaryotes (champignons, algues et plantes), jouent un rôle crucial dans le processus de bio remédiation (**Shah et al., 2008**).

2-2-1- Dégradation microbienne

Elle se définit comme une activité microbienne au cours de laquelle les micro-organismes sécrètent des enzymes capables de dégrader les polymères, entraînant ainsi leur dégradation **(Kale et al., 2015)**.

Ce processus fait intervenir des bactéries et des champignons, et permet de dégrader à la fois les plastiques naturels et synthétiques. La biodégradation des polymères se déroule dans diverses conditions environnementales favorisant la dégradation microbienne des matériaux plastiques **(Moharir et Kumar, 2019)**.

2-2-2- Dégradation enzymatique

Les principaux groupes d'enzymes microbiennes impliquées dans l'élimination de la plupart des contaminants nocifs dans l'environnement incluent les hydrolases, les oxydoréductases, les déhalogénases, les oxygénases et les transférases **(Saravanan et al., 2021)**.

Les hydrolases et les oxydoréductases des micro-organismes jouent un rôle dans la dégradation de polluants hydrophobes, tels que les additifs plastiques **(Carmen, 2021)**.

Les plastiques peuvent être classés en deux catégories : hydrolysables et non hydrolysables, selon la présence ou l'absence de groupes ester ou amide, susceptibles d'être attaqués par diverses enzymes hydrolytiques extracellulaires. La dégradation de polymères non hydrolysables, tels que le PE, le PP et le PVC, par des enzymes extracellulaires peut s'avérer plus complexe **(Santo et al., 2013)**.

Il a également été démontré que plusieurs enzymes sécrétées par les champignons sont capables de réduire la longueur des chaînes polymères du PE **(Sanchez, 2019)**.

Les polymères hydrolysables, comme le PET, le PA et le polyuréthane (PUR), sont généralement plus biodégradables en raison des voies de biodégradation disponibles, telles que les enzymes hydrolytiques extracellulaires impliquées dans la dégradation de la cellulose et des protéines (**Chen et al., 2019**).

Des enzymes telles que la cutinase, la lipase, la sérine estérase et la nitro-benzyl-estérase ont également montré leur capacité à hydrolyser le PET, tandis que la protéase, la cutinase, l'amidase et l'hydrolase sont impliquées dans l'hydrolyse du PA (**Guebitz et Cavaco-Paulo, 2008**).

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

PARTIE 4 : LES CHAMPIGNONS**1-Définition**

Les champignons, également appelés *Fungi* (du latin) ou mycètes (du grec *mukês*, signifiant champignon), forment un groupe très diversifié d'organismes. Ils partagent certaines caractéristiques avec les plantes inférieures ainsi qu'avec les animaux peu évolués. Ce sont des organismes eucaryotes, c'est-à-dire dotés d'un noyau, et ils sont immobiles (**Chabasse et coll., 1999 ; Blandeau, 2012**). Les champignons constituent l'un des groupes d'organismes les plus importants de la planète et remplissent un rôle essentiel dans de nombreux écosystèmes. À ce jour, environ 100 000 espèces ont été recensées, bien que leur nombre réel soit probablement bien supérieur (**Mueller et Schmit, 2007**).

2-Classification

Les champignons sont classés en quatre grands groupes (ou *phyla*), en fonction des différentes formes de reproduction sexuée qu'ils présentent : les *Zygomycota*, les *Ascomycota*, les *Basidiomycota* et les *Chytridiomycota* (**Evert et al., 2007**).

- **Les *Zygomycota*** : se caractérisent par la production de zygosporos au sein de structures appelées *zygosporanges*. Ils ne possèdent pas de flagelles (**Yajuan et al., 2006**).
- **Les *Ascomycota*** : se distinguent par la production d'ascospores, contenues dans des structures spécialisées appelées asques.

- **Les *Basidiomycota*** : les basidiospores sont formées à la surface de structures appelées basides.
- **Les *Chytridiomycota*** : forment un groupe principalement aquatique, caractérisé par la production de cellules reproductrices mobiles, telles que les zoospores et les gamètes. Ce sont les seuls champignons à posséder des cellules flagellées (**Evert et al., 2007**).

Par ailleurs, lorsque la reproduction sexuée d'un champignon n'est pas connue, on les regroupe sous l'appellation de « champignons imparfaits ».

- **Les *Deuteromycota*** : également appelés champignons *anamorphes*, champignons imparfaits, *conidiens* ou *mitosporiques*, sont identifiés selon un système particulier, principalement fondé sur leur mode de production des spores asexuées, appelées conidies (**Caillaud et coll., 2006**).

3-La Morphologie

Les champignons peuvent être constitués soit de cellules uniques (unicellulaires), soit d'un ensemble de cellules (multicellulaires). Chez les mycètes multicellulaires, la structure de base est l'hyphe, généralement divisée par des cloisons appelées *septa*. Toutefois, certains hypes ne présentent pas de cloisons ; on les qualifie alors de coenocytiques ou siphonnées (**Fig. 3**). Bien qu'il s'agisse d'une cellule allongée, l'hyphe contient plusieurs noyaux et fonctionne comme une structure multicellulaire (**David, 2013**).

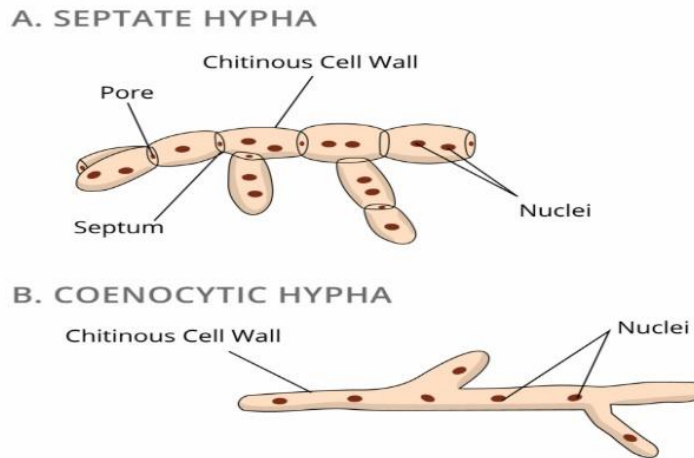


Figure 3 : Les différentes structures des hyphes fongiques (Tortora et *al.*, 2003)

4- Mode de vie

Les champignons entretiennent des relations avec d'autres organismes, qu'ils soient animaux ou végétaux. On distingue trois principaux modes de vie chez eux :

4-1-Saprophyte ou nécrotrophe

La grande majorité des champignons sont saprophytes, se nourrissant de matière organique en décomposition présente dans l'environnement, comme les feuilles mortes, les débris végétaux ou animaux, ainsi que les excréments. Des exemples incluent *Agaricus* et *Pleurotus* (Bouchet et *al.*, 2005).

4-2-Parasite ou biotrophe

Leurs nutriments proviennent de la matière organique d'un organisme vivant, qu'il soit végétal, animal ou même un autre champignon. Certains champignons sont responsables de diverses maladies, telles que les mycoses chez les animaux ou les humains, ainsi que les maladies cryptogamiques chez les végétaux (Dighton, 2003).

4-3-Symbiotique

De nombreuses espèces de champignons vivent en symbiose ou en mutualisme avec d'autres êtres vivants, en fournissant leurs nutriments grâce à un organisme partenaire, et chacun des deux en bénéficie. On distingue notamment les lichens, qui résultent de l'association des champignons avec les algues, et les mycorhizes, où les champignons s'associent avec des plantes (**Bouchet et al., 2005**).

5-Nutrition des champignons

La nutrition des mycètes varie, mais elle peut être divisée en deux composantes principales : le carbone (source d'énergie) et les minéraux. Le métabolisme du carbone chez les champignons n'est pas très différent de celui des animaux et inclut l'oxydation d'hexoses, comme le glucose. Ce processus se déroule généralement de manière aérobie, par la respiration, mais il peut également se produire de façon anaérobie, par fermentation (**Malloch, 2013**).

La nutrition minérale des mycètes est similaire à celle des plantes, car ils peuvent assimiler tous les minéraux nécessaires (azote, phosphore, soufre, fer, etc.) sous forme inorganique simple. Cependant, la plupart des mycètes ont également la capacité d'assimiler des minéraux présents dans des molécules organiques (**Malloch, 2013**).

Parmi leurs caractéristiques distinctives, les mycètes se distinguent par leur aptitude à digérer des sources complexes de nutriments à l'extérieur de leurs cellules, puis à absorber les produits résultants.

Ce processus est facilité par des enzymes extracellulaires spécialisées, adaptées à la digestion d'une ou de quelques substances spécifiques. Ces enzymes sont particulièrement efficaces pour dégrader des composés tels que la cellulose, l'amidon, la pectine, le bois, les poils, la peau et bien d'autres substances. Chaque type de mycète produit un ensemble unique de ces enzymes, mais aucun n'en produit l'intégralité (**Malloch, 2013**).

Si certains mycètes sont saprophytes, un grand nombre d'entre eux sont parasites et obtiennent leurs nutriments en se nourrissant d'organismes vivants (**Malloch, 2013**).

6-Croissance des champignons

La croissance des champignons mycéliens est assurée par les hyphes, qui peuvent être constitués de cellules hétérocaryotiques (chez les *Ascomycètes* et *Basidiomycètes*) ou coenocytiques (chez les *Zygomycètes* et *Glomeromycètes*). Leur extension est limitée à l'apex. Après une division, la partie apicale nouvellement formée peut se séparer du reste du mycélium par une cloison (formant un mycélium septé) ou non (formant un mycélium siphonné). Les hyphes se ramifient en réseau, ce qui influence en partie la morphologie macroscopique du thalle. La croissance et la nutrition se déroulent simultanément ; la croissance se fait par une extension de la paroi à l'apex grâce à un apport continu de chitine. Parallèlement, des enzymes hydrolytiques sont libérées dans le milieu extérieur au niveau de l'apex (**Thomas, 2009**).

7-La reproduction chez les champignons

La reproduction des champignons peut être sexuée ou asexuée bien que certains champignons alternent entre ces deux modes de reproduction (**Nester et al., 1998**).

7-1- Reproduction asexuée

La reproduction asexuée se distingue par l'absence de fusion des gamètes. Ce mode de reproduction est commun à presque tous les champignons. Plusieurs mécanismes peuvent conduire à la reproduction asexuée chez les champignons, tels que la fission binaire, le bourgeonnement, la fragmentation ou encore la formation de spores (**Alexopoulos et al., 1996**).

7-2- Reproduction sexuée

La reproduction sexuée chez les champignons nécessite la présence de deux noyaux haploïdes capables de fusionner, ou d'un seul noyau diploïde. Les noyaux haploïdes doivent d'abord se fusionner pour former un noyau diploïde, qui subit ensuite une méiose. Ce processus de méiose est responsable de la variation génétique dans la progéniture fongique. À la suite de ces étapes, des spores sont formées, telles que les ascospores, les basidiospores et les zygosporos (**Deacon, 2005**).

**MATERIEL ET
METHODES**

PARTIE I. PRESENTATION DE LA ZONE D’ETUDE

Notre travail est réalisé par une recherche sur les champignons capables de dégrader le plastique connu pour sa toxicité sur l’environnement ainsi que sur la santé humaine.

Pour cela, nous avons choisis au hasard deux sites de différentes cultures à Ouled Mimoun (**Figure 4**) situé au nord-est de la wilaya de Tlemcen (environ 32Km).



Figure 4 : Carte de la zone d’étude d’Ouled Mimoun

<https://maps.app.goo.gl/gNikgehmU5K77Dar7>

1-Localisation des stations d’étude et site de prélèvement

La structure utilisée (champ) pour cette expérimentation est une propriété privée qui cultivent des carottes et des petits pois verts depuis plusieurs années (**Photo. 03**)

Station 1**Station 2**

Photo 03 : site d'étude en plein champ (station 1 : champ de carotte ; station 2 : champ de petits pois).

1- Prélèvement

Les échantillons du sol ont été prélevés le 04/02/2025 et correctement conservés (**Photo.04**). Nous avons prélevé trois échantillons pour chacun des champs étudiés et les prélèvements sont effectués au hasard et sur différents points (au centre, en bordure, en profondeur et en surface).



Photo 04 : les échantillons des champs étudiés

PARTIE II : ETUDE MICROBIOLOGIQUE**1-Isolement des champignons**

Les différents champignons utilisés dans ce travail sont des espèces fongiques isolés directement des sols prélevés des deux champs étudiés dans la région de Ouled Mimoun (site d'étude).

1-1- Milieux d'isolement

Pour l'isolement des champignons à partir des échantillons ; le milieu de culture PDA (Potato Dextrose Agar) a été utilisé (**Annexe 1**).



Photo 05 : préparation de PDA (A) et acidification (B)

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 200 ml (**Photo 05**), conformément à la méthode décrite par (**Abdelkhalek M. 2017**), afin de prévenir toute contamination bactérienne.

3-2- La mise en culture

Un gramme (1g) de chaque échantillon du sol a été mélangé à 9 ml (**Photo 06**) ; d'eau physiologique (**Annexe 2**), puis l'ensemble a été homogénéisé pendant 30 secondes à l'aide d'un agitateur magnétique.



Photo 06 : préparation de l'échantillon

À l'aide d'une pipette Pasteur, un volume de 1 ml de chaque suspension a été prélevé, puis réparti uniformément sur toute la surface d'une boîte de Pétri préalablement coulée, à l'aide de l'anse de platine (**Photo 07**).

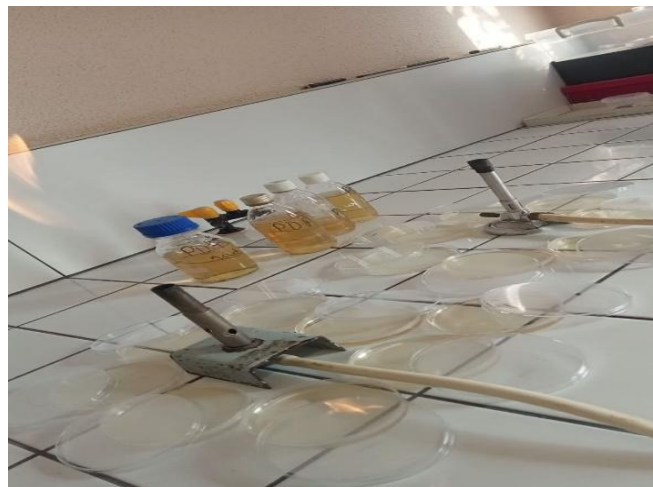


Photo 07 : boîtes de Pétri coulée

Les boîtes ensemencées ont été étiquetées avec le numéro de l'échantillon, ainsi que la date d'ensemencement.

Les boîtes ont été incubées à une température de 25°C pendant une période allant de 7 à 15 jours, conformément à la méthode décrite par (**Botton et al. 1990**).

3-3-Purification et conservation

Les colonies isolées sont purifiées par une série de repiquages successifs sur milieu PDA solidifié dans des boîtes de Pétri, puis incubées à 30 °C pendant une semaine.

Les souches pures sont ensemencées sur milieu PDA incliné en tubes, puis incubées à 30 °C pendant 7 jours. Une fois la croissance achevée, elles sont conservées à 4 °C au réfrigérateur.

La purification des échantillons du sol permet d'isoler les moisissures ainsi que leurs structures, telles que le mycélium et les spores, afin d'obtenir des souches fongiques pures. Cette étape facilite par la suite leur identification aussi bien macroscopique que microscopique.

4-Identification

L'identification des moisissures a été faite avec l'aide de **Mme Kholkhal wahiba** enseignante à l'**université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen)**.

L'identification des souches fongiques a été réalisée à partir d'observations macroscopiques et microscopiques. Elle s'est appuyée principalement sur les clés de détermination des genres, en prenant en compte les caractéristiques culturelles ainsi que la morphologie au microscope, selon les méthodes décrites par **Botton (1990)**, **Guiraud (1998)** et **Chabasse et al. (2002)**.

4-1- Identification macroscopique

Selon **Pitt (1991)**, l'analyse macroscopique repose sur l'évaluation du diamètre des colonies, de leur couleur, de leur forme, de la production de pigments diffusibles ainsi que de la vitesse de croissance. Ces observations sont réalisées à l'œil nu et à l'aide d'une loupe binoculaire.

4-2- Identification microscopique

L'identification microscopique des champignons s'effectue à l'aide d'observations réalisées au microscope optique ainsi qu'au microscope binoculaire, conformément à la méthode décrite par **Chabasse (2002)**.

Le recours à la technique du scotch (**Photo 08**) a permis de confirmer les résultats obtenus lors de l'identification macroscopique.

- **La technique de Scotch** : Il s'agit d'une méthode simple qui consiste à prélever la souche cultivée à l'aide d'un morceau de ruban adhésif transparent, puis à le fixer directement sur une lame stérile. Une goutte de bleu de méthylène peut être ajoutée pour améliorer la visibilité, et l'observation se fait ensuite directement au microscope avec l'objectif $\times 40$.



Photo 08 : technique de scotch

PARTIE III : TEST DE BIODEGRADATION DU PLASTIQUE PAR LES CHAMPIGNONS ISOLEES (LUTTE BIOLOGIQUE)

La lutte biologique prend diverses formes, mais celle qui attire l'attention des chercheurs à l'heure actuelle est surtout celle de l'utilisation de substance naturelle comme insecticides, fongicide où bactéricides afin de réduire les dégâts sur l'environnement et la santé humaine (**Barbouche et al., 2001 ; Borilky, 2005 ; Boutaleb joutei, 2010 et Mokrini et al., 2010**).

Pour cela, nous avons adoptés deux tests différents pour la réalisation de cette étude. L'utilisation de certains outils de travail est nécessaire pour effectuer ces tests (**Annexe 4**).

1- Dégradation du plastique en milieux liquide

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

Afin de prévenir la photo dégradation du plastique, les flacons ont été recouverts par du papier-aluminium.

L'incubation a ensuite été effectuée à 25°C pendant une durée de 37 jours dans une étuve.

Après la période d'incubation les échantillons ont été extraits ; nettoyés ; séchés soigneusement ; puis repesés.

2- Dégradation du plastique en milieu solide (dans le sol)

Nous avons apporté nos échantillons du sol et les avons mélangés ensemble (**Photo 09**). Ensuite nous avons stérilisé le mélange ainsi que le plastique à l'aide d'une cocotte-minute pendant 20 minutes.



Photo 09 : préparation du sol

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 (prélevé des boîtes de pétri déjà repiquées puis incubées) dans les gobelets à la surface du plastique. 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 37 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.

**RESELTATS ET
DISCUSSION**

I – RESULTATS**1- Résultats de l'étude microbiologique****1-1- Résultats d'isolement**

Les résultats de l'isolement des champignons prélevés dans le sol des échantillons situés à Ouled Mimoun sont présentés dans la **photo 10** ainsi que dans le **tableau 2**.

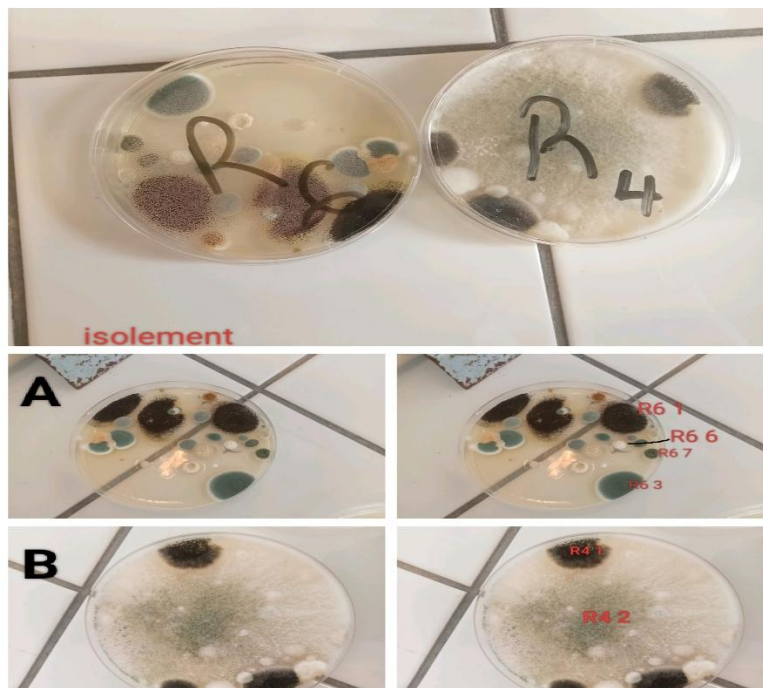


Photo 10 : résultats d'isolement des champignons A (R6) ; B (R4)

Le tableau ci-dessous présente le nombre ainsi que les couleurs des colonies des différents champignons.

Tableau 2 : résultats d'isolement des champignons

Colonies	Nombre de colonies	Couleur	Couleur de réverse
R6 1	3	noir	gris
R6 3	4	vert clair	jaune
R6 6	3	blanc	blanc
R6 7	1	vert noirâtre	jaune blanchâtre
R4 1	3	Noir	Gris
R4 2	Répondue	Vert	Gris

Les échantillons de sol montrent une biodiversité moins importante :

- Dans l'échantillon R6, il y a présence des colonies d'*Aspergillus niger* (R6 1), de *Penicillium* (R6 3), de *Paecilomyces* (R6 6) et d'*Aspergillus* (R6 7).
- L'échantillon R4 est marqué par la présence des colonies d'*Aspergillus niger* (R4 1) et de *Trichoderma* (R4 2).

1-2- Résultats de purification

Après une bonne purification, nous avons obtenus trois souches essentielles qui sont : *Penicillium*, *Trichoderma* et *Aspergillus niger* (Photo 11).



Photo 11 : les souches pures

1-3- Résultats d'identification

L'identification des moisissures a été faite avec l'aide de Mme **Kholkhal wahiba** enseignante à l'**université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen)**.

1-3-1- Identification macroscopique

L'identification macroscopique a permis de mettre en évidence la présence de cinq genres fongiques : *Penicillium* ; *Trichoderma* ; *Aspergillus niger* ; *Aspergillus* et *Paecilomyces*.

❖ *Penicillium* :

D'après (**Tabuc 2007**), les champignons du genre *Penicillium* se développent rapidement et aisément sur les milieux de culture couramment utilisés, tels que les géloses au malt ou au sabouraud. Leur croissance s'effectue à des températures modérées, comprises entre 20 et 27 °C.

Après deux jours d'incubation, de petites colonies plates apparaissent, caractérisées par des filaments aériens courts, généralement de couleur blanche.

Entre le troisième et le quatrième jour, la sporulation confère aux colonies des teintes variées, le plus souvent dans des nuances de vert (vert bleu, vert gris, vert jaunâtre, gris-bleu), mais certaines espèces peuvent également présenter des colorations jaune, orange, chamois, rose ou rouge. On peut également observer une sécrétion de pigments diffusibles dans le milieu de culture.

❖ *Trichoderma* :

Selon **Cournut (1984)**, **Landreau (2001)** et **Kubicek et al. (2003)**, les souches de *Trichoderma* isolées sur milieu PDA présentent une croissance rapide et étendue, formant des colonies réparties dans les boîtes de Pétri. Ces colonies ont initialement un aspect laineux et une couleur blanche, qui vire progressivement au vert avec le temps.

La coloration des colonies dépend de la pigmentation des phialides. Environ cinq jours après la germination, la conidie génère un mycélium stérile de forme circulaire, d'abord blanc, avant de se développer davantage.

Au bout de deux jours, une coloration verte apparaît sur les parties aériennes du mycélium, traduisant le début de la conidiogénèse. Par la suite, d'autres cercles concentriques réguliers se forment progressivement.

❖ *Aspergillus niger* :

Aspergillus niger est un champignon filamenteux appartenant à la famille des Trichocomaceae. À l'échelle macroscopique, il forme une colonie noire caractéristique, souvent avec des zones légèrement poudreuses en raison de la production de conidies. La colonie est généralement circulaire et présente une texture veloutée à granuleuse, et elle est souvent observée sur des milieux de culture tels que l'agar dextrose de pomme de terre. Sa couleur noire est due à la formation de conidies sombres, qui sont dispersées à la surface de la culture (**Samson et al. 2010**).

❖ *Aspergillus* :

Les champignons du genre *Aspergillus* se développent rapidement sur les milieux de culture standard enrichis en antibiotiques. Toutefois, la majorité des espèces sont sensibles au cycloheximide, qui inhibe leur croissance. Dès 24 à 48 heures d'incubation, on peut observer des colonies plates constituées de courts filaments aériens de couleur blanche. Ce n'est qu'après la maturation des structures conidiogènes, qui intervient entre 48 et 96 heures selon les espèces, que les colonies prennent une couleur typique. Celle-ci peut varier du brun au vert, en passant par le jaune ou le noir, en fonction de l'espèce concernée (**Botton et al., 1990**).

❖ *Paecilomyces* :

Les colonies sont à croissance rapide, de texture poudreuse à suédée, souvent en touffes, de couleur brun-jaune ou sable. Les conidiophores sont ramifiés en verticilles denses portant des phialides. Ces dernières sont cylindriques ou ellipsoïdales, avec un col long et cylindrique. Les conidies sont hyalines à jaunes, lisses, de forme ellipsoïdale à fusiforme, et mesurent (3–5) x (2–4) µm. Des chlamydo-spores brunâtres, à paroi épaisse, sont souvent présentes. (<https://www.adelaide.edu.au/mycology/fungal-descriptions-and-antifungal-susceptibility/hyphomycetes-conidial-moulds/paecilomyces>).

1-3-2- Identification microscopique

Pour l'identification microscopique des champignons, il existe plusieurs méthodes. Nous avons utilisé la méthode de scotch.

❖ *Penicillium* :

Sur le plan morphologique, les espèces appartenant au genre *Penicillium* se caractérisent par une structure en forme de pinceau. Le thalle, cloisonné, porte des conidiophores simples ou ramifiés se terminant par un pénicille. Les conidiospores peuvent être regroupés en faisceaux lâches ou organisés en corémies, c'est-à-dire en colonnes de conidiophores (**Photo 12**). Les phialides, quant à elles, produisent des spores qui se disposent en chaînes (**Gauthier, 2016**).



Photo 12 : image microscopique de la souche de *penicillium*

❖ *Trichoderma* :

Sous le microscope optique, la souche de *Trichoderma* présente un mycélium constitué d'hyphes jaunes, septés, ramifiés et à parois lisses. Les conidiophores, de forme conique ou pyramidale, sont fortement ramifiés et portent des phialides en forme de flacons ou de quilles. Ces phialides, à leur tour, renferment des spores, également appelées phialospores ou conidies (**Photo 13**).

La morphologie des espèces du genre *Trichoderma* est très similaire. Pendant plusieurs années, elles ont été considérées comme une seule souche, à savoir *Trichoderma viride* (**Bissy, 1939**).



Photo 13 : image microscopique de la souche de *Trichoderma*

❖ *Aspergillus niger* :

Au niveau microscopique, *Aspergillus niger* se distingue par ses conidies noires et ses structures conidiophores (**Photo 14**). Les conidiophores sont souvent septés et portent des conidies sphériques ou ellipsoïdes à l'extrémité. Ces conidies, également de couleur noire, sont disposées en grappes ou en chaînes, ce qui permet une identification précise du champignon. Les septa sont bien visibles dans les hyphes, qui sont également septés, et les structures reproductrices montrent une croissance typique du genre *Aspergillus* (Samson et al. 2010).

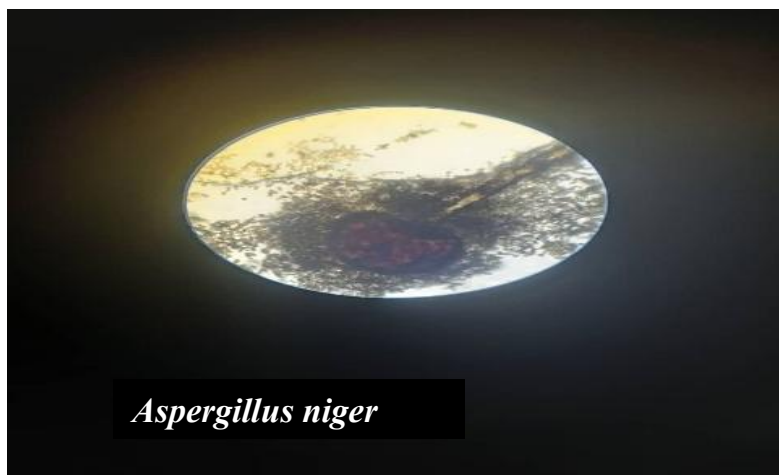


Photo 14 : image microscopique de la souche de *Aspergillus niger*

❖ *Aspergillus* :

Les champignons du genre *Aspergillus* présentent un thalle végétatif constitué de filaments mycéliens hyalins, à la fois fins, réguliers, septés et ramifiés. L'identification de ce genre repose principalement sur l'observation au microscope des têtes aspergillaires formées sur les colonies (**Photo 15**).

Sur le mycélium d'*Aspergillus*, apparaissent des filaments dressés, non cloisonnés, appelés **conidiophores**. Ces filaments se terminent par une vésicule dont la forme varie, et sur cette vésicule se fixent des cellules conidiogènes appelées **phialides**. Les **phialides** peuvent être soutenues par de petites unités appelées **métules** (qui forment une tête bisériée) ou être directement insérées sur les vésicules (formant alors une tête unisériée). (**Chabasse et al., 2002**).

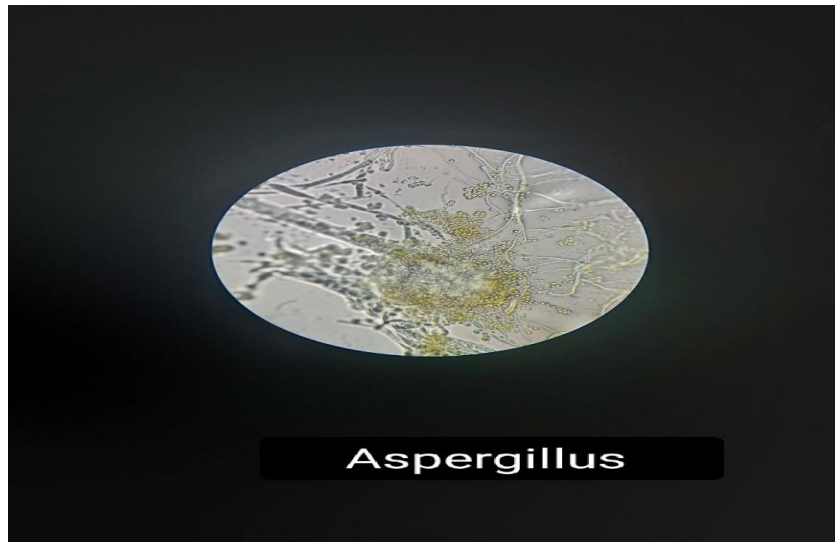


Photo 15 : image microscopique de la souche *Aspergillus*

❖ *Paecilomyces* :

La phylogénie moléculaire basée sur les séquences de l'ADN ribosomal 18S a été réalisée par **Luangsa-ard et al. (2011)**. Le séquençage de la région ITS (Internal Transcribed Spacer) est recommandé pour l'identification précise de l'espèce.

Les caractéristiques clés prises en considération est la pigmentation brun-jaune des colonies (**Photo 16**), phialides de forme cylindrique et présence de chlamydospores. (<https://www.adelaide.edu.au/mycology/fungal-descriptions-and-antifungal-susceptibility/hyphomycetes-conidial-moulds/paecilomyces>).



Photo 16 : image microscopique de la souche de *Paecilomyces*

2- Résultats du test de biodégradation du plastique (lutte biologique)

Dans la recherche de méthodes alternatives de lutte biologiques, de nombreuses études se développent actuellement pour isoler et identifier des composés qui ont une activité insecticide, antifongique, antibactérienne et/ou antioxydante (**Djennan et al., 2002 ; Bousbia, 2004 ; Bouzouita et al., 2008 ; Djennan et al., 2011b**).

2-1- sur milieu liquide

Après une période d'incubation de 37 jours ; la croissance des souches de *Trichoderma* et *Aspergillus niger* a été observée ; tandis qu'aucune croissance n'a été notée pour la souche de *Penicillium* sur le milieu Czapek par rapport au témoin (**Photo 17**).

Cela explique qu'il y a une action des souches *trichoderma* et *Aspergillus niger* sur le plastique par rapport à la souche de *Penicillium*.



Photo 17 : résultats du test de dégradation sur milieu liquide

Le **tableau 3** présente les résultats de la masse du plastique avant et après l'incubation dans le milieu liquide.

Tableau 3 : la masse de plastique avant et après l’incubation avec chaque souche sur le milieu liquide

Les souches des champignons	La masse de plastique avant l’incubation	La masse de plastique après l’incubation
<i>Trichoderma</i>	0.0075 g	0.0072 g
<i>Penicillium</i>	0.0075 g	0.0075 g
<i>Aspergillus niger</i>	0.0069 g	0.0067 g
<i>Témoin</i>	0.0074 g	0.0074 g

Nous remarquons que la masse du plastique à diminuée après l’incubation pour les souches *Trichoderma* avec une masse de 0,0072g et de la souche *Aspergillus niger* avec une masse de 0,0067g.

La masse de la souche *Penicillium* est la même avant et après l’incubation.

Nous avons calculé le pourcentage de dégradation sur le milieu liquide, les résultats sont mentionnés dans la **figure 5**. Pour chaque test nous avons utilisé un témoin pour comparer les résultats de l’effet de ces souches sur la dégradation du plastique.

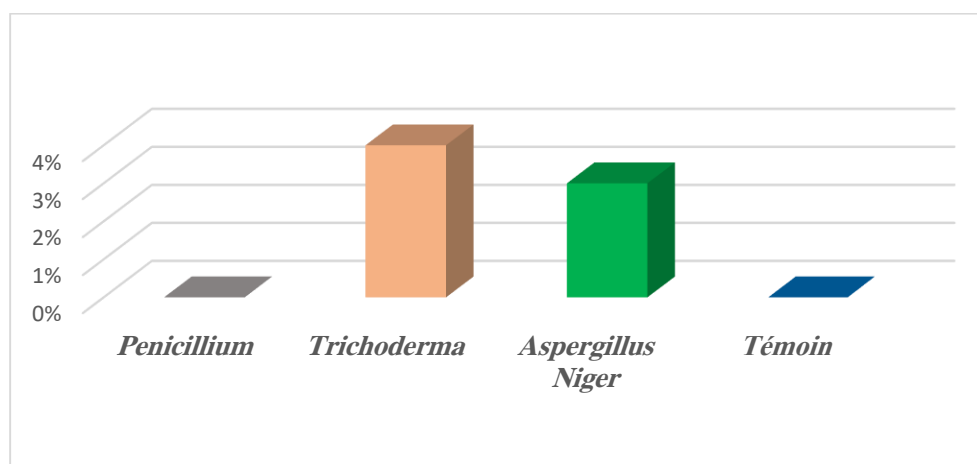


Figure 5 : Pourcentage de dégradation du plastique sur le milieu liquide

Nous remarquons dans la figure précédente que le pourcentage de dégradation du plastique de la souche *Trichoderma* est plus élevé avec une valeur de 4% par rapport à celui d'*Aspergillus niger* qui représente 3%. Cela s'explique peut-être que *Trichoderma* possède une activité meilleure de dégradation.

Par contre, *Penicillium* présente un pourcentage nul de dégradation du plastique.

2-2- sur milieu solide (sol)

Après une période d'incubation de 37 jours ; la croissance des souches de *Trichoderma* et *Aspergillus niger* a été observée ; tandis qu'aucune n'a été notée pour la souche de *penicillium* sur le sol par rapport au témoin (**Photo 18**).



Photo 18 : Résultats de test de dégradation sur le sol

Une fois la masse du plastique mesurée avant et après l'incubation, nous avons obtenu des résultats mentionnés sur le **tableau 4**.

Tableau 4 : la masse de plastique avant et après l'incubation avec chaque souche sur le sol

Les souches des champignons	La masse du plastique avant l'incubation	La masse du plastique après l'incubation
<i>Trichoderma</i>	0.0069 g	0.0067 g
<i>Penicillium</i>	0.0067 g	0.0067 g
<i>Aspergillus niger</i>	0.0068 g	0.0066 g
<i>Témoin</i>	0.0068 g	0.0068 g

La masse du plastique après l'incubation est de 0,0067g pour *Trichoderma* et de 0,0066g pour *Aspergillus niger*. Ces résultats montrent clairement que la masse a diminué après incubation pour les deux souches.

La masse de *Penicillium* est restée constante même après incubation.

Après avoir calculé les pourcentages de dégradation sur milieu solide, on a obtenu les résultats suivants (**Fig. 6**).

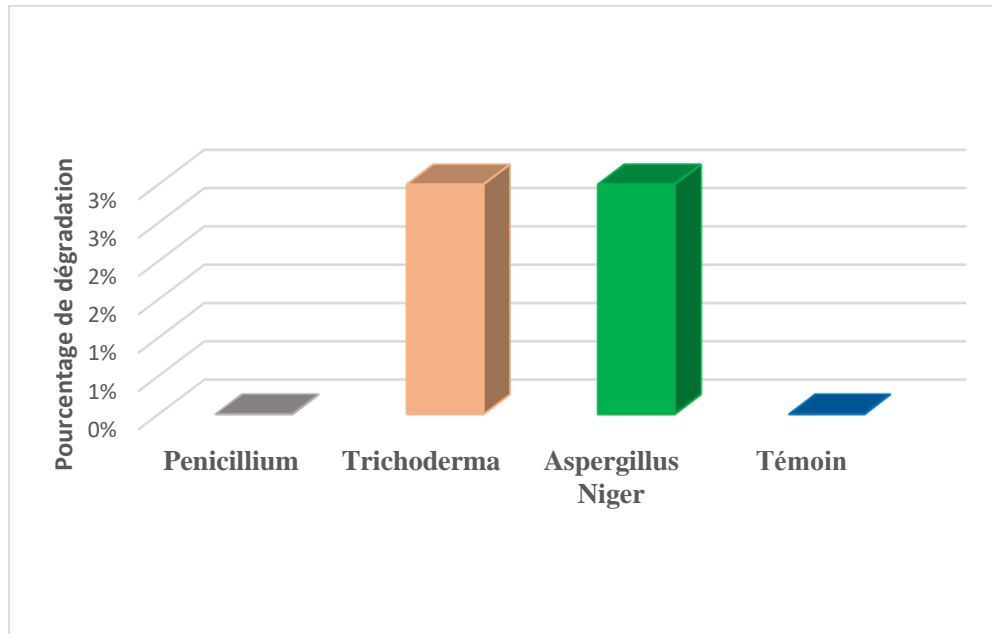


Figure 6 : Pourcentage de dégradation du plastique sur le sol

Nous remarquons que le pourcentage de dégradation du plastique est le même avec une valeur de 3% pour les deux souches *Trichoderma* et *Aspergillus niger* respectivement.

En revanche, pour *Penicillium* le pourcentage de dégradation est quasiment nul.

II - DISCUSSION

Les champignons ont su développer une grande diversité d'adaptations, ce qui leur permet de coloniser quasiment tous les milieux de la planète. Parmi les plus répandus figurent les genres *Penicillium* et *Trichoderma*, présents sous tous les climats et à toutes les latitudes (Florent, 1993 ; Tachenon, 1999).

Selon (Alvarez-Rodriguez et al. 2003) ainsi que (Boiron 1996) les genres *Penicillium* et *Trichoderma* sont des souches autochtones fréquemment isolées de la majorité des sols. Le genre *Penicillium*, en particulier, est reconnu pour sa présence constante au sein de la microflore de diverses régions du globe.

Les souches de *Penicillium* et *Trichoderma* possèdent à la fois une capacité de dégradation des plastiques et une activité antagoniste envers les champignons phytopathogènes (Zahal. N et Zouad. N., 2003).

Les résultats que nous avons obtenus montrant que les genres de *Trichoderma* et *Aspergillus niger* ont la capacité de dégrader le plastique avec un pourcentage de dégradation dans le milieu liquide pour *Trichoderma* 4% et pour *Aspergillus niger* 3% et dans le milieu solide (sol) *Trichoderma* et *Aspergillus niger* avec un pourcentage similaire de 3%. Ces résultats sont en accord avec ceux rapportés par (Bruner et al. 2018) ; (Nowak et al. 2012), (Ruan et al. 2023) et (Safdar A. et al., 2024) qui ont également observés que les genres de *Trichoderma* et *Aspergillus niger* dégrade le plastique.

D'autres travaux comme (Nowak et al. 2012) le *Trichoderma viride* a entraîné une perte de 0,02 % des films en LDPE. Et selon La souche *Trichoderma harzianum* la perte de poids des particules de polyéthylène a été de $3,39 \pm 0,3$ %.

Selon (Safdar A. et al., 2024), ses résultats montrent le taux de biodégradation le plus élevé, soit 16 % avec *Aspergillus niger* lorsqu'il était traité avec des MPs en PE.

Dans notre étude, le pourcentage de dégradation du plastique par le genre de *Penicillium* est nul (0%). Cela ne s'accorde pas avec d'autres travaux par exemple : (**Yamada-Onodera et al. 2001**) ont découvert que le champignon *Penicillium simplicissimum* a la capacité de dégrader le polyéthylène haute densité non traité, et d'après (**Bruner et al. 2018**), *Penicillium griseofulvum* a démontré une capacité à dégrader le polyuréthane (PU), mais n'a pas montré d'activité de dégradation du polyéthylène (PE). Après au moins trois semaines de croissance, des halos étaient visibles dans le test de dégradation du PU, tandis qu'aucune croissance ni halo n'a été observée autour de l'inoculum dans le test de biodégradation du PE. Selon (**Nowak et al. 2012**), *Penicillium funiculosum* et *Penicillium ochrochloron* ont provoqué respectivement une perte de poids de **0,15 %** et **0,06 %** des films en LDPE.

L'isolat PS2 du genre *Penicillium* s'est révélé être un candidat prometteur pour la dégradation du LDPE. Une réduction du poids du polymère a été constatée après une période d'incubation de 90 jours, ce qui est significatif, sachant que la biodégradation est généralement corrélée à la perte de poids du matériau. En effet, l'isolat PS2 de *Penicillium* a induit une perte de poids de **0,36 %** après 90 jours, tandis qu'aucune perte n'a été observée dans le témoin (**Anuradha de Silva et al., 2019**).

Il existe d'autres travaux qui ont trouvé différentes manières de dégradation du plastique par exemple : Par les bactéries d'après (**MARGOT HINRY., 2022**) en 2016, des chercheurs de l'université de Kyoto au Japon ont identifié une bactérie capable de décomposer les déchets plastiques. Baptisée *Ideonella sakaiensis*, elle cible spécifiquement le polyéthylène téréphtalate (PET), l'un des plastiques les plus répandus, en produisant des enzymes qui en dégradent la structure.

CONCLUSION

Conclusion

En raison de l'augmentation continue de la pollution du plastique, le besoin de solutions écologique et durables est devenu plus urgent que jamais. Ce travail de recherche a mis en évidence le potentiel remarquable de certains champignons dans la dégradation des matières plastiques, notamment des polymères synthétiques, par le biais de mécanismes enzymatiques naturels.

Ces microorganismes ont démontré leur capacité non seulement à fragmenter le plastique, mais aussi à en réduire la toxicité, ouvrant ainsi la voie à une approche innovante de lutte biologique contre la pollution plastique.

Le danger du plastique ne se limite pas à son impact environnemental, il représente également une réelle menace pour la santé humaine. De nombreuses études ont démontré que les micro-plastiques peuvent pénétrer dans le corps humain par l'eau, la nourriture ou même l'air, provoquant divers troubles et maladies, voire des pathologies chroniques à long terme.

Dans ce contexte, l'importance des champignons se révèle essentielle : grâce à leur capacité à dégrader ces composés toxiques, ils peuvent jouer un rôle central dans la réduction de ces risques.

Les résultats que nous avons obtenus confirment que plusieurs souches fongiques, notamment celles appartenant aux genres *Aspergillus niger* et *Trichoderma*, sont capables de dégrader certains types de plastiques, même dans des conditions environnementales contrôlées.

CONCLUSION

Le poids des échantillons a diminué de 3% pour *Aspergillus niger* et *Trichoderma* en milieu solide (sol), et de 4% pour *Trichoderma* et 3% pour *Aspergillus niger* en milieu liquide. Des changements dans l'apparence extérieure ainsi qu'une croissance fongique dense à la surface des échantillons a également été observés. En revanche, *Penicillium* n'a montré aucune activité de dégradation du plastique.

Cette capacité représente une alternative prometteuse aux méthodes physiques et chimiques traditionnelles, souvent coûteuses et polluantes.

Pour conclure, l'utilisation- des champignons comme moyen de bio-remédiation représente une perspective prometteuse, non seulement pour la protection de l'environnement, mais aussi pour la préservation de la santé humaine.

Pour cela, la poursuite des recherches dans ce domaine pourrait, à long terme, conduire au développement de techniques biologiques efficaces pour lutter contre la pollution du plastique et ses effets néfastes sur notre planète et notre santé ;

Il est impératif d'élargir des échantillonnages sur d'autres sites ;

De tester ces biodégradants en milieu réel (in vivo) pour évaluer leurs efficacités pratiques ;

Enfin, inciter la population a moins utiliser le plastique parce que son action va nuire directement sur l'environnement et la santé humaine.

REFERANCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- **ABDELKHALEK M. (2017)** Isolement des microorganismes (actinomycètes et moisissures) producteurs de substances antimicrobiennes à partir de la grotte Kaws – Honaine.). Mémoire de master Université aboubek belkaid - Tlemcen –
- **Abdul-Latif, M.Y.Ong, S.Nomanbhay, B. Salman, P.L.Show,** Estimation Ofcarbondioxide (CO2) reduction by utilization of algalbiomassbio plastic in Malaysia using carbonemission pinchan alysis (CEPA), Bioengineered11 (2020)154e164.
- **Agence Nationale des Déchets. (2015).** Gestion des déchets: generaliser le tri pour cr eer des activit és de recyclage. <https://and.dz/gestion-des-dechets-generaliser-le-tri-pour-creer-des-activites-de-recyclage/> (consulted in October 24, 2020).
- **Agence Nationale des Déchets. (2018).** Communiqué de presse. https://and.dz/site/wp-content/uploads/communiqu%C3%A9-saison-estivale2018_f.pdf (consulted in October 24, 2020).
- **Akutsu, H., et al. (1998).** Purification and properties of a polyester polyurethane-degrading enzyme from *Comamonas acidovorans* TB-35. *Applied and Environmental Microbiology*, 64(1), 62–67.
- **ALEXOPOULOS, C. J., MIMS, C. W., & BLACKWELL, M. (1996).** Introductory mycology (No. Ed. 4). John Wiley and Sons.
- **Alvarez – Ropdriguez m.L., Lopez-ocana L., Lopez C., Rodriguez N.E. MartinezM.J., Larriba G & Coque J-J.R. (2002).** Cork taint of wines: role of filamentousfungi isolated from rock in the function of 2, 4, 6- Trichloroanisol by O methylation of 2, 4, 6 – Trichlorophenol. *Applied and Environmental Microbiology*. 68 (12): 5860-5869.

- **Anderson JM, Shive MS (2012)** Biodegradation and biocompatibility of PLA and PLGA microspheres. *Adv Drug Deliv Rev* 64:72–82.
<https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.004>.
- **Andrady, A. L. (2011)**. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596- 1605.
- **Andrady, A.L., Hamid, H.S., Torikai, A., 2003**. Effects of climate change and UV-Bon materials. *Photochem. Photobiol. Sci.* 2 (1), 68e72.
- **Andrady AL, Pegram JE, Song Y (1993)** Studies on enhanced degradable plastics.
- **Andrady, A.L., 2015**. In: Bergmann, M., Gutow, L., Klages, M. (Eds.), *Marine Anthropogenic Litter*. Springer International Publishing, Cham, pp. 57e72.
- **Artham T, Doble M (2008)** Biodegradation of aliphatic and aromatic polycarbonates. *Macromol Biosci* 8(1):14–24. <https://doi.org/10.1002/mabi.200700106>.
- **Arthur E, Moldrup P, Holmstrup M, Schjøning P, Winding A, Mayer P ,de Jonge LW (2012)**: Soil microbial and physical properties and their relations along a steep copper gradient. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 159: 9–18.
- **Asif M, Nadeem MA, Aziz A, Safdar ME, Adnan M, Ali A, Ullah N, Akhtar N, Abbas B (2020)** Mulching improves weeds management, soil carbon and productivity of spring planted maize (*Zea mays* L.). *Int J Botany Stud* 5: 57–61. <http://www.botanyjournals.com/archives/2020/vol5/issue2/5-1-52> associated with biodegradation of plastics. *J Polym Environment*.
- **Asli S, Neumann PM 0(2009)**: Colloidal suspensions of clay or titanium

dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant, Cell and Environment*, 32: 577–584.

- **Asuquo, I. (2018).** Plastic Waste in the Aquatic Environment : Impacts and Management. *Environment*, 2(1), 1-31.
- **Battin, T.J., Besemer, K., Bengtsson, M.M., Romani, A.M., Packmann, A.I., 2016.** The ecology and biogeochemistry of stream biofilms. *Nat. Rev. Microbiol.* 14, 251.
- **Bhardwaj H, Gupta R, Tiwari A (2012a)** Microbial population associated with plastic degradation. *Sci Rep* 1(2):1–4.
- **Bissy, M. (1939).** *Contribution à l'étude du genre Trichoderma Pers.* Thèse de doctorat en pharmacie, Université de Paris, France.
- **BLANDEAU E. (2012).** État des lieux du potentiel anticancéreux de neuf champignons macroscopiques .thèse pour le diplôme d'état de docteur en pharmacie. Université Angers.
- **Bläsing M, Amelung W (2018)** Plastics in soil: analytical methods and possible sources. *Science of The Total Environment*, 612: 422–435. *block copolymers. Polymers* 43(20):5405–5415.
- **Bloomberg News(2017)** Plastic film covering 12% of China's farmland pollutes soil. September 5. <https://www.bloom berg.com/news/artic les/2017-09-05/plast ic-film-cover ing-12-of-china -s-farml and-conta minat es-soil>. Accessed 15 May 2018.
- **Boiron P. (1996).** Organisation et biologie des champignons. Édition Nathan.p:13-19-69-79.

- **Botton B, Breton A, Fevre M, Gauthier S, Guy PH, Larpent JP, Reymonad P, Sanglier JJ, Vayssier Y et Veau P (1990).** Moisissures utiles et nuisibles, importance industrielle. 2meEd. Masson. 426p.
- **Bouchet, P., Guignard, J., Villard, J., et Pouchus, Y.-F. (2005).** Les champignons : Mycologie fondamentale et appliquée (2^e éd., Vol. 191). Editions Masson, Paris.
- **Bousbia (N.), 2004-** Extraction et identification de quelques huiles essentielles (Nigelle, Coriandre, Origan, Thym, Romarin). Etude de leur activité antibactérienne. Option Science alimentaire, INA. Algérie.
- **Bouzouita, N., Kachouri, F., Ben Halima, M. K., & Chaabouni, M. M. (2008).** Composition chimique et activité antioxydante, antimicrobienne et insecticide de l'huile essentielle de *Juniperus phoenicea*. *Journal of Essential Oil Research*, 20(1), 50–58.
- **Boyandin AN, Prudnikova SV, Karpov VA, Ivonin VN, Đỗ NL, Nguyễn TH, Lê TMH, Filichev NL, Levin AL, Filipenko ML, Volova TG, Gitelson II (2013)** Microbial degradation of polyhydroxyalkanoates in tropical soils. *Int Biodeterior Biodegrad* 83:77–84. [https://doi.org/ 10.1016/j.ibiod.2013.04.014](https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.04.014).
- **Brahim, D., (2012).** La gestion des déchets municipaux en Algerie: Analyse prospective et elements d'efficacité, thèse de doctorat. Université de Rouen, France, p. 392.
- **Braun D, Bazdanea E. In: Nass LI, Heiberger CA, 1986,** editors. *Encyclopaedia of PVC*, 2nd Ed., vol. 1. New York: Marcel Dekker.
- **Brodhagen M, jR,Goldberger DG, Hayes DA, Inglis TL, Marsh and C Miles(2017)** Policy considerations for limiting unintended residual plastic in agricultural soils. *Environmental Science & Policy* 69: 81–84.

- **Brunner I, Fischer M, Ruthi J, Stierli B, Frey B (2018).** Ability of fungal isolated from plastic debris floating in the shoreline of a lake to degrade plastics .PLOS ONE 13(8):e 0202047. <https://doi.org/10.1371/Journal.pone.0202047> (Braun D, Bazdanea E. In : Nass LI, Heiberger CA, 1986, editors. Encyclopaedia of PVC, 2nd Ed., vol. 1. New York : Marcel Dek
- **Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R.L., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A. (2013):** Soil enzymes in a changing environment: current knowledge and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*,58: 216–234.
- **Cadee, G.C., 2002.** Seabirds and floating plastic debris. *Mar. Pollut. Bull.* 44 (11), 1294e1295.
- **Caillaud, D., Levrero, F., Cristescu, R., Gatti, S., Dewas, M., Douadi, M., ... Ménard, N. (2006).** *Gorilla susceptibility to the Ebola virus: The cost of sociality. Current Biology*, 16(13), R489–R491. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.06.017> .
- **Cao DD,** wang of earthworms in an agricultural soil. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 61: 012148.
- **Carmen, M. (2021).** Recherche des champignons dégradant le plastique à partir du sol.
- **Carrier M, Serani AL, Absalon C, Aymonier C, Mench M (2012)** Degradation pathways of holocellulose, lignin and a-cellulose from *Pteris vittata* fronds in sub- and super critical conditions. *Biomass Bioenergy* 43:65–71.
- **Cau, A., Avio, C.G., Dessi, C., Moccia, D., Pusceddu, A., Regoli, F., Cannas, R., Follesa, M.C., 2020.** Benthic Crustacean digestion can modulate the environmental fate of microplastics in the deep sea. *Environ. Sci. Technol.* 54 (8), 4886e4892.
- **Chabasse, D., Bouchara, J. P., & Pihet, M. (2002).** *Mycologie médicale*. Paris: Ellipses.Manuel de mycologie médicale décrivant les méthodes d'observation et d'identification des champignons pathogènes.

- **CHABASSE D., GUIGUEN C L., AUDONNEAU C N. (1999)** .Mycologiemédicale Masson Paris p22.
- **Chattopadhyay SK, Singh S, Pramanik N, Niyogi U, Khandal R, Uppaluri R, Ghoshal AK (2011)** Biodegradability studies on natural fibers reinforced polypropylene composites. *J Appl Polym Sci* 121(4):2226–2232.
<https://doi.org/10.1002/app.33828>.
- **Chen GQ, Patel MK (2011)** Plastics derived from biological sources: present and future: a technical and environmental review. *Chem Rev* 112:2082–2099.
- **Chen S, Su LQ, Billig S, Zimmermann W, Chen J, Wu J (2010)** Biochemical characterization of the cutinases from *Thermobifidafusca*. *J Mol Catal BEnzym* 63:121–127.
- **Chen, X., Xiong, X., Jiang, X., Shi, H., Wu, C., 2019.** Sinking of floating plastic debris caused by biofilm development in a freshwater lake. *Chemosphere* 222,856e864.
- **Cheniti, H., Serradji, T., Brahmia, K., Makhloufi, A., Guerraiche, S. (2013).** Physical knowledge of household waste in Algeria: generation and composition in the town of Annaba. *Waste Manag. Res.* 31 (11), 1180–1186. <https://doi.org/10.1177/0734242X13502383>.
- **Cheniti, H. (2014).** La gestion des déchets urbains solides, cas de la ville d'Annaba. In: These doctorale. Université Badji Mokhtar-Annaba, p. 136.
- **Cherif H, Ayari F, Ouzari H, Marzorati M, Brusetti L, Jedidi N, Hassen A, Daffonchio D (2009):** Effects of municipal solid waste compost, farmyard manure and chemical fertilizers on wheat growth, soil composition and soil bacterial characteristics under Tunisian arid climate. *European Journal of Soil Biology*, 45: 138–145.

- **Cournut, J. (1984).** *Contribution à l'étude des Trichoderma*. Thèse de doctorat, Université de Clermont-Ferrand, France.
 - **Crawford, C.B., Quinn, B., 2017.** In: Crawford, C.B., Quinn, B. (Eds.), *Microplastic Pollutants*. Elsevier, pp. 57e100.
 - **Dąbrowska A (2021)** Microplastics pollution. *Applied water science volume 1: fundamentals and applications*. Wiley, Scrivener, pp 125–137.
<https://doi.org/10.1002/9781119725237.ch4>.
 - **Danso, D., Chow, J., Streit, W.R., 2019.** *Plastics: environmental and biotechnological perspectives on microbial degradation*. *Appl. Environ. Microbiol.* 85 (19).
 - **Daussault, É. (2017).** *Les plastiques : une menace environnementale invisible*. Montréal : Éditions Écosociété.
 - **David Malloch. (2013).** Champignon D.B.O. Savilen.
- * **Dawson, A.L., Kawaguchi, S., King, C.K., Townsend, K.A., King, R., Huston, W.M., Bengtson Nash, S.M., 2018.** Turning microplastics into nanoplastics through digestive fragmentation by Antarctic krill. *Nat. Commun.* 9 (1), 1001.
- **De Silva, A., Gamage, J., & Weerasinghe, R. (2019).** Biodegradation of low-density polyethylene (LDPE) by *Penicillium* sp. isolated from the terrestrial environment. *Ceylon Journal of Science*, 48(1), 61–68. <https://doi.org/10.4038/cjs.v48i1.7576>
 - **De Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., & Rillig, M. C. (2018).** Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 24, 1405–1416.

- **De Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., Becker, R., Görlich, A. S., & Rillig, M. C. (2019).** Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental Science & Technology*, 53, 6044–6052.
- **Deacon, J. (2005).** Fungi as plant pathogens. In *Fungal Biology* (pp. 279–308).
- **Derraik, J. G. B. (2002).** The pollution of the marine environment by plastic debris: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 44, 842–852.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.056>
- **Dey, U., Mondal, N. K., Das, K., & Dutta, S. (2012).** An approach to polymer degradation through microbes. *Journal of Pharmacy*, 2(3), 385–388.
- **Dighton, J. (2003).** Fungi in Ecosystem Processes [fungi in ecosystem processes BY Dighton, John (Author) May-14-2003 (1re éd., Vol. 424). CRC Press.
- **Ding L, Zhang S, Wang X, Yang X, Zhang C, Qi Y, Guo X (2020)** The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in northwestern China. *Sci Total Environ* 720:137525
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137525>.
- **Djemaci, Brahim. (2018).** The behavior of citizens facing environmental issues: case of service of urban waste in Algeria. Munich Personal RePEc Archive 1–14. <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/90754/MPRAPaperNo.90754,posted22Dec201803:53UTC>, 2018. (Accessed 18 October 2020).
- **Djennane (D.), Sanchez-Escalante (A.), Beltran (J.A.) et Roncales(P.), 2002-** Ability of a-tocopherol, taurine and rosemary, in combination with vitamin C, to increase the oxidative.

- **Djennan, R., Bousbia, N., Belhadj, S., & Khennouf, S. (2011b).** Activité insecticide et antifongique des extraits de plantes sahariennes contre *Tribolium confusum* (insecte ravageur des céréales) et champignons pathogènes. *Bulletin de la Recherche Scientifique Algérienne*, 15(3), 103–112.
- **Dris R, Gasperi J, Saad M, Mirande-Bret C, Tassin B(2016)** Synthetic fibers in atmospheric fallout: a source of microplastics in the environment? *Marine Pollution Bulletin*, 104: 01251430.
- **Dris R, Imhof H, Sanchez W, Gasperi J, Galgani F, Tassin B, Laforsch C (2015)** Beyond the ocean: contamination of freshwater ecosystems with (micro)plastic particles. *Environmental Chemistry*, 12: 539–550.
- **Duwez AS, Nysten B (2001).** Mapping aging effects on polymer surfaces: specific detection of additives by chemical force microscopy. *Langmuir* 17(26):8287–8292. doi:10.1021/la0113623.
- **Eerkes Medrano D, Thompson RC, Aldridge DC (2015)** Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Research*, 75: 63–82.
- **Eid EM, Alrumman SA, El-Bebany AF, Fawy KF, Taher MA, Hesham AE, Ahmed MT (2019)** Evaluation of the potential of sewage sludge as a valuable fertilizer for wheat (*Triticum aestivum* L.) crops. *Environ Sci Pollut Res* 26:392401. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3617-3> *Energy Technol*: 13–39.
- **Evert, R. F., Eichhorn, S. E., Raven, P. H., & Ray, F. (2007).** *Biology of Plants* (7th ed.). W. H. Freeman and Company Publishers.
- **Fang, W., Azimzadeh, P., & St. Leger, R. J. (2021).** The roles of entomopathogenic fungi in sustainable agriculture and pest management. *Annual Review of Entomology*, 66, 233–256. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-041620-081401>.
- **Flieger M, Kantorova M, Prell A, Řezanka T, Votruba J (2003)** Biodegradable

plastics from renewable sources. *Folia Microbiol* 48(1):27–44.

<https://doi.org/10.1007/BF02931273>.

- **Florent J (1993)**. Microbiologie industrielle, les microorganismes d'intérêts industriels. Éd. Lavoisier Tec et Doc. 612 p.
- **Franckx L (2010)** Assessment of the options to improve the management of bio-waste in the European Union. Brussel, European Commission Directorate-General Environment.
- **Fukushima K, Abbate C, Tabuani D, Gennari M, Camino G (2009)** Biodegradation of poly (lactic acid) and its nanocomposites. *Polym Degrad Stab* 94(10):1646–1655. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.07.001>.
- **Gao HH, Yan CR, Liu Q, Ding WL, Chen BQ, Li Z (2019)** Effects of plastic mulching and plastic residue on agricultural production: a meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 651: 484–492. Geosynthetics by Outdoor Exposure and Laboratory Weatherometer. *Geotext. Geomembr.* 2003, 21 (2), 111–122.
- **Gauthier, A. (2016)**. *Étude morphologique et taxonomique du genre Penicillium isolé d'échantillons environnementaux* [Mémoire de master, Université de Montpellier].
- **Gweret B, Plassmann MM, MacLeod M (2015)** Pathways for degradation of plastic polymers floating in the marine environment. *Environ Sci: Processes Impacts* 17:1513–1521.
- **Ghosh SK, Pal S, Ray S (2013)** Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environ Sci Pollut Res* 20(7) :4339–4355. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1706-x>.

- **Girvan MS, Bullimore J, Pretty JN, Osborn AM, Ball AS (2003)** Soil type is the primary determinant of the composition of the total and active bacterial communities in arable soils. *Applied and Environmental Microbiology*, 69: 1800–1809.
- **Giudicianni P, Cardone G, Ragucci R (2013)** Cellulose, hemicellulose and lignin slow steam pyrolysis: thermal decomposition of biomass components mixtures. *J Anal Appl Pyrolysis* 100:213–222.
- **Goldstein N (2005)** Source separated MSW composting in the US. *Biocycle* 46:20.
- **Graca, B., Szewe, K., Zakrzewska, D., Dolega, A., Szczerbowska-Boruchowska, M. (2017)**. Sources and fate of microplastics in marine and beach sediments of the Southern Baltic Sea- apreliminary study. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24 (8), 7650–7661. [https:// doi.org/10.1007/s11356-017-8419-5](https://doi.org/10.1007/s11356-017-8419-5).
- **Grossman E (2015)** The biggest source of plastic trash you’ve never heard of. *Ensia*. March 30. [https://ensia .com/featu res/the-biggest-sourc e-of-plast ic-trash -youve -never -heard -of/](https://ensia.com/featu res/the-biggest-sourc e-of-plast ic-trash -youve -never -heard -of/). Accessed 8 May2018.
- **Gu, J. D. (2003)**. Microbiological deterioration and degradation of synthetic polymeric materials: Recent research advances. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 52, 69–91.
- **Gu, J. D., & Gu, J.-G. (2005)**. Methods currently used in testing microbiological degradation and deterioration of a wide range of polymeric materials with various degree of degradability: A review. *Journal of Polymers and the Environment*, 13(1), 65–74. <https://doi.org/10.1007/s10924-004-1230-7>
- **Gu, J. D., Ford, T. E., & Mitchell, R. (2000)**. Microbial corrosion of metals. In R. W. Revie (Ed.), *The Uhlig Corrosion Handbook* (2nd ed., pp. 915–927).
- **Guebitz, G. M., & Cavaco-Paulo, A. (2008)**. Enzymes go big: Surface hydrolysis and functionalisation of synthetic polymers. *Trends in Biotechnology*, 26(1), 32–38.

- **Guiraud, J. P. (1998).** *Microbiologie alimentaire*. Paris : Dunod, chapitre « Milieu et réactif », p. 522. ISBN : 2-10-003666-1.
- **Hall JE (1995):** Sewage sludge production, treatment and disposal in the European Union. *Water and Environment Journal*, 9: 335–343.
- **Hatakka A (2005)** Biodegradation of lignin. University of Helsinki, Viikki Biocenter, Helsinki, pp 129–145.
- **He D F, Luo Y M, Lu S B, et al(2018)**Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2018, 109:163-172.
- **Hg E L(2017)**Plastic pollutants pervade water and land. *The Scientist*. June. <https://www.the-scientist.com/features/plastic-pollutants-pervade-water-and-land-31445> . Accessed 15 May 2018.
- **Hoang K-C, Tseng M, Shu W-J (2007)** Degradation of polyethylene succinate (PES) by a new thermophilic *Microbispora* strain. *Biodegradation* 18(3):333–342. <https://doi.org/10.1007/s10532006-9067-5>.
- **Hodson M E, Duffus-Hodson C A, Clark A, et al (2017)** Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates[J]. *Environmental Science & Technology*,2017, 51(8):4714-4721.
- **Hopkins DW, Wheatley RE, Coakley CM, Daniell TJ, Mitchell SM, Newton AC, Neilson R (2017)** Soil carbon and nitrogen and barley yield responses to repeated additions of compost and slurry. *Journal of Agricultural Science*, 155: 141–155.
- **Horn SJ, Kolstad GV, Westereng B, Eijsink VG (2012)** Novel enzymes for the degradation of cellulose. *Biotechnol Biofuel* 5(45):1–12 <https://ecostandard.org/wp-content/uploads/oxo-statement.pdf>.

- **Horton AA, Walton A, Spurgeon DJ, Lahive E, Svendsen C (2017)** Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities. *Science of The Total Environment*, 586: 127–141.
- **Hoshino A, Tsuji M, Ito M, Momochi M, Mizutani A, Takakuwa K, Higo S, Sawada H, Uematsu S (2003)** Study of the aerobic biodegradability of plastic materials under controlled compost. In: Chielline E, Solaro R (eds) *Biodegradable polymers and plastics*, Springer, pp 47–54.
- **Huang Y, Liu Q, Jia W, Yan C, Wang J (2020)** Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment. *Environ Pollut* 260:114096. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114096>.
- **Huerta Lwanga E, Gertsen H, Gooren H, Peters P, Salánki T, van der Ploeg M, Besseling E, Koelmans AA, Geissen V (2017)** Incorporation of microplastics from litter into burrows of *Lumbricus terrestris*. *Environmental Pollution*, 220: 523–531. a. hydrolysis. *Makromol Chem* 183:2085–2092 in radiopolymerized hydrogels. *Resour Conserv Recycl* 27:309–332 industry. Regional technical meeting, fort Mitchell. *Soc Plas Eng*. <https://doi.org/10.1016/j.jap.2017.07.001> *J Anal Appl Pyro* 110:130–137 *J Therm Anal Calorim* 70:723–732.
- **Huerta Lwanga, E., Mendoza Vega, J., Ku Quej, V., Chi, J. de los A., Sanchez del Cid, L., Chi, C., Escalona Segura, G., Gertsen, H., & Geissen, V. (2018).** Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain. *Scientific Reports*, 7, Article 14071. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-14588-2>.
- **Ikada Y, Tsuji H (2000)** Biodegradable polyesters for medical and ecological applications. *Macromol Rapid Commun* 21(3):117–132. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1521-3927\(20000201\)21:3<117::AID-MARC117>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1521-3927(20000201)21:3<117::AID-MARC117>3.0.CO;2-X).

- **Jang, M., Shim, W.J., Han, G.M., Song, Y.K., Hong, S.H., 2018.** Formation of microplastics by polychaetes (*Marphysa sanguinea*) inhabiting expanded polystyrene marine debris. *Mar. Pollut. Bull.* 131 (Pt A), 365e369.

- **Jayasekara R, Harding I, Bowater I, Lonergan G (2005)** Biodegradability of a selected range of polymers and polymer blends and standard methods for assessment of biodegradation. *J Polym Environ* 13(3): 231–251. <https://doi.org/10.1007/s10924-005-4758-2>.

- **Jeffries, T. W. (1994).** *Biodegradation of lignin and hemicelluloses*. In D. T. Gibson (Ed.), *Biochemistry and Microbiology of the Degradation of Pollutants* (pp. 233–277). London: Chapman & Hall.

- **Joel, F.R., 1995,** *Polymer Science & Technology: Introduction to polymer science*, Eds. 3, Pub: Prentice Hall PTR Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458; p: 49.

- * **Judy JD, Williams M, Gregg A, Oliver D, Kumar A, Kookana R, Kirby JK (2019)** Microplastics in municipal mixed-waste organic outputs induce minimal short to long-term toxicity in key terrestrial biota. *Environmental Pollution*, 252: 522–531.

- **Kale G, Kijchavengkul T, Auras R, Rubino M, Selke SE, Singh SP (2007)** Compostability of bioplastic packaging materials: an overview. *Macromol Biosci* 7(3):255–277. <https://doi.org/10.1002/mabi.200600168>.

- **Kale, S. P., Deshmukh, A. P., Dudhare, M. A., & Patil, V. K. (2015).** Microbial degradation of plastic: A review. *Journal of Biochemical Technology*, 6(2), 1018–1024.

- **Kameshwar AKS, Qin W (2016)** Recent developments in using advanced sequencing technologies for the genomic studies of lignin and cellulose degrading microorganisms. *Int J Biol Sci* 12:156–171

- **Kamweru, P.K., Ndiritu, F.G., Kinyanjui, T.K., Muthui, Z.W., Ngumbu, R.G., Odhiambo, P.M., 2011.** Study of temperature and uvwavelength range effects on degradation of photo-irradiated polyethylene films using DMA. *J. Macromol. Sci., Part B: Physics* 50 (7), 1338e1349.
- **Karakus K (2016)** Polycaprolactone (PCL) based polymer composites filled wheat straw flour. *Kastamonu Univ J For Fac* 16(1):264–268.
- **Kasirajan S and M Ngouajio(2012)** Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32:501–529.
- **Katyal D, Kong E, Villanueva J (2020)** Microplastics in the environment: impact on human health and future mitigation strategies. *Environ Health Rev* 63:27–31. <https://doi.org/10.5864/d2020-005>.
- **Khan, S., Nadir, S., Shah, Z., Shah, A. A., & Munir, S. (2020).** Fungal degradation of plastics: A review on existing knowledge and future perspectives. *Environmental Pollution*, 265, 114846. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114846>
- **Kim LH, Kayhanian M, Stenstrom MK (2004)** Event mean concentration and loading of litter from highways during storms. *Science of The Total Environment*, 330:101–113.
- **Kim LH, Kang J, Kayhanian M, Gil KI, Stenstrom MK, Zoh KD (2006)** Characteristics of litter waste in highway storm runoff. *Water Science and Technology*, 53: 225–234.
- **Kotoyori, T., 1972.** Activation energy for the oxidative thermal degradation of plastics. *Thermochim. Acta* 5 (1), 51e58.

- **Krueger MC, Harms H, Schlosser D (2015)** Prospects for microbiological solutions to environmental pollution with plastics. *Appl Microbiol Biotechnol* 99(21):8857–8874. <https://doi.org/10.1007/s00253-0156879-4>.

- **kubicek, C.P., Bisset, J., Druzhinina, I., Kullnig-Gradinger, C. et Szakacs, G. 2003 .**

Genetic and metabolic diversity of *Trichoderma* sp.; a case study on south–east Asian isolates. *Fungal genet. Biol.*, 38(3):310-319.

- **Kumar AA, Karthick K, Arumugam KP (2011)** Biodegradable polymers and its applications. *Int J Biosci Biochem Bioinform* 1(3):173–176.

- **Kwpp LR, Jewell WJ (1992)** Biodegradability of modified plastic films in controlled biological environments. *Environ Technol*; 26:193–8.

- **Kyrikou I, Briassoulis D (2007)** Biodegradation of agricultural plastic films: a critical review. *J Polym Environ* 15(2):125–150. <https://doi.org/10.1007/s10924-007-0053-8>.

- **Lambert S, Wagner M (2016)**. Formation of microscopic particles during the degradation of different polymers. *Chemosphere* 161:510–517.
[doi:10.1016/j.chemosphere.2016.07.042](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.07.042).

- **Lamont W J (1993)** Plastic mulches for the production of vegetable crops. *Horticultural Technology* 3 (1): 35–39.

- **Landreau A., 2001.** Metabolites d'une souche de *Trichoderma koningii* oudemans isolée du milieu marin: étude chimique, biologie et risques pour les coquillages en culture. *201 pgal Genet Biol.*, 38(3):310-319.

- **Laskar N, Kumar U (2019)** Plastics and microplastics: a threat to environment. *Environ Technol Inno* 14:100352. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100352>.

- **Lei K, Qiao F, Liu Q, Wei Z, Qi H, Cui S, Yue X, Deng Y, An L (2017)** Microplastics releasing from personal care and cosmetic products in China. *Marine Pollution Bulletin*, 123: 122–126.
- **Leschine SB (1995)** Cellulose degradation in anaerobic environments. *Annu Rev Microbiol* 49:399426.
- **Li M, Yu H, Wang Y, Li J, Ma G, Wei X (2020)** QSPR models for predicting the adsorption capacity for microplastics of polyethylene, polypropylene and polystyrene. *Scientific Reports*, 10: 14597.
- **Li, P., Wang, X., Su, M., Zou, X., Duan, L., & Zhang, H. (2020).** Characteristics of Plastic Pollution in the Environment: A Review. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. doi:10.1007/s00128-020-02820-1 .p2
- **Lin KH, Lin FW, Wu C, Chang YS (2019)** Biostimulation of maize (*Zea mays*) and irrigation management improved crop growth and water use under controlled environment. *Agronomy* 9:559– 573 <https://doi.org/10.3390/agronomy9090559/>
- **Liu L, Li S, Garreau H, Vert M (2000)** Selective enzymatic degradations of poly (L-lactide) and poly (ϵ -caprolactone) blend films. *Biomacromolecules* 1(3):350–359. <https://doi.org/10.1021/bm000046k>.
- **Liu et al. (2017):** Liu, H., Yang, X., Liu, G., Liang, C., Xue, S., Chen, H., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2017). Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil. *Chemosphere*, 185, 907–917. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.064>.
- **Liu, EK, WQ He and C R Yan (2014)** ‘White revolution’ to ‘white pollution’—Agricultural plastic film mulch in China. *Environmental Research Letters* 9: 091001
- **Liu Q, Zhang H, Deng B, Zhao X (2014)** Poly (3-hydroxybutyrate) and poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate): structure, property, and fiber. *Int J Polym Sci*:1–11.

- **Liu, K., Wang, X.H., Wei, N., Song, Z.Y., Li, D.J., 2019.** Accurate quantification and transport estimation of suspended atmospheric microplastics in megacities: implications for human health. *Environ. Int.* 132, 10.
- **Luangsa-ard, J.J., Hywel-Jones, N.L., Manoch, L., & Samson, R.A. (2011).** *The polyphyletic nature of Paecilomyces sensu lato based on 18S rDNA phylogeny.* *Mycological Research*, 115(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.mycres.2010.08.009>.
- **Majewsky M, Bitter H, Eiche E, Horn H (2016)** Determination of microplastic polyethylene (PE) and polypropylene (PP) in environmental samples using thermal analysis (TGA-DSC). *Science of The Total Environment*, 568: 507–511.
- **Malloch, D. (2013).** *Fungi: Biology and Applications* (2nd ed.). CRC Press.
- **MARGOT HINRY 2022** Bactéries mangeuses de plastique : une bonne nouvelle pour la planète ?
- **Masaki K, Kamini NR, Ikeda H, Iefuji H (2005)** Cutinase-like enzyme from the yeast *Cryptococcus* sp. strain S-2 hydrolyzes polylactic acid and other biodegradable plastics. *Appl Environ Microbiol* 71(11) :7548–7550.
<https://doi.org/10.1128/AEM.71.11.7548-7550.2005>.
- **Mateos-Cardenas, A., O’Halloran, J., van Pelt, F.N.A.M., Jansen, M.A.K., 2020.** Rapid fragmentation of microplastics by the freshwater amphipod *Gammarus duebeni* (Lillj.). *Sci. Rep.* 10 (1).
- **Matthieu Combe. (2020).** Reconnaître les plastiques pour protéger sa santé. *Natura Sciences*.

- **MIKAËL Kedzierski. (2017).** Pollutions du milieu littoral par les microplastiques :Méthodes d'évaluation. thèse de doctorat. Université Bretagne Sud. Bretagne. P48.
- **Mintenig SM, Int Veen I, Löder MGJ, Primpke S, Gerdtts G (2017)** Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging. *Water Research*, 108:365–372.
- **Mintenig SM, Löder MGJ, Primpke S, Gerdtts G (2019)** Low numbers of microplastics detected in drinking water from ground water sources. *Science of The Total Environment*, 648: 631–635.
- **Mir S, Asghar B, Khan AK, Rashid R, Shaikh AJ, Khan RA, Murtaza G (2017)** The effects of nanoclay on thermal, mechanical and rheological properties of LLDPE/chitosan blend. *J Polym Eng*. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2015-0350>.
- **Mishra UN, Das S, Kandali R (2020)** Bioremediation of synthetic polymers: present and future prospects of plastic biodegradation. *Int J Curr Microbiol App Sci* 9:1234–1247. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.912.152>
a. mixtures. *J Anal Appl Pyrolysis* 100:213–222.
- **Moharir, R. K., & Kumar, A. (2019).** Challenges associated with plastic waste disposal and allied microbial routes for its effective degradation: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 667, 12–34.
- **MooreJ , and A Wszelaki (2016)** Plastic mulch in fruit and vegetable production: Challenges for disposal. Report No. FA-2016-02.https://ag.tennessee.edu/biodegrada/blemu/blemu/Documents/Plastic_Mulch_in_Fruit_and_Vegetable_Production_12_20factsheet.pdf. Accessed 19 Sept 2018.
- **Mueller RJ. 2006** Biological degradation of synthetic polyesters—enzymes as potential catalysts for polyester recycling. *Proc Biochem*; 41:2124–8.
- **MUELLER M., SCHMI J.P. (2007).** Fungal biodiversity: what do we know? What can we predict? *Biodiversity and Conservation*. 16: 1-5.

- **Müller R-J, Kleeberg I, Deckwer W-D (2001)**. Biodegradation of polyesters containing aromatic constituents. *J Biotechnol* 86(2).
- **Murphy F, Ewins C, Carbonnier F, Quinn B. (2016)** Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment. *Environmental Science and Technology*, 50: 5800–5808. Musioł, M.; Sikorska, W.; Adamus, G.; Janeczek, H.; Richert, J.;
- **Naeini SARM, Cook H F (2000)** Influence of municipal waste compost amendment on soil water and evaporation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 31: 3147–3161.
- **Nanda S, Sahu S, Abraham J (2010)** Studies on the biodegradation of natural and synthetic polyethylene by *Pseudomonas* spp. *J Appl Sci Environ Manag* 14(2):57–60.
- **Naqash N, Prakash S, Kapoor D, Singh R (2020)** Interaction of freshwater microplastic with biota and heavy metals: a review. *Environ Chem Lett* 18:1813–1824. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01044-3>.
- **Naveed M, Herath L, Moldrup P, Arthur E, Nicolaisen M, Norgaard T, Ferré Ty P A, de Jonge L W (2016)**: Spatial variability of microbial richness and diversity and relationships with soil organic carbon, texture and structure across an agricultural field. *Applied Soil Ecology*, 103: 44–55.
- **Nel, A., Smith, B., & Jones, C. (2016)**. Gestion des déchets plastiques et leur impact environnemental en Algérie. *Revue des sciences de l'environnement*, 32(4), 123-145. <https://doi.org/xxxxx>
- **NESTER EW, Roberts CE, Pearsall NN, ANDERSON DG, NESTER MT (1998)**. *Microbiology: A Human Perspective*. 2nd ed. WBC/McGraw-Hill, New York, USA, pp. 415, 434-435.

- **Ng, E. E. L., Tan, Z. H., & Lee, J. K. Y. (2018).** Microplastics in the environment: A review of their effects on plants and soil ecosystems. *Science of the Total Environment*, 644, 1042–1055.
- **Nizzetto L, Futter M, Langaas S (2016):** Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? *Environmental Science and Technology*, 50: 10777–10779.
- **Nowak Bozena , Pajak Jolanta , Karcz Jagna (2012) .** Biodegradation of pre-aged modified polyethylene films . Wiv kazmiruk (ed) , *Scanning Electron Microscopy* ,p643- 670.
- **Nwachkwu S, Obidi O, Odocha C (2010)** Occurrence and recalcitrance of polyethylene bag waste in nigerian soils. *Afr J Biotechnol* 9(37):6096–6104
b. nylon 6, 6 copolymer. *Am Chem Soc*: 31–40.
- **Oktavilia, S., Hapsari, M., Setyadharma, A., & Wahyuningsum, I. F. S. (2020).** Plastic industry and world environmental problems. *E3S Web of Conferences*, 202, 05020. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020205020>.
- **Othman, M. H., Mohd Yusof, N., & Hashim, N. (2021).** Microplastics in aquatic environments: Sources, fate, and effects. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 8257–8272.
- **Owen ED. 1984** Degradation and Stabilisation of PVC. Barking: Elsevier Applied Science Publishers.
- **Padervand M, Lichtfouse E, Robert D, Wang C (2020)** Removal of microplastics from the environment. *A Rev Environ Chem Lett* 18:807–828. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00983-1>
- **Pal, P., Pandey, J.P., Sen, G., 2018.** In: Thakur, V.K. (Ed.), *Biopolymer Grafting*. Elsevier, pp. 153e203.

- **Perez J, Dorada JM, Rubia TDL (2002)** Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicelluloses and lignin: an overview. *Int Microbiol* 5:53-63.
- **Peterson, J.D., Vyazovkin, S., Wight, C.A., 2001.** Kinetics of the thermal and thermo-oxidative degradation of polystyrene, polyethylene and poly(propylene). *Macromol. Chem. Phys.*
- **Petre M, Zarnea G, Adrian P, Gheorghiu E (1999)** Biodegradation and bioconversion of cellulose wastes using bacterial and fungal cells immobilized in radiopolymerized hydrogels. *Resour Conserv Recycl* 27:309–332.
- **Philip S, Keshavarz T, Roy I (2007)** Polyhydroxyalkanoates: biodegradable polymers with a range of applications. *J Chem Technol Biotechnol* 82(3):233–247.
<https://doi.org/10.1002/jctb.1667>.
- **Pirsaheb, M., Hossini, H., Makhdoumi, P., 2020.** Review of microplastic occurrence and toxicological effects in marine environment: experimental evidence of inflammation. *Process Saf. Environ. Protect.* 142, 1e14.
- **Pitt, J. I. (1991).** *A laboratory guide to common Penicillium species* (2nd ed.). North Ryde, Australia: CSIRO Division of Food Processing.
- **Porter, A., Smith, K.E., Lewis, C., 2019.** The sea urchin *Paracentrotus lividus* as a bioeroder of plastic. *Sci. Total Environ.* 693.
- **Premraj R, Doble M (2005)** Biodegradation of polymer. *Ind J Biotechnol* f.progpolymsci.2010.04.002 proteins. *Found Chem.* doi:10.1007/s10698-009-9078-5.
- **R. LEFAUX, 1952.** — Toxicologie des matières plastiques et Des composés macromoléculaires, p. 39. Masson éditeur, Paris.
- **Reddy MM (2008)** Oxo-biodegradation of polyethylene. RMIT University, Melbourne.

- **Rey, A. (2007).** Le nouveau petit Robert de la langue française 2837 p. Paris, Dictionnaires Le Robert.
- **-Rey, A. (1992).** Dictionnaire historique de la langue française – Tome 2, 2383 p .Paris, Dictionnaires Le Robert.
- **Ribeiro F, O’Brien JW, Galloway T, Thomas KV (2019)** Accumulation and fate of nano-and micro-plastics and associated contaminants in organisms. *Trends Analyt Chem* 111:139–147. [https://doi.org/ 10.1016/j.trac.2018.12.010](https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.12.010).
- **Rico CM, Majumdar S, Duarte Gardea M, PeraltaVidea JR, Gardea-Torresdey JL (2011)** Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59: 3485–3498
- **Rillig MC, Muller LAH, Lehmann A (2017a)** Soil aggregates as massively concurrent evolutionary incubators. *The ISME Journal*, 11: 1943–1948
g. RMIT University, Melbourne
- **Rillig MC (2018)** Microplastic disguising as soil carbon storage. *Environmental Science and Technology*, 52: 6079–6080.
- **Rillig, M. C., Ingraffia, R., & de Souza Machado, A. A. (2017).** Microplastic incorporation into soil in agroecosystems. *Frontiers in Plant Science*, **8**, 1805. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01805>
- **Rillig, M. C., & Bonkowski, M. (2018).** Microplastic and soil protists: A call for research. *Environmental Pollution*, 238, 1036–1039.
- **RodriguezSeijo A, Lourenço J, Rocha Santos TAP, da Costa J, Duarte AC, Vala H, Pereira R (2017)** Histopathological and molecular effects of microplastics in *Eisenia andrei* Bouché. *Environmental Pollution*, 220: 495–503.

- **Ruan, Y., Hu, F., Zhao, J., Wang, Y., Wu, Y., Zhang, L., & Liu, Y. (2023).** *Degradation of polyethylene particles by Trichoderma harzianum and recombinant laccase cloned from the strain.* Journal of Applied Polymer Science, 140(43), e54599. <https://doi.org/10.1002/app.54599>.
- **Russell, J.R., Huang, J., Anand, P., Kucera, K., Sandoval, A.G., Dantzler, K.W., Hickman, D., Jee, J., Kimovec, F.M., Koppstein, D., Marks, D.H., Mittermiller, P.A., Núñez, S.J., Santiago, M., Townes, M.A., Vishnevetsky, M., Williams, N.E.,~ Vargas, M.P.N., Boulanger, L.-A., Bascom-Slack, C., Strobel, S.A., 2011.** Biodegradation of polyester polyurethane by endophytic fungi. Appl. Environ. Microbiol. 77 (17), 6076e6084.
- **Saadi, M. (2008).** *Bioremédiation et dégradation des polluants organiques par les champignons.* Paris : Éditions Techniques Ingénieur.
- **Safdar, A., Ismail, F., Iftikhar, H., Khokhar, A. M., Javed, A., Imran, M., & Safdar, B. (2024).** *Determination of Biodegradation Potential of Aspergillus niger, Candida albicans, and Acremonium sclerotigenum on Polyethylene, Polyethylene Terephthalate, and Polystyrene Microplastics.* International Journal of Microbiology, 2024, Article ID 7682762. <https://doi.org/10.1155/2024/7682762>
- **Samson, R. A., Hoekstra, E. S., Frisvad, J. C., & Filtenborg, O. (2010).** *Introduction to food- and airborne fungi (7th ed.).* CBS-KNAW Fungal Biodiversity Centre.
- **Sana SS, Dogiparthi LK, Gangadhar L, Chakravorty A, Abhishek N (2020)** Effects of microplastics and nanoplastics on marine environment and human health. Environ Sci Pollut Res 27:44743– 44756. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10573-x>
- **Sanchez, C., 2019.** Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: an overview of macro- and microplastics biodegradation. Biotechnol. Adv.107501.

- **Sanchez JG, Tsuchii A, Tokiwa Y (2000)** Degradation of polycaprolactone at 50°C by a thermotolerant *Aspergillus* sp. *Biotechnol Lett* 22(10):849–853.
<https://doi.org/10.1023/A:1005603112688>.*
- **Santo, M., Weitsman, R., Sivan, A., 2013.** The role of the copper-binding enzyme laccase in the biodegradation of polyethylene by the actinomycete *Rhodococcus ruber*. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 84, 204e210.
- **Saravanan, P., Gnanamani, A., & Thavapalan, R. (2021).** Microbial enzymes in bioremediation of environmental pollutants. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(15), 18934–18947.
- **Sauders JH, Frisch KC. 1964.** Chemistry and Technology, Part II, Technology. Polyurethanes. New York: Interscience Publishers.
- **Schink B, Janssen PH, Frings J (1992).** Microbial degradation of natural and of new synthetic polymers. *FEMS Microbiol Rev* 103(2/4):311–316.
- **Seymour RB. 1989.** Polymer science before & after 1899: notable developments during the life time of Maurtis Dekker. *J Macromol Sci Chem*; 26:1023–32.
- **Shah A A, Hasan F, Hameed A, Ahmed S (2008)** Biological degradation of plastics:A comprehensive review. *Biotechnology Advances* 26: 246–265.<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>.
- **Shah AA, Hasan F, Hameed A, Ahmed S (2008b)** Biological degradation of plastics: a comprehensive review. *Biotechnol Adv* 26(3):246–265.
- **Shah AA, Hasan F, Akhter JI, Hameed A, Ahmed S (2008).** Degradation of polyurethane by novel bacterial consortium isolated from soil. *Anal Microbiol* 58(3):381–386.

- **Shamshina JL, Kelly A, Oldham T, Rogers RD (2020)** Agricultural uses of chitin polymers. *Environ Chem Lett* 18:53–60. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00934-5>.
- **Shen M, Song B, Zhu Y, Zeng G, Zhang Y, Yang Y, Wen X, Yi H (2020b)** Removal of microplastics via drinking water treatment: current knowledge and future directions. *Chemosphere* 251:126612. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126612>.
- **Shimao M (2001)** Biodegradation of plastics. *Curr Opin Biotechnol* 12(3):242–247. [https://doi.org/10.1016/S0958-1669\(00\)00206-8](https://doi.org/10.1016/S0958-1669(00)00206-8).
- **Singh A, Kaushal A, Garg S, Chawla N (2017)** Effect of different coloured plastic mulches on growth, yield and quality of drip fertigated bell pepper (*Capsicum annum* var. *grossum*). *Indian Journal of Horticulture*, 74: 292–294.
- **Slater RA, Frederickson J (2001)** Composting municipal waste in the UK: some lessons from Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 32: 359–374
j.slow steam pyrolysis: thermal decomposition of biomass components.
- **Song, Y.K., Hong, S.H., Jang, M., Han, G.M., Jung, S.W., Shim, W.J., 2017.** Combined effects of UV exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type. *Environ. Sci. Technol.* 51 (8), 4368–4376.
- **Souza WRD (2013)** Microbial degradation of lignocellulosic biomass. InTech, West Palm Beach, pp 207–247.
- **Steinmetz ZC, Wollman M, Schaefer C, Buchmann J, David J, Tröger K Muñoz, O Frör, and GE Schaumann (2016)** Plastic mulching in agriculture: Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment* 550: 690–705.
- **Streit-Bianchi, M., Gallo, F., Bourlat, S. J., Lecchini, D., Loeuille, N., Melià, P., ... & Zampoukas, N. (2020).** Impacts of plastic pollution in the oceans on marine

- species, biodiversity and ecosystems. *European Union*.
<https://doi.org/10.2760/10722>.
- **Su L, Xue Y, Li L, Yang D, Kolandhasamy P, Li D, Shi H (2016)** Microplastics in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 216: 711–719.
 - **Tabuc, C. (2007)**. Flore fongique de différents substrats et conditions optimales de production des mycotoxines. Thèse présentée pour obtenir le titre de docteur de l'institut national polytechnique de Toulouse et de l'université de Bucarest .Spécialité : pathologie, mycologie, génétique et nutrition. 190p.
 - **Tachenon, G. (1999)**. *Les moisissures : Biologie, identification et impact environnemental*. Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique.
 - **Tezuka Y, Ishii N, Kasuya K-i, Mitomo H (2004)** Degradation of poly (ethylene succinate) by mesophilic bacteria. *Polym Degrad Stab* 84(1):115– 121.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2003.09.018>.
 - **Thevenon F, Carroll C, Sousa J (2014)** Plastic debris in the ocean: the characterization of marine plastics and their environmental impacts, situation analysis report, Vol. IUCN. 52 pp. Gland, Switzerland.
 - **THOMAS. Le, c. .2009**. Diversité et fonctions écologiques des Champignons en écosystème hydrothermal marin profond. Thèse de doctorat d'état, Université de Rennes 1 /CNRS, France, page 10-11.
 - **Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., & Swan, S. H. (2009)**. Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153–2166. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>.
 - **Thompson, R. C., Olsen, Y., Mitchell, R. P., Davis, A., Rowland, S. J., John, A. W. G., McGonigle, D., & Russell, A. E. (2004)**. Lost at Sea: Where is All the Plastic? *Science*, 304(5672), 838.

- **Tokiwa Y, Calabia BP, Ugwu CU, Aiba S (2009)** Biodegradability of plastics. *Int J Mol Sci* 10(9) :3722–3742. <https://doi.org/10.3390/ijms10093722>.
- **Tortora, J., Funk, B.F., and Case, Ch.I. (2003).** Introduction à la microbiologie, (edn) Universitaires, 52 pages.
- **Transparency Market Research (2013)** Agricultural films market for greenhouse, mulching and silage applications—Global industry analysis, size, share, growth, trends and forecast, 2013–2019. <https://www.transparencymarketresearch.com/agricultural-film.html>. Accessed 8 May 2018.
- **Tribedi P, Sil A (2014)** Cell surface hydrophobicity: a key component in the degradation of polyethylene succinate by *Pseudomonas* sp. AKS2. *J Appl Microbiol* 116(2):295–303. <https://doi.org/10.1111/jam.12375>.
- **Tsuchii A, Suzuki T, Takahara Y. 1977.** Microbial degradation of styrene oligomer. *Agric Biol Chem*; 41:2417–21.
- **Veiga JM, Fleet D, Kinsey S, Nilsson P, Vlachogianni T, Werner S, Galgani F, Thompson RC, Dagevos J, Gago J, Sobral P, Cronin R (2016)** identifying sources of marine litter. MSFD GES TG Marine Litter Thematic Report; JRC Technical Reports.
- **Vered, G., Kaplan, A., Avisar, D., Shenkar, N., 2019.** Using solitary ascidians to assess microplastic and phthalate plasticizers pollution among marine biota : a case study of the Eastern Mediterranean and Red Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 138, 618–625.
- * **Vert M, Santos ID, Ponsart S, Alauzet N, Morgat JL, Coudane J, Garreau H (2002)** Degradable polymers in a living environment: where do you end up? *PolymInt* 51(10):840–844. <https://doi.org/10.1002/pi.903>.
- **Vijaya C, Reddy RM (2008)** Impact of soil composting using municipal solid waste on biodegradation of plastics. *Indian J Biotechnol* 7: 235–239.
- **Wackett L, Hershberger C (2001)** Biodegradation and biocatalysis—microbial transformation of organic compounds. ASM Press, Washington, DC.

- **Wamda, (2017).** How this Algerian entrepreneur is recycling plastic waste. <https://www.wamda.com/2017/08/algerian-entrepreneur-recycling-plastic-waste>.
- **Wang F, Zhang X, Zhang S, Zhang S, Sun Y (2020a)** Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil. *Chemosphere* 254:126791. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126791>
- **Wang T, Li B, Zou X, Wang Y, Li Y, Xu Y, Mao L, Zhang C, Yu W (2019b)** Emission of primary microplastics in mainland China: invisible but not negligible. *Water Res* 162:214–224. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.06.042>.
- **Werner K, Pommer L, Brostrom M (2014)** Thermal decomposition of hemicelluloses. *J Anal Appl Pyro* 110:130–137.
- **Willén A, Junestedt C, Rodhe L, Pell M, Jönsson H (2017)** Sewage sludge as fertiliser – environmental assessment of storage and land application options. *Water Science and Technology*, 75: 1034–1050.
- **Wong JK, Lee KK, Tang KH, Yap PS (2020)** Microplastics in the freshwater and terrestrial environments: prevalence, fates, impacts and sustainable solutions. *Sci Total Environ* 719:137512. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137512>
- **Wu C-S (2005)** A comparison of the structure, thermal properties, and biodegradability of polycaprolactone/chitosan and acrylic acid grafted polycaprolactone/chitosan. *Polym* 46(1):147–155. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.11.013>.
- **Wu, X., Pan, J., Li, M., Li, Y., Bartlam, M., Wang, Y., 2019.** Selective enrichment of bacterial pathogens by microplastic biofilm. *Water Res.* 165, 114979.
- **YAJUAN J L., MATTHEW C., HODSON, BENJAMIN D H .(2006)** BMC Evolutionary Biology Research article Open Access loss of the flagellum happened only once in the fungal lineage : Phylogenetic structure of kingdom Fungi inferred from RNA polymerase II subunit genes 1471-2148-G-74.

- **Yamada-Onodera K, Mukumoto H, Katsuyaya Y, Saiganji A. et Tani Y. (2001).** Degradation of polyethylene by a fungus, *Penicillium simplicissimum* YK. *Polym. Degrad. Stab*; 72, 323-327.
- **Yu, J.R., Adingo, S., Liu, X.L., Li, X.D., Sun, J., & Zhang, X.N. (2022).** Micro plastics in soil ecosystem – A review of sources, fate, and ecological impact. *Plant, Soil and Environment*, 68(1), 1–11.
- **Zahal, N., & Zouad, N. (2003).** Activité antagoniste et capacité de biodégradation des souches de *Penicillium* et *Trichoderma* vis-à-vis des champignons phytopathogènes et des plastiques. *Mémoire de Magistère*, Université de Tlemcen, Algérie.
- **Zhang k , Hamidian A H, Tubi A, Zhang Y,James K.H. Fang, Wu C ,Paul K.S. (2021)** Understanding plastic degradation and microplastic formation in the environment .*Lam Environmental Pollution* 274 , 116554.
- **Zhang Y, Pu S, Lv X, Gao Y, Ge L (2020c)** Global trends and prospects in microplastics research: a bibliometric analysis. *J Hazard Mater* 400:123110. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123110>
- **Zubris KAV, Richards BK (2005)** Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environmental Pollution*, 138: 201–211.
- **Sites Web**
- <https://www.adelaide.edu.au/mycology/fungal-descriptions-and-antifungal-susceptibility/hyphomycetes-conidial-moulds/paecilomyces>
- <https://images.app.goo.gl/crne58uEF4xaRmB57>
- <https://maps.app.goo.gl/gNikgehmU5K77Dar7>

ANNEXES

- **Annexe 1**

Composition de milieu PDA : Potatoes Dextrose Agar.

- Poudre 21g.

- Eau distillée 500ml.

Mode d'emploi

Préparation de milieu PDA :

1- Dissolution de la poudre PDA :

Peser 21 g de poudre de milieu PDA (Potato Dextrose Agar) et la dissoudre dans 500 ml d'eau distillée. Chauffer le mélange tout en agitant jusqu'à dissolution complète.

2- Répartition du milieu :

Une fois le mélange homogène, répartir la solution dans deux flacons de 250 ml chacun.

3- Stérilisation :

Placer les flacons dans une cocotte-minute et procéder à la stérilisation à 120°C pendant 20 minutes afin d'éliminer toute contamination microbienne.

4- Acidification :

Après stérilisation et refroidissement partiel (mais avant solidification), ajouter 1 ml d'acide lactique (25%) à chaque flacon pour acidifier le milieu.

5- Coulage des boîtes de Pétri :

Une fois le milieu légèrement refroidi mais encore liquide, le verser dans deux boîtes de Pétri stériles et laisser solidifier.

- **Annexe 2**

Composition de l'eau physiologique :

- Na Cl (chlorure de sodium) : 9 g
- Eau distillé : 1 L

- **Annexe 3**

Composition de milieu Czapek :

- Na CL :2 g
- MgSo4 :0.5 g
- K Cl : 0,5 g
- KH₂PO₄ :1 g
- FeSo₄ :0,01 g

- **Annexe 4**

Le Matériel utilisés concernant les tests de biodégradation :

- Balance
- Les tubes à bouchon
- Les flacons
- Pipette pasteur
- Bécher
- Bec benzène
- Microscope optique
- Boîtes pétri
- L'anse de platine les lames
- Scotch
- Plastique (sachet blanc)
- Pince
- Agitateur magnétique (chouffant + barreau magnétique)
- Agitateur vortex
- Cocotte-minute
- Spatule
- Etuve
- Réfrigérateur
- Papier aluminium
- Loupe binoculaire

- **Les produits :**

- PDA (Potato Dextrose Agar)
- Na Cl (chlorure de sodium)

- L'eau distillée
- L'acide lactique
- Bleu de méthylène
- Mg So₄
- K cl
- Fe So₄
- K₂ Hpo₄