

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة 8 ماي 1945 قالمة

Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Sciences de la Terre et de l'Univers



Mémoire En Vue de l'Obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie
Filière : Sciences Biologiques
Spécialité/ Option : Microbiologie appliquée
Département : Ecologie et Génie de l'Environnement

Thème

Etude bibliographique du potentiel des bactéries, des moisissures et des vers pour décomposer les déchets plastiques (polyéthylène téréphtalate, (PET))

Présenté par :

- ALLOUI Mohammed Anis
- KRINAH Abderrahmen

Devant le jury composé de :

Président : Dr. BEDIQUI Soraya.....Université 8 Mai 1945 Guelma
Examineur : Dr. TORCHE Asma.....Université 8 Mai 1945 Guelma
Encadreur : Dr. BOUCHELAGHEM EL Hadi.....Université 8 Mai 1945 Guelma

Juin 2021

Table des matières

TABLE DES MATIERES	i
LISTE DES TABLEAUX	ii
LISTE DES FIGURES	iii
SIGLES ET ABREVIATIONS	iv
REMERCIEMENTS	v
DEDICACE	vi
ملخص	vii
Résumé	viii
Abstract	ix
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : EFFETS POTENTIELS DE LA POLLUTION PLASTIQUE SUR L'ENVIRONNEMENT ET LA SANTE HUMAINE	4
1.1 Caractéristiques générales	4
1.1.1 Définitions de la pollution plastique	4
1.1.2 Composition, propriétés et utilisations	4
1.1.3 Sources des déchets plastiques et de la pollution	6
1.1.3.1 Sources dans l'eau	7
1.1.3.2 Sources dans les sols	8
1.1.3.3 Sources dans l'air	9
1.1.4 Devenir dans l'environnement	10
1.1.4.1 Dégradation	11
1.1.4.1.1 Plastiques biodégradables et bioplastiques	12
1.1.4.2 Devenir dans l'eau	13
1.1.4.2.1 Le transport	13

1.1.4.2.2 Des zones d'accumulation	14
1.1.4.2.3 Sédiments.....	15
1.1.4.2.4 Impact de l'encrassement biologique sur la distribution aquatique	15
1.1.4.3 Devenir dans le sol.....	16
1.1.4.4 Devenir dans l'air	16
1.1.4.5 Présence dans les aliments et l'eau potable.....	18
1.1.4.5.1 Présence dans les aliments.....	18
1.1.4.5.2 Présence dans l'eau potable.....	20
1.1.4.6 Effets Ecotoxicologiques	22
1.1.4.7 Répercussions sur la santé humaine.....	23
1.1.4.7.1 Effets de l'exposition par voie orale.....	23
1.1.4.7.2 Effets d'une exposition par inhalation.....	24
1.1.4.7.3 Effets des biofilms.....	25
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES DES TRAVAUX REALISES DANS LE MONDE	27
2.1 Les plastiques de type PET, des polluants les plus problématiques du monde.....	27
2.1.1 Définition de Polyéthylène téréphtalate	27
2.1.2 Caractérisation de Polyéthylène téréphtalate.....	27
2.1.3 Impact sur la santé.....	28
2.1.4 Impact sur l'environnement	28
2.2 Les techniques actuelles de recyclage du PET et leurs avantages et inconvénients	28
2.2.1 Les techniques de recyclage du PET.....	28
2.2.2 Avantages et limites du recyclage des plastiques	31
2.3 Procédé de recyclage du PET par des bactéries (<i>Ideonella sakaiensis</i>)	32
2.3.1 Données scientifiques de la bactéries, <i>Ideonella sakaiensis</i>	32
2.3.2 Moyens techniques utilisés	33

2.4 Procédé de recyclage du PET par des champignons endophytes (<i>Penicillium simplicissimum</i>).....	35
2.5.1 Données scientifiques de <i>Penicillium simplicissimum</i>	35
2.4.1 Moyens techniques utilisés	36
2.5 Procédé de recyclage du PET par les vers de cire (<i>Achroia grisella</i>)	37
2.5.1 Données scientifiques d' <i>Achroia grisella</i>	37
2.5.2 Procédures expérimentales	40
2.6 Des bactéries pour fabrication du bioplastique grâce à l'espèce (<i>Pseudomonas putida</i>) ...	41
2.6.1 Données scientifiques de <i>Pseudomonas putida</i>	41
2.6.2 Procédure expérimentale	43
CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION	44
CONCLUSION ET PERSPECTIVE	50
BIBLIOGRAPHIE	51

Liste des tableaux

Tableau 1. Certaines applications des polymères	6
Tableau 2. Exemples de différents types de plastiques classés en fonction de leur origine (biosourcés ou non) et leur fin de vie (biodégradables ou non).....	13
Tableau 3. Perte de poids du polyéthylène téréphtalate autoclavé	46
Tableau 4. Perte de poids du polyéthylène téréphtalate traité aux UV	46
Tableau 5. Perte de poids du polyéthylène téréphtalate stérilisé en surface.....	46
Tableau 6. Production de PHA par isolat bactérien <i>P. putida</i>	48

Liste des figures

Figure 1 : Augmentation de la production mondiale de plastique en fonction de la croissance de la population de 1956 à 2014	4
Figure 2 : Structures moléculaires du PE, du PS et du PP et du PVC).....	5
Figure 3 : Illustration des sources des déchets dans les milieux aquatiques	8
Figure 4 : Voies de transport du plastique dans l'environnement et estimation des charges.	10
Figure 5 : Développement de microfractures à la surface du polypropylène sous l'effet d'un rayonnement ultraviolet	11
Figure 6 : Exemple de plastique secondaire	12
Figure 7 : Exemple de transport simulé des plastiques en mer, sensibilité des côtes orientales de Corse et Sardaigne aux apports du fleuve Arno en Toscane, en période estivale (A) ou hivernale (B).....	14
Figure 8 : Synthèse du polyéthylène téréphtalate	27
Figure 9 : La collecte des déchets plastiques	29
Figure 10 : le tri manuel des déchets plastiques	30
Figure 11 : La machine de broyage, lavage et séchage des déchets plastiques	30
Figure 12 : Le filtrage des déchets plastiques	30
Figure 13 : La granulation des déchets plastiques	31
Figure 14 : image microscopique d' <i>Ideonella sakaiensis</i>	33
Figure 15 : Spores de <i>Pestalotiopsis microspora</i> vues au microscope optique.....	35
Figure 16 : Une teigne de la cire adulte, <i>Achroia grisella</i> , sur un morceau de peigne à couvain	38
Figure 17 : œufs (à gauche) et un premier stade larvaire (à droite) de la petite teigne de la cire, <i>Achroia grisella</i> , des œufs et des larves de premier stade	38
Figure 18 : La pyrale de la cire au dernier stade, <i>Galleria mellonella</i> L., larve (en haut) et la petite teigne de la cire, <i>Achroia grisella</i> Fabricius, larve (en bas). Les deux espèces sont similaires en apparence, la principale différence étant la taille	39

Figure 19 : Comparaison des petites teignes femelles (à gauche) et mâles (à adroite), <i>Achroia grisella</i> . Les photos sont à la même échelle. A noter que le mâle est plus petit que la femelle	39
Figure 20 : Micrographie électronique à transmission de <i>Pseudomonas putida</i> Gram-négatif, aérobie, entérique, procaryote en bâtonnets avec flagelles polaires.....	41
Figure 21 : Evolution dans le temps (jours) de la dégradation du PET (mg) par <i>I. sakaiensis</i> à 30°C.....	45
Figure 22 : Consommation de PET (%) dans le temps	47

SIGLES ET ABREVIATIONS

BPA : Bisphénol A.

EPS : Extracellular polymeric substances.

MEB : Microscopie électronique à balayage.

MP : Microplastiques.

PC : Le polycarbonate.

PET : Le polyéthylène téréphtalate.

PE : Le polyéthylène.

PH : Potentiel D'hydrogène.

PHA : Polyhydroxy-Alcanoates.

POP : Les polluants organiques persistants.

PMMA : Poly méthacrylate de méthyle.

PLA : Polylactide.

PP : Polypropylène.

PS : Le polystyrène.

PTFE : Polytétrafluoroéthylène.

PU : Le polyuréthane.

PVC : Le polychlorure de vinyle.

UV : Le rayonnement ultraviolet.

± : Écart type.

µm : Micromètre.

∅ : Diamètre.

Remerciement

Ce travail est le fruit de la combinaison d'efforts de plusieurs personnes, nous tenons à exprimer toutes nos gratitude a dieu tout puissant, de nous avoir donné, la santé, le courage et la patience pour réaliser notre travail dans les meilleurs conditions.

Nos brefs remerciements vont en premier lieu à madame Dr. Bedioui d'avoir accepté de présider ce jury et madame Dr. Torche d'avoir accepté d'examiner ce présent travail.

Nous remercions vivement notre encadreur monsieur Dr. Bouchelaghem qui nous a fait preuve d'une grande patience et qui nous été d'une grande aide dans la réalisation de ce travail ces conseils ces orientation et son encouragement ainsi que son soutien scientifique nous ont permis de mener a bien la réalisation de ce travail.

Nous ne serons pas comment remercier nos familles qui nous ont aidés et qui étaient toujours patients et compréhensifs envers nous.

Ils ont sus nous mettre sur rails et nous encourager d'avantage.

Encore une fois mille mercis.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents pour leur sacrifice qu'ils consenti à mon
égard pendant tout la durée de mes études.*

A mes frères et mes sœurs.

A tous mes cousins et mes cousines, mes oncles et mes tantes.

A toute ma famille et mes amis (es).

A toute ma promotion.

Abderrahmen et Anis

ملخص – وفقاً لدراسة نشرتها Science Advances، يولد النشاط البشري 8.3 مليار طن من البلاستيك، بما في ذلك 6.3 مليار طن من النفايات التي غالباً ما تستغرق عقوداً أو قروناً لتتحلل. تكشف هذه الدراسة أنه في عام 2015، تم إنتاج 400 مليون طن من البلاستيك في جميع أنحاء العالم. حتى الآن، يتم إعادة تدوير 9٪ فقط من نفايات البلاستيك، وحرق 12٪، وإطلاق 79٪ في الطبيعة. في بلدان شمال إفريقيا، لوحظ هذا التلوث بشكل خاص من خلال الأكياس البلاستيكية وزجاجات تعبئة المشروبات (المشروبات الغازية وعصير الفاكهة والمياه المعدنية، إلخ). إن عواقب انتشار هذه النفايات في الطبيعة كارثية. كما أنها تسبب خسارة كبيرة في التنوع البيولوجي. تُركت في المزاريب، وهي السبب الرئيسي للفيضانات في المناطق الحضرية بعد هطول الأمطار الغزيرة في المدن. تقلل المواد البلاستيكية المدفونة في التربة من قدرتها الإنتاجية وتزيد من انعدام الأمن الغذائي سوءاً. حالياً، 1٪ فقط من نسبة البلاستيك قابلة للتحلل. تم تطوير تقنيات معالجة مختلفة للتعامل مع هذا التلوث. هذه عمليات فيزيائية أو كيميائية بشكل أساسي. في الأونة الأخيرة، ظهرت تقنيات المعالجة الحيوية وتعتبر اليوم بديلاً حقيقياً للتقنيات التقليدية. ومع ذلك، يستمر التقدم في تكنولوجيا التحلل البيولوجي في التطور ويساهم في امتصاص هذه النفايات. كل هذه الدراسات حاسمة على مستوى المختبر. بعد التجارب الناجحة، يجب أن تكون العملية صناعية. يعمل العلماء الآن على التحلل البيولوجي على نطاق واسع لتصنيع هذا التحلل من البلاستيك. يمكننا أن نفترض أنه فقط في بداية التلف البيولوجي.

الكلمات المفتاحية: نفايات بلاستيكية، تحلل حيوي، تلوث، بكتيريا، عفن، دودة الشمع.

RESUME – D’après une étude publiée par *Sciences Advances*, l’activité humaine génère 8,3 milliards de tonnes de matières plastiques, dont 6,3 milliards de tonnes de déchets qui mettent souvent plusieurs décennies ou siècles pour se dégrader. Cette étude révèle qu’en 2015, 400 millions de tonnes de plastiques ont été produites dans le monde. A ce jour, 9% seulement de déchets plastiques sont recyclés, 12% incinérés, et 79% rejetés dans la nature. Dans les pays d’Afrique du nord, cette pollution s’observe en particulier à travers les sachets en plastique et les bouteilles de conditionnement de boissons (sodas, jus de fruit, eau minérale, ...). Les conséquences de la propagation de ces déchets dans la nature sont catastrophiques. Ils entraînent également une perte importante de la biodiversité. Abandonnés dans les caniveaux, ils sont la cause principale des inondations en milieu urbain après de fortes précipitations dans les villes. Enfouis dans les sols, les matières plastiques réduisent la capacité de productivité de ceux-ci et aggravent l’insécurité alimentaire. Actuellement, seulement 1 % de la proportion des matières plastiques sont biodégradables. Diverses technologies de traitement ont été développées pour faire face à ces pollutions. Ce sont principalement des procédés physiques ou chimiques. Plus récemment, les techniques de bio remédiation sont apparues et sont aujourd’hui considérées comme une réelle alternative aux techniques classiques. Toutefois, les progrès de la technologie concernant la biodégradation ne cesse d’évoluer et contribue à la résorption ces déchets. Toutes ces études sont concluantes au niveau des laboratoires. Après les essais probants, il faut industrialiser le processus. Les scientifiques travaillent maintenant sur la biodégradation à grande échelle pour industrialiser cette dégradation du plastique. Nous pouvons émettre l’hypothèse qu’il n’est qu’au début de la bio-détérioration.

Mots-clés : déchets plastiques, biodégradation, pollution, bactéries, moisissures, vers de cire.

ABSTRACT – According to a study published by *Sciences Advances*, human activity generates 8.3 billion tonnes of plastics, including 6.3 billion tonnes of waste that often takes decades or centuries to degrade. This study reveals that in 2015, 400 million tonnes of plastics were produced worldwide. To date, only 9% of plastic waste is recycled, 12% incinerated, and 79% released into nature. In the countries of North Africa, this pollution is observed in particular through plastic bags and beverage packaging bottles (sodas, fruit juice, mineral water, etc.). The consequences of the spread of this waste in nature are catastrophic. They also cause a significant loss of biodiversity. Abandoned in the gutters, they are the main cause of flooding in urban areas after heavy rainfall in cities. Buried in soils, plastics reduce their productivity capacity and worsen food insecurity. Currently, only 1% of the proportion of plastics are biodegradable. Various treatment technologies have been developed to deal with this pollution. These are mainly physical or chemical processes. More recently, bio-remediation techniques have appeared and are today considered a real alternative to traditional techniques. However, advances in biodegradation technology continue to evolve and contribute to the absorption of this waste. All these studies are conclusive at the laboratory level. After successful trials, the process must be industrialized. Scientists are now working on large-scale biodegradation to industrialize this degradation of plastic. We can hypothesize that it is only at the onset of bio-deterioration.

Keywords: plastic waste, biodegradation, pollution, bacteria, mold, waxworms.

INTRODUCTION GENERALE



INTRODUCTION GENERALE

1. Présentation du thème

La contamination du plastique est un problème de classe mondiale. A la fois parce que c'est un drame environnemental qui s'aggrave sans cesse et parce qu'il est si compliqué à résoudre. La pollution par les déchets plastiques touche tous les océans, y compris les zones polaires. Il existe néanmoins des zones d'accumulation créées par des courants marins appelés gyres océaniques. La plus connue est la zone d'accumulation dans le gyre du Pacifique Nord (« 7ème continent de plastique » ou « grande zone d'ordure du Pacifique »), mais cet exemple n'est pas un cas isolé. Les modèles de circulations océaniques suggèrent des zones d'accumulations dans quatre autres gyres (Pacifique Sud, Atlantique Nord, Atlantique Sud et Océan Indien). La Méditerranée est également très polluée par les plastiques du fait de son caractère de mer semi-fermée, avec un taux de renouvellement des eaux de 90 ans alors que la persistance des plastiques est supérieure à 100 ans. La présence de ces matériaux synthétiques dans le milieu naturel est relativement récente, puisque l'essor de l'industrie du plastique date des années 1970. Les débris plastiques retrouvés à la surface de l'eau sont dominés par les particules de taille inférieure à 5mm, communément appelées des microplastiques. Les microplastiques sont issus de la fragmentation des plastiques et sont également dispersés dans tous les océans. Les bactéries colonisent tous les déchets plastiques, quelle que soit leur taille – des macro-déchets aux microplastiques. Et ils sont nombreux ! Des bactéries pathogènes, notamment celles du genre *Vibrio* pourraient entraîner des maladies chez l'homme et les espèces aquatiques. Quels risques fait peser cette plastisphère ? Dans l'eau, une faune diverse de bactéries et d'autres micro-organismes colonise les plastiques. Ces petits organismes vivant sur le plastique constituent la plastisphère. Les chercheurs s'intéressent tout particulièrement aux bactéries du genre «vibrio» présentes dans l'océan. Leur version la plus connue est vectrice du choléra et d'autres maladies gastro-intestinales chez l'homme. Elles peuvent aussi s'attaquer au système digestif des poissons.

2. Problématique

La bactérie nommée *Ideonella sakaiensis* 201-F6 s'est révélée capable de dégrader et assimiler le polytéréphtalate d'éthylène. Les scientifiques japonais ont découvert son appétit pour le PET ou polyéthylène téréphtalate, le plastique le plus abondant. La découverte a été publiée dans Science en 2016, soulignant l'importance de pouvoir utiliser les bactéries dans des installations spéciales de recyclage des bouteilles et autres récipients en PET pour métaboliser et dégrader enzymatiquement le plastique.

Au début du printemps 2020, des chercheurs ont découvert à Leipzig en Allemagne, dans un centre de tri de déchets justement, une nouvelle bactérie qui se nourrit de polyuréthane. Cette bactérie, dite extrémophile car capable de survivre dans des conditions extrêmes et des milieux où la plupart des autres organismes périssent, a réussi à se développer lors de tests en laboratoires.

Des souches de *Pseudomonas* ont pu être cultivées dans des solutions contenant du 2,4-TDA, un précurseur utilisé pour produire du polyéthylène téréphtalate et classé « cancérigène, mutagène ou toxique pour la reproduction » par l'Agence Européenne des produits chimiques. Résultat : les bactéries se développaient et la concentration de 2,4-TDA diminuait.

La découverte d'une inhabituelle capacité de certains vers connus sous le nom de vers de cire, utilisés comme appâts par les pêcheurs. *Federica Bertotochini*, scientifique à l'Institut de biomédecine et de biotechnologie de Cantabrie, a découvert par hasard que les vers avaient réussi à s'échapper de leurs sacs en y faisant des trous grâce à un appétit vorace pour le plastique. En quelques heures seulement, une bonne partie du plastique avait disparu, spécifiquement du polyéthylène (PET), trouvant dans les sacs de l'éthylène glycol, le principal composé de l'antigel. La conclusion était donc évidente : les vers avaient dégradé le polyéthylène de manière écologique, sans avoir à attendre des centaines d'années pour sa biodégradation. Le résultat est la conversion du PET en deux substances écologiques. Plus précisément, en « monomères sans danger pour l'environnement, acide téréphtalique et éthylène glycol ».

Cette découverte ne mettra pas fin au problème des déchets plastiques en utilisant des vers, bien que l'on cherche des moyens de synthétiser les enzymes utilisées par ces animaux afin de trouver des utilisations pratiques. En d'autres termes, ils seraient produits à grande échelle.

En effet, le champignon peut décomposer le plastique. En 2008, des scientifiques américains ont découvert que le champignon *Penicillium simplicissimum* est capable de décomposer le polyéthylène téréphtalate. Il n'avait même pas besoin d'oxygène pour cela, ce qui le rendait très utile pour les décharges, entre autres.

3. Objectifs de l'étude

La dégradation des plastiques conventionnels en mer est un processus très lent (>100 ans) qui conduit à leur accumulation dans les océans. Par exemple, on estime que la concentration de

microplastiques en Méditerranée augmentera de 8% dans les 30 prochaines années. Ce travail *met l'accent* sur les progrès et les défis de la recherche qui pour l'instant donnent beaucoup de joie aux scientifiques, car les résultats des tests sont encourageants. Si elle devait se traduire en solutions concrètes, ce serait aussi une excellente nouvelle pour la planète et, bien sûr, pour nous. Le risque majeur avec ces mini-découvertes, est de croire à une solution miracle et ne plus rien faire (ou pas assez) pour arrêter de polluer.

Comprendre ce qu'est un plastique biodégradable, l'intérêt d'y recourir et identifier les facteurs qui contribuent à la biodégradation. De nombreux paramètres du milieu et du matériau influencent la biodégradabilité d'un polymère. Citons la température, l'oxygène, les UV, la nature et la quantité des microorganismes, l'humidité, le pH... Ajoutons la turbulence, la composition chimique du matériau, les propriétés de surface, sa rugosité, sa cristallinité... Et enfin les propriétés thermiques, la surface spécifique du matériau, sa forme et son épaisseur. Lumière sur ces matériaux.

CHAPITRE 1

**EFFETS POTENTIELS DE LA POLLUTION
PLASTIQUE SUR L'ENVIRONNEMENT ET LA
SANTÉ HUMAINE**



1.1 Caractéristiques générales

1.1.1 Définition de la pollution plastique

Les plastiques sont considérés comme l'un des principaux polluants parmi ceux qui sont rejetés dans l'environnement. Ils jouent un rôle essentiel dans la vie humaine car ils sont économiques et polyvalents. Les plastiques sont connus pour être un mélange de nombreux composants chimiques et sont utilisés pour diverses applications domestiques. Entre 1950 et 2015, la production mondiale de matières plastiques hors fibres plastiques est passée de 1,5 MT à 322 MT (Figure 1). Malgré leurs nombreuses applications utiles, les plastiques mettent beaucoup de temps à se dégrader [1].

Les déchets plastiques, ou pollution plastique, sont "l'accumulation d'objets en plastique (par exemple, des bouteilles en plastique et bien d'autres choses encore) dans l'environnement de la Terre, qui a des effets néfastes sur la faune, l'habitat de la faune et l'homme" [2].

Les déchets plastiques sont considérés être des plastiques qui font partie d'un flux de déchets (p. ex. enfouis, recyclés ou incinérés), alors que la pollution plastique renvoie au plastique rejeté, éliminé ou abandonné dans l'environnement qui ne fait pas partie d'un flux de gestion de déchets [3].

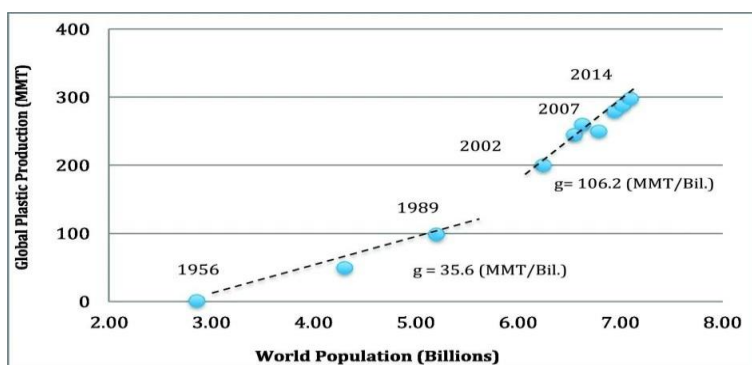


Figure 1 : Augmentation de la production mondiale de plastique en fonction de la croissance de la population de 1956 à 2014 [4].

1.1.2 Composition, propriétés et utilisations

Le concept de « polymère » étant lié de très près à celui de « matière plastique », certains auteurs renvoient directement la définition de « matière plastique » à ce concept [5]. Les matières plastiques sont faites de polymères. Puisque la plupart des matières plastiques sont constituées d'un seul type de polymère (Figure 2), par exemple : le polyéthylène (PE), le terme « polymère » est généralement employé par extension pour désigner celles-ci. Un polymère est un assemblage de plusieurs monomères, des molécules de base chimiquement liées en une macromolécule [6].

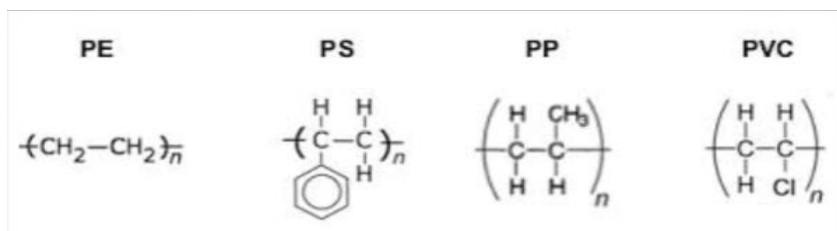


Figure 2 : Structures moléculaires du PE, du PS et du PP et du PVC [7].

La polymérisation (la synthèse des polymères) peut être réalisée grâce à deux procédés principaux : la polymérisation en chaîne et la polymérisation par étapes. Le procédé utilisé pour la synthèse du polymère influence grandement ses propriétés physiques. Parmi les structures de polymère courantes, citons le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS) et le polychlorure de vinyle (PVC), et les polymères obtenus par étapes comprennent les nylons, le polyéthylène téréphtalate (PET), le polycarbonate (PC) et le polyuréthane (PU). Ces polymères constituent la majeure partie des formes les plus courantes de matière plastique généralement présentes dans l'environnement comme contaminants [8].

Les propriétés physiques d'une matière plastique, comme sa rigidité, sa souplesse et son élasticité, dépendent de la distribution des masses moléculaires du polymère et de l'organisation des chaînes polymères [9]. Généralement, les polymères de masse moléculaire élevée ayant une organisation de chaînes complexe présentent des liaisons covalentes fortes entre les chaînes et forment un plastique rigide ayant un point de fusion élevé. À l'opposé, les polymères à organisation linéaire et de masse moléculaire faible sont plus souples et ont un point de fusion faible. En combinant différentes distributions des masses moléculaires, organisations des chaînes polymères et/ou mélanges de polymères, on obtient des matériaux efficaces adaptés à l'utilisation prévue [10].

La majorité des produits en plastique sont utilisés dans les secteurs de l'emballage et de la construction. Les autres grands secteurs sont ceux de l'automobile, de l'équipement électrique et électronique, des textiles et de l'agriculture. Nous donnons dans le tableau 1 des exemples d'utilisations de divers polymères [8].

Tableau 1. Certaines applications des polymères [8].

Acronyme	Nom	Principales applications
PP	Polypropylène	Emballage rigide, semi-rigide et souple Automobile Articles ménagers Isolation électrique
PE	Polyéthylène	Emballage rigide, semi-rigide et souple Pellicule pour l'agriculture Articles ménagers Isolation électrique Construction Produits personnels
PS	Polystyrène	Emballage Mousses
PMMA	Poly (méthacrylate de méthyle)	Application transparentes pour l'automobile et la construction Dispositifs médicaux Electronique
PC	Polycarbonate	Application transparentes pour l'automobile et la construction Dispositifs médicaux Electronique
PLA	Poly lactide	Emballage rigide, semi-rigide et souple
PET	Polyéthylène téréphtalate	Emballage rigide, semi-rigide et souple Fibres textiles synthétiques
PVC	Polychlorure	Feuilles et tissus enduits Construction Isolation électrique
PTFE	Polytétrafluoroéthylène	Pièces techniques Revêtements antiadhésifs

1.1.3 Sources des déchets plastiques et de la pollution

Six principaux types de plastiques dominent les marchés d'aujourd'hui : le polyéthylène (PE, faible densité), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC), le polystyrène (PS, et EPS expansé), le polyuréthane (PUR) et le polyéthylène téréphtalate (PET) [11]. La durabilité des matières plastiques est à la fois leur principal avantage et la propriété la plus dévastatrice une fois qu'ils sont rejetés en mer. Le plastique se dégrade très lentement, la production croissante de ces polymères conduit à des quantités toujours plus importantes de déchets plastiques dans

l'environnement, ce déchet continu à se frayer un chemin et à s'accumuler dans les océans du monde, où sa dissolution prend des centaines d'années [12].

La pollution plastique rejoint l'océan par une multitude de canaux. Les particules infimes se déversent dans les cours d'eau sous forme de microbilles, les mêmes que celles que l'on retrouve dans les exfoliants pour le visage et d'autres produits cosmétiques, ou sous forme de fibres de polymère, utilisées dans les vêtements. Les autres sources de ce type de pollution sont les sites de traitement industriel et les rejets par les navires [13].

1.1.3.1 Sources dans l'eau

Il est évident que les plastiques et microplastiques arrivent dans l'environnement à toutes les étapes du cycle de vie des polymères. En mer, ils sont principalement issus d'apports continentaux qui incluent les fleuves et rivières, les effluents de traitement des eaux et leurs surverses (Figure 3), des activités littorales de loisir, des décharges illégales littorales ou proches des fleuves, et le ruissèlement [14].

Même avec l'amélioration des taux d'élimination des déchets et de recyclage, une fraction significative de ces plus de 280 millions de tonnes de polymères synthétiques vont s'échapper, être emportées dans les cours d'eau, et finir dans les océans. En outre, il y a des particules de plastique dans certaines applications, notamment les cosmétiques et les fluides de sablage, qui se retrouvent dans les eaux usées par défaut et ne sont pas et ne parviennent pas à être éliminées dans les stations d'épuration.

Ensuite, il y a les articles en plastique utilisés en mer, comme les bouées et le matériel de pêche, qui peuvent se briser avec le temps et libérer des fragments dans l'eau [15]. Enfin, des événements tels que les tempêtes, les marées les inondations dues aux marées et les accidents de navigation peuvent injecter de grandes quantités de matières plastiques dans les océans en une seule fois.

De toutes ces sources terrestres et sources terrestres et maritimes, les déchets plastiques dans les océans du monde entier. Dans une récente simulation, Marcus Eriksen du Five Gyres Institute à Los Angeles, USA, et des collègues du monde entier du monde entier ont estimé qu'il y a actuellement 5,25 trillions d'articles en plastique pesant plus de 268 000 tonnes flottant dans les océans [16].

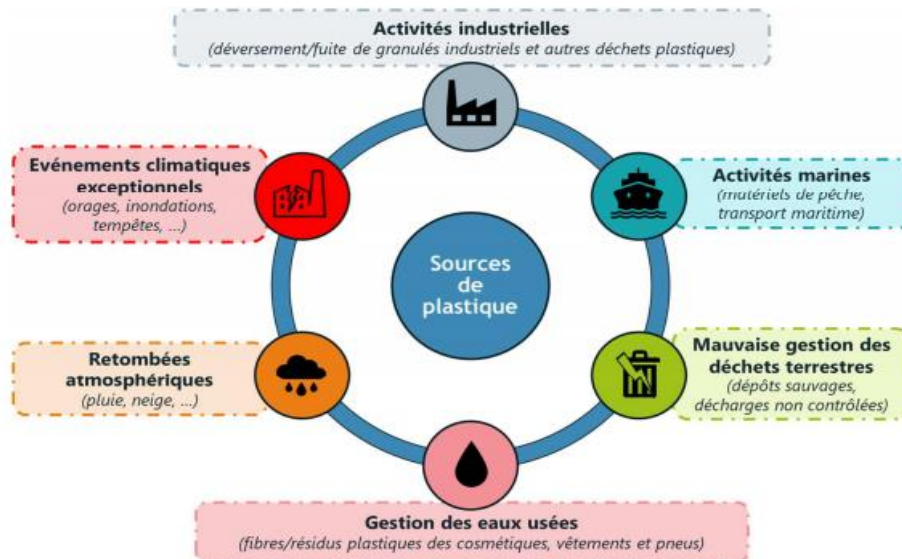


Figure 3 : Illustration des sources des déchets dans les milieux aquatiques [17].

1.1.3.2 Sources dans les sols

Étant donné que la grande majorité des plastiques sont fabriqués, utilisés et jetés sur terre, on sait que les déchets plastiques peuvent s'accumuler dans les systèmes terrestres. Les macroplastiques sont généralement concentrés dans les régions à forte densité de population ou aux points de convergence de l'activité anthropique (p. ex. densité de population ou les points de convergence de l'activité anthropique (par ex, environnements urbains ou bords de route), ainsi qu'à proximité des sites de traitement des déchets [18].

Dans les zones rurales, l'utilisation et l'élimination des plastiques sont susceptibles d'être dominées par les pratiques agricoles ("plasticulture").

Cela inclut l'utilisation de films plastiques dans les serres, pour emballer les balles de foin, ainsi que dans et sur les sols comme paillage plastique, et sur les sols comme paillage plastique pour les cultures [19].

Les plastiques durs sont également utilisés comme emballages de plusieurs produits agricoles, ce qui peut contribuer aux déchets macroplastiques en raison d'une gestion inadéquate des déchets. En outre, les plastiques agricoles peuvent contribuer à la production de très petites particules plastiques, notamment les nanotechnologies agricoles et la dégradation des enrobages polymères des semences [20].

Processus anthropiques liés à la réutilisation et à l'élimination des déchets ont pour effet de déplacer des particules de plastique et d'initier leur rejet dans l'environnement. Par exemple, l'application de boues d'épuration comme conditionneur de sol ou engrais sur les sols agricoles entraîne la libération de petites particules de plastique présentes dans les boues.

Des études ont montré que les boues d'épuration contiennent des microplastiques à des concentrations significativement plus élevées que les concentrations de fond des sols sur lesquels elles sont appliquées, ces sols pouvant retenir les microplastiques jusqu'à 15 ans [21].

Très peu d'études ont jusqu'à présent étudié la présence de plastique sur terre. En milieu urbain, des recherches ont documenté le piégeage des déchets plastiques dans les canalisations urbaines et la présence de microplastiques dans les poussières urbaines. Un petit nombre d'études ont commencé à étudier la présence de petits (més-, micro-) plastiques dans les sols, à la fois en milieu agricole et alluvial [22].

1.1.3.3 Sources dans l'air

L'incinération des déchets plastiques en plein champ est une source majeure de pollution de l'air, la plupart du temps, les déchets solides municipaux contenant environ 12% de plastiques sont brûlés, libérant des gaz toxiques comme les dioxines, les furanes, le mercure et les biphényles polychlorés dans l'atmosphère. De plus, la combustion du polychlorure de vinyle libère des halogènes dangereux et pollue l'air, dont l'impact est le changement climatique. Les substances toxiques ainsi libérées constituent une menace pour la végétation, la santé humaine et animale et l'environnement dans son ensemble [23].

Les rejets de particules liés au trafic routier, dus à l'usure des pneus, peuvent représenter une importante source de microplastiques dans l'air extérieur. La dispersion de ces particules dans l'air et leur dépôt peuvent conduire à une importante accumulation de microplastiques dans l'eau. Parmi les autres sources de microplastiques dans l'air extérieur, on compte les pneus des aéronefs, le gazon artificiel, l'usure des freins, le traçage des marques en thermoplastique sur la chaussée, la construction, les sites d'enfouissement, les émissions industrielles et l'air évacué des sècheuses à tambour. Toutefois, leur contribution relative n'a pas encore été bien établie [24].

On croit que la principale source de microplastiques dans l'air intérieur est la perte de fibres textiles polymères par les vêtements, les meubles, les tapis et des biens domestiques, due à leur usure ou leur abrasion. Par exemple, il a été montré que le lavage des vêtements en matériaux synthétiques entraîne un rejet de microplastiques dans les eaux usées, et on présume que le séchage à l'air ou au moyen d'une sècheuse à tambour de ces vêtements causerait aussi le transfert de fragments dans l'air intérieur, la poussière domestique ou la charpie de sècheuse [25].

Des fibres textiles synthétiques ont aussi été détectées sur une variété de surfaces, dont des surfaces à l'extérieur, ce qui laisser penser que les vêtements et d'autres tissus sont peut-être d'autres sources de microplastiques présents dans l'air intérieur ou extérieur [24].

1.1.4.1 Dégradation

Tout plastique soumis aux conditions naturelles finit par se dégrader naturellement. Le rayonnement solaire joue un rôle important dans la fragmentation des débris plastiques. Les rayons infrarouges chauffent les plastiques favorisant ainsi leur dégradation. Ce phénomène peut être amplifié au niveau des plages sableuses où le plastique peut atteindre des températures supérieures à 40 °C en été. Les rayons UV jouent également un rôle très important en favorisant la photo-oxydation de la surface du plastique [30].

Ce processus entraîne le développement de processus auto-oxydatifs qui accélèrent encore le vieillissement du plastique. Au contraire, les températures plus basses des mers ou le développement d'organismes à la surface des plastiques peuvent constituer des protections pour les plastiques. Il en va de même pour les plastiques déposés sur les fonds marins que les UV n'atteignent pas et où, de basses températures et de faibles teneurs en oxygène ralentissent encore la dégradation.

À ces facteurs externes, il est possible d'ajouter des facteurs internes, propres à la particule de plastique. Ainsi, la masse molaire, la cristallinité ou encore la présence d'additifs peuvent ralentir ou au contraire accélérer la fragmentation des plastiques. Ainsi, les stabilisants permettent par exemple de capter les radicaux libres à l'origine des processus auto-oxydatifs. Au contraire, dans le cas des plastiques dits oxodégradables, différents additifs peuvent être ajoutés pour favoriser la fragmentation d'un sac plastique ou de films en polyéthylène. Lorsqu'un plastique se dégrade, de nombreuses microfractures peuvent se former à sa surface (Figure 5) [31].

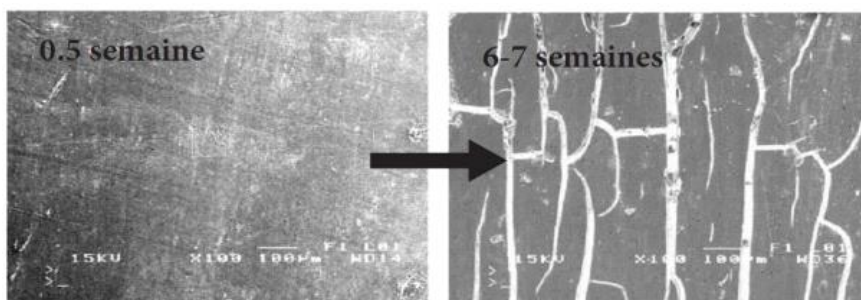


Figure 5 : Développement de microfractures à la surface du polypropylène sous l'effet d'un rayonnement ultraviolet [32].

Ces micro fractures constituent des zones de faiblesse dans le plastique et peuvent être amplifiées sous l'action des changements de température, de l'humidité ou encore de l'abrasion du sable [30]. À terme, des microplastiques se formeront à partir des micro fractures du plastique (Figure 6). Ce processus peut cependant être ralenti pour les plastiques dérivant à la surface de la mer par exemple du fait de la protection que peut offrir le biofouling [30]. Les peintures de bateau sont un exemple intéressant de plastiques soumis à des contraintes environnementales importantes.

Ce type de microplastiques est parfois rencontré dans les sédiments ou à la surface des mers. D'autres peintures soumises à des conditions difficiles, telles que les peintures de marquage au sol peuvent également être observées sous forme de microplastiques [31].



Figure 6 : Exemple de plastique secondaire [33].

Il est à noter que l'exposition importante au soleil, les variations de marée, les contraintes mécaniques et l'abrasion auxquels sont soumis les plastiques sur les plages font de ces environnements, des espaces très favorables à l'observation de microplastiques secondaires. Si les contraintes environnementales peuvent générer des microplastiques, les contraintes mécaniques exercées sur les matériaux lors de leur usage peuvent également engendrer des microplastiques [31].

1.1.4.1.1 Plastiques biodégradables et bioplastiques

Les plastiques biodégradables et les bioplastiques ont été suggérés parmi les solutions de rechange visant à réduire le fardeau environnemental des plastiques conventionnels. Les plastiques biodégradables peuvent provenir du pétrole ou de ressources biologiques, tandis que les bioplastiques s'entendent de polymères dérivés de la biomasse [34].

Les plastiques biosourcés, fabriqués à partir de ressources biologiques renouvelables – le plus souvent végétales – ne sont pas biodégradables, c'est-à-dire assimilables par les micro-organismes (voir exemples dans le tableau ci-dessous). Et inversement, certains plastiques issus de la pétrochimie (donc non biosourcés) sont biodégradables. Enfin, une troisième catégorie de plastiques cumule les deux propriétés et sont à la fois biosourcés et biodégradables, comme les polymères à base de fécule de pommes de terre, d'amidon ou de cellulose, le PLA (acide polylactique), les PHA (polyhydroxy-alcanoates) ou le bio-PBS ce sont bien sûr les plus intéressants.

Les « bioplastiques » regroupent donc un grand nombre de matériaux qui sont soit biosourcés, soit biodégradables, soit les deux. C'est pour cette raison que le terme de « bioplastique » ne peut se suffire à lui-même et qu'il convient de préciser, à chaque fois que l'on utilise ce mot,

quelle est l'origine (biosourcé ou non) et la fin de vie (biodégradable ou non) du plastique [35].

Tableau 2. Exemples de différents types de plastiques classés en fonction de leur origine (biosourcés ou non) et leur fin de vie (biodégradables ou non) [35].

Origine / Fin de vie	Issus de la biomasse (biosourcés)	Issus de la pétrochimie (non biosourcés)
Biodégradable	<ul style="list-style-type: none"> - polymères à base de fécule de pommes de terre, d'amidon ou de cellulose - PHA (polyhydroxy-alcanoates) - PLA (acide polylactique) - bio-PBS (poly(butylène succinate)) 	<ul style="list-style-type: none"> - PCL (polycaprolactone) - PBAT (polybutylène adipate-co-téréphtalate) - PBS (polybutylène succinate) - copolymères
Non biodégradable	<ul style="list-style-type: none"> - bio-PE (bio-polyéthylène) - bio-PET (bio-téréphtalate d'éthylène) - bio-PTT (bio-polytéréphtalate de triméthylène) - Polyamide (PA) et polyuréthanes (PUR) biosourcés 	<ul style="list-style-type: none"> - PE (polyéthylène) - PET (téréphtalate d'éthylène) - PS (polystyrène) - PP (polypropylène) - PVC (polychlorure de vinyle) - PA (polyamide) et PUR (polyuréthanes)

1.1.4.2 Devenir dans l'eau

1.1.4.2.1 Le transport

La circulation océanique générale est connue de longue date et soumise à un certain nombre de forces (force de Coriolis, circulation atmosphérique, régime météorologique, etc.). Ces forces régissent les déplacements des masses d'eau avec des courants océaniques de grande amplitude et de faible vitesse, les courants géostrophiques, qui influencent la distribution de ces petites particules flottantes qui vont ainsi être transportées sur de très longues distances. Par exemple, en Atlantique Nord Est, les déchets du golfe de Gascogne d'Espagne et du Portugal sont repris par la circulation générale et déplacés vers le Sud-Ouest où ils sont repris par la circulation équatoriale, les transportant vers l'ouest où ils s'accumulent dans le gyre nord atlantique [36].

Dans les mers régionales, les mécanismes d'accumulation sont plus complexes, souvent en raison de l'interférence de plusieurs courants, y compris des eaux fluviales. Les schémas de circulation et les modèles permettent de comprendre les phénomènes locaux ou régionaux d'accumulation et d'identifier les sources. En Manche et en Mer du Nord par exemple, une grande partie des déchets plastiques sont transportés le long de la Norvège vers les eaux arctiques et une

partie entre dans la mer Baltique.

Dans le bassin Nord-Ouest de la Méditerranée, la circulation est à l'inverse des aiguilles d'une montre avec un transport transfrontalier marqué entre les différents pays riverains. L'exemple de la circulation hivernale en mer tyrrhénienne (Figure 7) démontre clairement l'influence des fleuves côtiers, qui se mêlent à la circulation générale résiduelle [37].

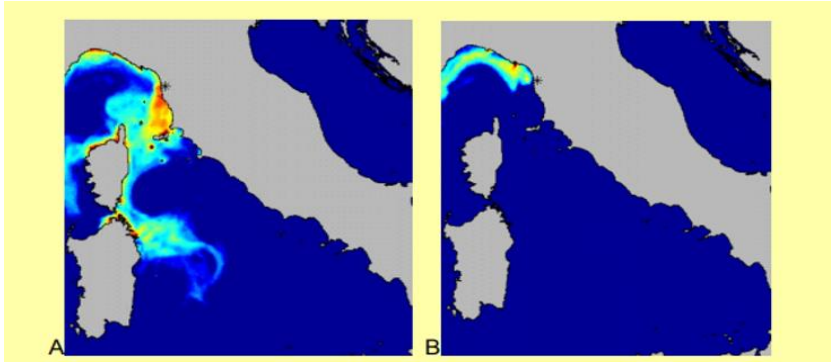


Figure 7 : Exemple de transport simulé des plastiques en mer, sensibilité des côtes orientales de Corse et Sardaigne aux apports du fleuve Arno en Toscane, en période estivale (A) ou hivernale (B) [37].

1.1.4.2.2 Des zones d'accumulation

A la côte, l'existence de zones de très fortes concentrations en plastiques est fréquente et liée à la fréquentation des sites, localement, et à des facteurs hydrodynamiques favorisant l'accumulation. Ainsi, certaines régions d'Europe, comme le pays Basque ou la Sicile sont particulièrement exposées, impliquant des mesures de gestion appropriées pour préserver la valeur patrimoniale des sites. Liées directement aux courants océaniques, de larges zones de concentration de déchets, ont été identifiées à la surface des mers et océans, dénommées parfois à tort « îles flottantes » ou « continents de déchets » dont le plus connu a été nommé « 7ème continent ». Il s'agit en réalité de zones de plus fortes densités de plastiques, situées dans les régions centrales océaniques, où les courants sont plus faibles et convergents. En réalité, Il y a au moins une zone de convergence pour chacun des cinq bassins océaniques que sont l'Atlantique Nord et Sud, le Pacifique Nord et Sud et l'océan Indien [38].

Les concentrations y atteignent des moyennes de plusieurs centaines de milliers de particules mais restent en deçà des concentrations extrêmes trouvées dans certaines zones côtières comme en Méditerranée. En Méditerranée quelques zones d'accumulation temporaire en surface (Est Baléares, Sud-Adriatique, Nord Tyrrhénienne, Sud est Egée par exemple) sont connues et les modèles montrent des échouages préférentiels dans la partie orientale du bassin [38]. Très localement, les zones d'accumulation sont soumises à des facteurs locaux comme le vent, la houle, les courants locaux et les activités humaines.

Sur les fonds, des zones d'accumulation ou de fortes densités ont été identifiées dans tous les océans du monde, à l'exception des eaux antarctiques et parfois à de très grandes profondeurs, y compris au-delà du cercle polaire Arctique. Là, leur dégradation est ralentie à cause de l'absence de lumière et de faibles concentrations en oxygène et leurs effets, largement décrits pour les espèces de surface, sont totalement méconnus.

En zone côtière, les plastiques les plus lourds sont canalisés par les canyons vers les plus grandes profondeurs où ils peuvent s'accumuler en raison de plus faibles turbulences et de courants plus faibles [39].

1.1.4.2.3 Sédiments

Il faut attendre une trentaine d'années pour que soit mise en évidence la présence de microplastiques dans les sédiments, et une dizaine d'années supplémentaires pour mettre en évidence que les microplastiques sont présents jusque dans les sédiments d'eau profonde : 1100 à 5000 m [40]. Les microplastiques sont présents partout, ils ont été détectés dans la colonne d'eau, dans les sédiments, dans les plages du monde entier et dans le biote.

Les particules plastiques de faible densité ont tendance à flotter à la surface de la mer ou dans la colonne d'eau alors que les microplastiques ayant une densité qui dépasse celle de l'eau de mer vont sombrer et s'accumuler dans les sédiments. Cependant, avec la modification de densité due au biofouling, même les plastiques de faible densité peuvent atteindre les fonds marins. Des microplastiques de types similaires ont été retrouvés dans la colonne d'eau et dans les sédiments [41].

L'agrégation des microplastiques avec la matière organique est considérée comme la principale voie de transport des microplastiques vers les sédiments d'eau profonde. Les sédiments constitueraient ainsi un réservoir majeur pour les microplastiques [40].

1.1.4.2.4 Impact de l'encrassement biologique sur la distribution aquatique

L'encrassement biologique, aussi connu sous le nom de formation de biofilm, s'entend de l'enrobage des plastiques par des micro-organismes, des algues ou des plantes. Ce processus peut entraîner une perte de flottabilité et ainsi favoriser la descente des microplastiques au fond du plan d'eau. On a émis l'hypothèse que les agrégats de phytoplancton agissent comme des puits potentiels pour les microplastiques, ont constaté que la vitesse de descente des particules de PS augmentait de 16 % dans les eaux estuariennes et de 81 % dans les eaux marines après une période d'incubation de six semaines, qui permettait aux particules de s'enrober de biofilm. La descente des particules de PE n'a subi aucun des effets de l'encrassement biologique pendant 14 semaines d'incubation dans les eaux estuariennes, mais dans les eaux côtières, leur vitesse de descente a augmenté après six semaines. Ces résultats indiquent que l'encrassement biologique peut

augmenter le dépôt de plastiques dans les sédiments et les fonds marins. De plus, ont indiqué que la formation de biofilms sur les plastiques diminue leur transmittance des rayons UV, ce qui pourrait également inhiber la dégradation des plastiques dans l'environnement [42].

1.1.4.3 Devenir dans le sol

Il est prouvé que les plastiques sont nocifs pour la santé humaine, animale et végétale. Les plastiques nuisent également aux habitats sous forme de pollution, d'utilisation de l'espace, de contamination et surtout par leur qualité de persistance [43]. Les composés chimiques présents dans les plastiques sont nocifs et ont des effets biologiques sur les humains et les animaux. Deux grandes classes de produits chimiques liés au plastique sont très préoccupantes pour la santé humaine : le bisphénol-A ou BPA, et les phtalates [44].

Les déchets plastiques prennent également une grande place dans l'environnement du sol et sont donc inesthétiques pour l'utilisation, en particulier pour l'agriculture et les animaux de pâturage. Plusieurs communautés sont maintenant plus sensibles à l'impact des plastiques jetés sur l'environnement en raison de leur persistance dans notre environnement, y compris les effets délétères sur la faune et la flore et sur l'environnement, qualités esthétiques des villes et des forêts. L'élimination inadéquate des plastiques joue un rôle important dans l'atteinte potentielle de la vie en provoquant une pollution environnementale. En outre, la combustion des plastiques en polychlorure de vinyle (PVC) produit des polluants organiques persistants (POP) connus sous le nom de furanes et de dioxines [45].

1.1.4.4 Devenir dans l'air

La recherche sur le devenir des microplastiques dans l'air est nettement insuffisante, mais il est entendu que l'air est probablement un important vecteur de transport des microplastiques [46]. Lorsqu'ils sont libérés dans l'atmosphère, les microplastiques peuvent être en suspension ou transportés en raison de leur faible poids. La suspension et la dispersion des particules dans l'air dépendent de facteurs tels que la taille, la forme et la densité des particules (les polymères plus légers et moins denses peuvent être transportés plus facilement) ainsi que le vent et les précipitations, qui peuvent faciliter le dépôt sur le sol ou dans l'eau. Les courants d'air et le vent peuvent transporter les particules sur de longues distances [47]. Comme les courants atmosphériques peuvent être multidirectionnels, le transport dans l'air est moins limité que dans les milieux aquatiques ou terrestres.

Des évaluations préliminaires de trajectoire ont montré que les microplastiques avaient parcouru jusqu'à 95 km à partir de leur source, ce qui signale un transport éventuel sur de longues

distances. Plusieurs études ont également révélé la présence de microplastiques dans l'océan Arctique. Ont été les premiers à signaler la présence de microplastiques dans les eaux polaires de surface et de subsurface de l'Arctique [48].

Par la suite, ont trouvé de grandes quantités de microplastiques dans les sédiments des grands fonds de l'Arctique, ont trouvé des microplastiques dans des carottes de glace de mer à cinq endroits différents de l'Arctique et ont analysé leur contenu et leur composition. Comme pour les polluants organiques persistants, on suppose que le transport atmosphérique des microplastiques sur de longues distances serait l'un des mécanismes possibles (les courants dominants et les réseaux alimentaires en sont d'autres) expliquant leur apport dans les zones éloignées de l'océan Arctique [49].

Un certain nombre d'études ont quantifié la présence de microplastiques dans l'atmosphère ainsi que dans les retombées (c.-à-d. les particules qui se déposent sur un filtre pendant la période de prélèvement). Dans une étude, par exemple, on a observé des retombées de microplastiques atmosphériques sur un site de prélèvement dans un milieu urbain dense. La plage quotidienne se chiffrait entre 2 et 355 particules/ m² [46]. Une étude antérieure de Dris *et coll.* (2015) a mesuré des retombées atmosphériques totales de 29 à 280 particules/m²/jour dans l'agglomération parisienne. Dans la ville de Dongguan, en Chine, les concentrations de microplastique dans des échantillons de retombées atmosphériques prélevés sur trois sites pendant une période de trois mois s'élevaient à 31, 33 et 43 particules/m²/jour [50].

Trois types de polymères différents ont été identifiés dans les échantillons de microplastique (PE, PP et PS) et les fibres étaient la forme prédominante des microplastiques échantillonnées. Dans la région métropolitaine de Hambourg, une concentration médiane en retombées de microplastiques entre 136,5 et 512,0 particules/m²/jour a été relevée sur six sites de prélèvement au cours d'une période de 12 semaines.

Parmi les microplastiques détectées, 95 % étaient des fragments, les 5 % restants étant constitués de fibres. Pendant les périodes de forte pluie, Dris *et coll.* (2016) ont observé un nombre supérieur de fibres dans les retombées atmosphériques. Toutefois, d'autres facteurs, temporels et mécanistes, que les auteurs n'ont pas explicités, étaient probablement en cause. En général, les concentrations atmosphériques de microplastiques sont souvent corrélées à la densité de la population, car l'activité humaine influence fortement la libération de microplastiques dans l'environnement. Le devenir et le transport dépendront des conditions météorologiques

dominantes. Le transport sur de longues distances entre les régions urbaines à la source et les endroits éloignés est très probable [51].

1.1.4.5 Présence dans les aliments et l'eau potable

1.1.4.5.1 Présence dans les aliments

Les poissons

De nombreuses espèces comestibles de poissons démersaux, pélagiques et de récifs pélagiques et de récifs, échantillonnées dans le monde entier, ont ingéré des microplastiques. Parmi les sept espèces de poissons les plus élevées en aquaculture, toutes sont des espèces d'eau douce et leurs stratégies alimentaires sont principalement planctonivores ou omnivores, à l'exception de l'amour blanc qui est herbivore et se nourrit principalement de plantes aquatiques [52].

Ces poissons sont susceptibles de consommer des microplastiques, car leurs proies sont de taille similaire. Cependant, les recherches sur l'ingestion de microplastiques n'ont été réalisées que sur la carpe commune, la carpe crucifère, le tilapia du Nil et la carpe argentée, et aucune donnée n'est disponible pour les trois autres espèces, bien qu'elles représentent ensemble 12,5 millions d'individus qu'elles représentent un total de 12,5 millions de tonnes de poissons d'élevage. Ces études ont donné une quantité moyenne combinée de microplastiques par organisme de $2,5 \pm 1,3$ MP/individu (carpe commune), $1,9 \pm 1,0$ MP/individu (carpes Crucian) et $3,8 \pm 2,0$ MP/individu (carpes argentées) [52].

Les données sur le tilapia du Nil ont été présentées par le nombre individus ayant consommé des microplastiques, soit une moyenne de 16%. Lorsqu'il est possible de visualiser la morphologie des particules plastiques ingérées, les fibres sont la forme microplastique la plus courante et représentent 57,6 % à 86,5 % des particules plastiques ingérées. Parmi les dix espèces les plus capturées, toutes sont des poissons marins, la majorité est des espèces pélagiques qui consomment principalement du plancton et des petits poissons, à trois exceptions près (colin, thon et cabillaud). La teneur en microplastiques de ces poissons sont beaucoup plus étudiés que les espèces d'aquaculture communes, puisque 80 % des dix espèces les plus pêchées ont fait l'objet d'au moins une étude sur les microplastiques [52].

Les fibres sont la forme microplastique la plus courante et représentent 57,6 % à 86,5 % des particules plastiques ingérées. -86,5 % des formes plastiques observées. Parmi les dix espèces les plus capturées, toutes sont des poissons marins. La majorité est des espèces pélagiques qui

consomment principalement du plancton et des petits poissons, à trois exceptions près (colin, thon et cabillaud) [52].

La teneur en microplastiques de ces poissons est beaucoup plus étudiée que les espèces d'aquaculture communes, puisque 80 % des dix espèces les plus pêchées ont fait l'objet d'au moins une étude sur les microplastiques. En rassemblant toute la littérature disponible sur ces organismes, on obtient les pourcentages suivants pour chaque espèce qui a été observée avec des microplastiques dans leur tractus gastro-intestinal : 0,9 % d'anchois péruvien Pérou ; 9,4 % Thon listao ; 24,5 % Maquereau et chinchard ; 8,8 % Hareng de l'Atlantique ; 23,3 % Thon de l'Atlantique ; 0,9 % Anchois du Pérou hareng de l'Atlantique ; 23,3 % maquereau Paci 23,3 % maquereau pacifique ; 23,4 % thon à nageoire ; 2,8 % de morue de l'Atlantique et 76,6 % d'anchois japonais [52].

Parmi les autres espèces d'importance commerciale qui ont été incluses dans plusieurs documents (ainsi que les pourcentages observés avec des microplastiques dans leur TIG), citons le chinchard (*Decapterus spp*, 46%), le pilchard européen (*Sardina pilchardus*, 26%), le merlan bleu (*Micromesistius poutassou*, 29,8%) et le maquereau de l'Atlantique (*Scomber scombrus*, 23,2%) [52].

Les fruits de mer

Les huîtres creuses (*Crassostrea spp.*) et les coquilles de tapis japonais (*Ruditapes philippinarum*) sont parmi les espèces les plus courantes en aquaculture, font partie des espèces de mollusques et de crustacés les plus répandues en aquaculture dans le monde. L'ingestion de microplastiques dans les coquillages est généralement exprimée en nombre de microplastiques par gramme de tissu humide. Chez huîtres Cupped, le résultat moyen rapporté varie de 0,18 à 3,84 microplastiques par gramme⁻¹ de tissu humide, et chez les huîtres japonaises, le résultat moyen rapporté varie de 0,18 à 3,84 microplastiques par gramme⁻¹ de tissu humide, le résultat moyen rapporté allait de 0,9 à 2,5 microplastiques par gramme⁻¹ [52].

Alors que les valeurs d'ingestion semblent différentes lorsqu'on analyse le nombre de microplastiques ingérés par individu, lorsqu'elles sont normalisées en fonction du poids des tissus mous, les valeurs pour les trois espèces se chevauchent, ce qui semble indiquer que l'ingestion de microplastiques chez les mollusques n'est pas spécifique à une espèce. Bien que les mollusques puissent montrer sélectifs, rejetant les particules en fonction de leur taille ou de l'absence de matière organique, ils on constate qu'ils ingèrent des microplastiques. Bien que ces espèces

ingèrent toutes des quantités similaires de microplastiques, il est possible qu'elles ingèrent de manière sélective des microplastiques de différentes tailles, en raison de la nature de l'organisme, sélectivement des microplastiques de taille différente en raison de la taille de l'organisme, pouvant ingérer des particules plus grosses que les moules [52].

Les données issues de l'analyse de moules et d'huîtres prélevées sur la côte atlantique française le suggèrent, puisque les deux organismes ont ingéré une majorité de microplastiques dans la fourchette de 50 à 100 %. Microplastiques d'une taille comprise entre 50 et 100 μm , mais les moules ont ingéré une proportion plus élevée de particules de 20-50 μm que les huîtres (37 % et 15 %, respectivement), et les huîtres ont ingéré une plus grande proportion de particules >100 μm que les moules (32 % et 11 %, respectivement) [52].

Les crustacés

Les crustacés constituent un groupe d'organismes très vaste et diversifié, dont les suivants dont beaucoup sont importants pour la sécurité alimentaire mondiale, tels que les crabes, les homards, les écrevisses et les crevettes [52].

De nombreuses espèces comestibles de crustacés ingèrent des organismes tels que les copépodes et le krill sont également d'une importance capitale en tant que nourriture pour les organismes qui sont consommés par les humains, et il a été rapporté qu'ils ingèrent des microplastiques. Aucune étude n'a été réalisée pour étudier l'ingestion de microplastiques chez la crevette Whiteleg, l'une des dix espèces aquatiques les plus cultivées avec 4,2 millions d'individus [52].

Cependant, des études ont été menées sur d'autres espèces commercialement importantes. D'autres espèces commercialement importantes. La crevette brune, *Crangon crangon*, un crustacé commercialement important pêché dans la région de l'Océan Indien, l'Atlantique Est et la Méditerranée, a été trouvée avec une moyenne de $0,68 \pm 0,55$ microplastiques gram^{-1} et 63% des 165 crevettes analysées contenaient des microplastiques [52].

1.1.4.5.2 Présence dans l'eau potable

Nous avons examiné la littérature disponible sur les microplastiques dans l'eau potable, l'eau douce et les eaux usées. Des contrôles ont été effectués dans de nombreux endroits en Asie, en Australie, en Europe et en Amérique du Nord. Une sélection d'études rapportant des concentrations en nombre de particules a été utilisée pour une analyse plus approfondie, si elles

rapportaient des moyennes et/ou des données brutes sur une base de volume. Ces concentrations de microplastiques, rapportées en nombre de particules, s'étendaient sur dix ordres de grandeur dans tous les échantillons individuels et les types d'eau, même en excluant les eaux usées [53].

Le nombre de particules microplastiques dans les échantillons par type d'eau était statistiquement différent (p. ex. type d'eau était statistiquement différent ($p < 0,05$) pour toutes les comparaisons par paire de types d'eau, à l'exception de l'eau de mer, sauf pour les comparaisons entre l'eau souterraine et tous les autres types d'eau, l'effluent de l'eau de stations d'épuration et de l'eau du robinet, et l'influent de l'eau de stations d'épuration par rapport à l'eau (non traitée) de stations d'épuration [53].

Comme ces données de concentration se rapportent à des nombres, elles ne font pas de distinction entre la taille des particules, leur forme ou le type de matériau, forme ou le type de matériau. Souvent [53].

Les études ne mentionnent souvent pas de limite de taille inférieure ou supérieure, ou ne mentionnent que la classe de taille ciblée. Les données incluent des particules signalées comme des microplastiques, c'est-à-dire que nous n'avons pas retiré de particules suspectes non polymères identifiées soit par les auteurs eux-mêmes, soit sur la base de notre évaluation de la qualité décrite ci-dessus. La plage pour 50 % des données par type d'eau est de 1 à 2 ordres de grandeur, et assez similaire pour les données sur les affluents, les effluents, les lacs, les rivières et les eaux embouteillées. Pour l'eau de canal et l'eau du robinet, seules quelques études étaient disponibles, ce qui peut avoir entraîné une variation beaucoup plus faible. Pour l'eau en bouteille, le nombre d'études était également faible, mais de nombreux échantillons (marques d'eau en bouteille) pour ce type d'eau étaient disponibles dans ces études. Les concentrations médianes par type d'eau varient sur quatre ordres de grandeur [53].

Les eaux de surface présentent les concentrations les plus faibles de tous les types d'eau, l'eau en bouteille étant plus proche de l'extrémité supérieure. Les concentrations plus faibles observées dans les eaux de surface, notamment par rapport à l'eau potable, est probablement attribuée au fait que la plupart des études sur l'eau de surface ne ciblent que les particules les plus grosses, alors que les particules plus petites sont plus abondantes [53].

L'influent de les usines de traitement d'eau potable présentent les concentrations les plus élevées sur la base de la médiane et de l'écart interquartile des concentrations rapportées, bien que les études sur les usines de traitement d'eau potable n'aient généralement pas surveillé les petites particules. Les concentrations élevées reflètent donc les apports domestiques directs et les apports des sources terrestres diffuses qui sont acheminées par les eaux usées [53]. Les effluents des

stations d'épuration présentent une médiane inférieure à celle des effluents, ce qui reflète probablement la rétention des microplastiques dans les stations d'épuration.

De même, l'eau du robinet non traitée présente des concentrations plus élevées que l'eau du robinet traitée, ce qui peut refléter un afflux plus important de particules dans les usines, qui sont par nature plus enfermées, l'usure des bouchons ou des parois des bouteilles après la production, ou le fait que ces études ont également porté sur des particules de plus petite taille. Par exemple, a utilisé la microscopie Raman et a ainsi été en mesure de d'identifier des particules jusqu'à $> 5 \text{ nm}$, ce qui explique aussi les concentrations élevées en nombre de particules [53].

Les tendances générales observées ici persistent lorsque seules les études ayant obtenu les scores de qualité les plus élevés sont pris en compte. Néanmoins, les généralités énumérées ici doivent être interprétées avec prudence étant donné le faible nombre d'eau en bouteille ($n=3$), d'eau du robinet traitée ($n=2$), d'usines de traitement d'eau potable (non traitée) ($n=2$) et d'études sur les eaux souterraines, bien que, comme indiqué précédemment, de nombreux échantillons d'eau en bouteille étaient disponibles dans le nombre limité d'études [53].

1.1.4.6 Effets Eco toxicologiques

Outre la toxicité et les impacts des microplastiques eux-mêmes, leurs effets vecteurs peuvent affecter la biodisponibilité (par exemple, la bioaccumulation toxicité, effets transgénérationnels) des contaminants chimiques associés aux organismes aquatiques. Au cours des dernières décennies, les scientifiques ont commencé à explorer le rôle des débris plastiques dans le transport et la libération de divers contaminants chimiques dans les organismes aquatiques, transport et la libération de divers contaminants chimiques dans l'environnement et la faune.

Du fait de leur taille microscopique, de leur surface hydrophobe, d'une grande surface spécifique et d'une forte mobilité, les microplastiques ont une grande affinité avec les contaminants chimiques hydrophobes et les absorbent dans l'environnement. En outre, les microplastiques peuvent servir comme un vecteur de transport des métaux lourds dans les milieux aquatiques. Parallèlement, des études ont suggéré la désorption de ces contaminants chimiques à partir de différents microplastiques dans des environnements aquatiques naturels et des conditions physiologiques simulées [54].

D'autre part, divers additifs et sous-produits sont ajoutés aux produits en plastique au cours du processus de fabrication afin d'améliorer les performances des matériaux. Ces dernières années, des preuves ont montré que ces additifs peuvent s'infiltrer dans l'environnement à partir de débris

plastiques ou de microplastiques (y compris le micro-caoutchouc), causant des risques non négligeables pour la santé (par exemple, toxicité, perturbation endocrinienne, mutation génétique) aux organismes aquatiques, Par conséquent, les microplastiques peuvent servir à la fois de sources et de puits pour les contaminants chimiques associés dans différents milieux, et favoriser leur migration [55].

Trois principaux types de combinaison de microplastiques et de contaminants chimiques associés : l'interaction entre les microplastiques et les et des contaminants organiques, des microplastiques et des métaux lourds, ainsi que la lixiviation d'additifs plastiques. En général, il existe deux voies combinées pour affecter les organismes aquatiques : les microplastiques dopés avec les contaminants associés et la co-exposition à une combinaison de microplastiques et de contaminants associés. Lorsqu'ils sont exposés ou ingérés par animaux, les microplastiques peuvent constituer une voie praticable pour transférer les contaminants chimiques absorbés et les additifs libérés dans leurs tissus, ce qui constitue un risque potentiel pour la santé [56].

Cependant, ces toxicités combinées des microplastiques et des contaminants chimiques associés peuvent être spécifiques aux produits chimiques et aux espèces. Par conséquent, la par conséquent, la mesure dans laquelle divers types de microplastiques et de nanoplastiques renforcent ou atténuent les impacts sur l'environnement et la santé de ces polluants associés reste incertaine en raison de la complexité des organismes de test, propriétés des microplastiques, des polluants, des conditions environnementales et des méthodes d'exposition. En ce qui concerne les incidences des microplastiques et des contaminants chimiques associés sur les organismes aquatiques, les études pertinentes sont de plus en plus performantes afin de mieux comprendre les risques potentiels des microplastiques dans les environnements aquatiques réalistes. Dans cette section, ces effets combinés de différents microplastiques et polluants chimiques associés sur des organismes typiques testés ont été résumés et discutés sur le site [57].

1.1.4.7 Répercussions sur la santé humaine

1.1.4.7.1 Effets de l'exposition par voie orale

L'absorption et la translocation des microplastiques une fois ingérés sont fortement liées aux propriétés physicochimiques des particules ingérées. La taille des particules est un facteur déterminant important de l'absorption par l'épithélium de l'intestin. Les petites particules ont de plus grands rapports surface/volume, ce qui peut augmenter leur capacité de se déplacer vers les organes internes ainsi que leur bio réactivité [58].

1.1.4.7.2 Effets de l'exposition par inhalation

La probabilité que les microplastiques fibreux en suspension dans l'air pénètrent dans notre système respiratoire dépend de leur taille. Tout d'abord, il est important de faire la distinction entre les termes inhalables et respirable. Les particules et les fibres capables de pénétrer dans le nez et la bouche et se déposer dans les voies respiratoires supérieures sont inhalables, tandis que celles qui peuvent atteindre et se déposer dans le poumon profond sont respirables. Le dépôt dans les voies respiratoires est fonction du diamètre aérodynamique et, dans la zone respiratoire, le dépôt et dans la zone respiratoire, le dépôt diminue au-delà de 5 mm de diamètre [59].

L'Organisation mondiale de la santé définit une fibre comme toute particule qui a une longueur > 5 mm, un diamètre < 3 mm et un rapport d'aspect (longueur/diamètre) $> 3:1$. Les microplastiques fibreuses qui dépassent ces critères peuvent être inhalées, mais sont susceptibles d'être soumis à une clairance mucociliaire dans les voies aériennes supérieures, ce qui entraîne une exposition gastro-intestinale [60]. Certains microplastiques fibreux peuvent cependant éviter les mécanismes de clairance mucociliaire du poumon, en particulier dans les cas où les mécanismes de clairance mucociliaire ne sont pas efficaces, en particulier chez les individus dont les mécanismes de clairance sont compromis [61].

Des études menées parmi les travailleurs du flocage du nylon (fibre) suggèrent qu'il n'existe aucune preuve d'une augmentation du risque de cancer, bien que les travailleurs aient une prévalence plus élevée d'irritation respiratoire [62]. La maladie pulmonaire interstitielle est une affection liée au travail qui induit de la toux, de la dyspnée (essoufflement) et une capacité pulmonaire réduite chez les travailleurs transformant des fibres de para aramide de polyester et/ou de nylon. Les travailleurs présentent également des symptômes cliniques similaires à ceux de l'alvéolite allergique [63].

Ces résultats sanitaires sont révélateurs du potentiel des microplastiques à déclencher des réponses biologiques localisées, étant donné leur absorption et leur persistance. Bien que ces effets soient distincts de ceux observés après une exposition à l'amiante, l'héritage des microplastiques n'en demeure pas moins important. L'exposition à l'amiante, l'héritage de la toxicologie de l'amiante peut en partie en partie aider à prédire les effets des microplastiques fibreux sur la santé. Dans fibres à base de silicate, la longueur et la bio persistance dans les voies respiratoires/poumon sont les caractéristiques qui régissent la toxicité et les mécanismes de cette toxicité. Il reste à savoir

s'il en va de même est vrai pour les microplastiques fibreux reste à déterminer [64].

1.1.4.7.3 Effets des biofilms

Un biofilm est un ensemble de microorganismes adhérant sur une surface et liés par une matrice « liante » dite « matrice extracellulaire ». Cette matrice est formée de substances polymériques extracellulaires (EPS de l'anglais Extracellular polymeric substances) secrétées par les microorganismes, qui assurent la cohésion du biofilm et jouent un rôle dans son adhérence au substrat. En plus de sa fonction de liant, la matrice joue également un rôle protecteur pour les organismes contre différents facteurs de stress environnementaux (température, rayonnement solaire, oxygène, biocides...). Les EPS ont aussi un grand pouvoir de rétention d'eau qui s'avère important pour des périodes de sécheresse. Des particules organiques et inorganiques sont aussi captées dans le biofilm et peuvent servir de nutriments pour les organismes [65].

On ne connaît pas clairement l'incidence de la composition et de la structure du biofilm, mais certains chercheurs ont formulé l'hypothèse qu'elles pourraient entraîner une réduction de la compétition et de la prédation, ce qui mènerait à l'apparition d'agents pathogènes potentiels. Les constituants de biofilms souvent trouvés sur les microplastiques comprennent différents microorganismes non pathogènes, notamment des espèces des genres *Pseudomonas*, *Arcobacter*, *Erythrobacter*, *Streptococcus*, *Staphylococcus*, *Aspergillus*, *Penicillium* et *Phanerochaete*.

La hausse de la densité et de la proximité des cellules, ainsi que de la quantité d'éléments nutritifs disponibles, et la protection offerte par la matrice de polymères extracellulaires font des biofilms, y compris ceux fixés aux microplastiques, un milieu idéal pour les interactions entre les micro-organismes. Parmi ces interactions se trouve la conjugaison, c'est-à-dire le transfert de matériel génétique par contact direct de cellule à cellule [66].

La conjugaison est une méthode de transfert horizontal de gènes, le principal mécanisme de propagation de la résistance aux antibiotiques, par lequel un élément transposable, comme un plasmide, contenant les gènes de résistance aux antibiotiques, est transféré d'une cellule donneuse à une cellule receveuse. Différentes études ont révélé que les gènes de résistance aux antibiotiques sont plus fréquemment transférés entre les membres d'un biofilm associé à des microplastiques qu'entre les bactéries libres ou les membres de biofilms associés à des agrégats naturels [67].

Les micro-organismes peuvent également adhérer à la surface de microplastiques en suspension dans l'air, mais il y a peu de données sur le sujet. Si des micro-organismes ont été mesurés dans des 77 particules en suspension dans l'air, il n'existe aucune donnée spécifique des particules de plastique. L'adhérence et la prolifération des micro-organismes sur des

microplastiques en suspension dans l'air peuvent être limitées parce qu'elles pourraient être liées au contact des micro-organismes avec des microplastiques dans l'environnement. Cependant, si un contact a lieu, les particules de plastique pourraient protéger les micro-organismes qui y adhèrent. Même si aucune donnée n'a pu être trouvée sur la caractérisation des communautés microbiennes pouvant coloniser des microplastiques en suspension dans l'air, des infections pulmonaires sont possibles, en théorie, si des espèces pathogènes se fixaient sur des microplastiques et étaient inhalées [68].

CHAPITRE 2

MATERIEL ET METHODES DES TRAVAUX

REALISES DANS LE MONDE



2.1 Les plastiques de type PET, des polluants les plus problématiques du monde

2.1.1 Définition de Polyéthylène téréphtalate

Le polyéthylène téréphtalate est un polymère obtenu généralement par polycondensation de l'acide téréphtalique et de l'éthylène glycol. Il est employé dans l'emballage (bouteilles, pots ; barquettes, couvercles) et dans la fabrication de petites pièces pour l'équipement électrique (barrettes). L'automobile (poignées, ventilateurs) et l'électroménager (poignées, broches de connexion). Il est employé ainsi en fibre textiles telles que le tergal. C'est pourquoi on peut recycler des bouteilles pour en faire des tissus [69].

2.1.2 Caractérisation de Polyéthylène téréphtalate

Les matériaux thermoplastiques constituent une importante classe de matériaux synthétiques dérivés de polymères linéaires ou légèrement ramifiés. Ils présentent de nombreuses propriétés parfois inégalables. Ils se caractérisent par leur aptitude à conserver leur plasticité à chaud et leur rigidité à froid. Ce sont des matériaux qui, de nos jours, se substituent progressivement aux métaux et aux verres grâce à leurs divers avantages autant au niveau des propriétés mécaniques qu'au niveau économique [70].

Parmi les matériaux thermoplastiques semi-transparents, le polyéthylène téréphtalate est le plus utilisé en industrie. C'est un polyester dur et tenace obtenu par polycondensation à partir des produits de base qui sont l'acide téréphtalique et l'éthylène glycol (Figure 8). Sa structure peut être amorphe ou partiellement cristalline. La possibilité de passer d'une phase à l'autre dépend fortement de la température. En effet, en dessous de la température de transition vitreuse, les chaînes ne sont pas assez mobiles et le matériau est rigide, avec une microstructure figée [71].

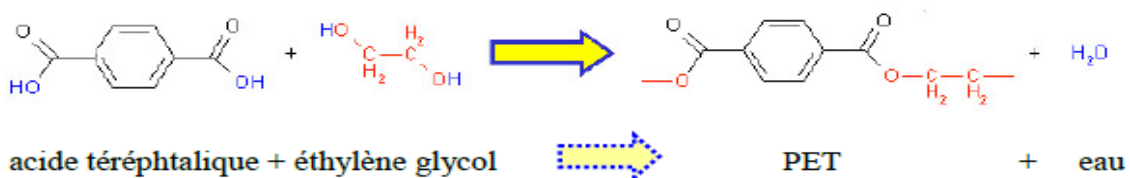


Figure 8 : Synthèse du polyéthylène téréphtalate [71].

Au-dessus de la température de fusion (environ 270°C), les liaisons entre les chaînes sont détruites et le matériau est liquéfié. Entre ces deux températures, les chaînes sont mobiles et leur

configuration peut changer. C'est cet état du matériau qui est intéressant pour plusieurs procédés (thermoformage, soufflage, etc.) car il permet la mise en forme avec moins d'efforts [70].

2.1.3 Impact sur la santé

Contrairement à ce que sa dénomination pourrait laisser croire, le polyéthylène téréphtalate ne contient pas de phtalate. Il n'est pas toxique et son utilisation comme emballage alimentaire se révèle être parfaitement sécurisée. Cependant, plusieurs études démontrent la contamination possible de la nourriture contenue dans ce type de plastique recyclable [72].

En fait, la production de ce composant nécessite l'emploi d'un catalyseur toxique et potentiellement cancérigène, le trioxyde d'antimoine. La migration de ce produit dans les eaux en bouteille est négligeable. Toutefois, la chaleur favorise sa migration vers les aliments. Il faut donc éviter de chauffer ces contenants afin de limiter le passage de perturbateurs endocriniens dans la nourriture [72].

2.1.4 Impact sur l'environnement

Bien entendu, le processus de fabrication produit des déchets, tout comme son recyclage. De plus, la production d'une bouteille utilise à peu près 7 litres d'eau. Il faut toutefois relativiser cette consommation d'eau qui semble minime comparée à celle utilisée pour créer d'autres objets. Par exemple, il faut 250 litres d'eau pour concevoir un seul rouleau de papier toilette. Les molécules exploitées pour produire le polyéthylène téréphtalate proviennent du pétrole mais une quantité infime de sa production mondiale est utilisée pour fabriquer les bouteilles en plastique. Recycler ces dernières permet d'économiser énormément de pétrole (830 litres pour 1 tonne de bouteilles recyclées).

Les industriels cherchent à améliorer leur impact environnemental en allégeant considérablement les bouteilles. L'avenir transformera sans doute le recyclage car quelques rares espèces de bactéries ont été identifiées comme ayant des propriétés de biodégradation du film polyéthylène téréphtalate [72].

2.2 Les techniques actuelles de recyclage du PET et leurs avantages et inconvénients

2.2.1 Les techniques de recyclage du PET

Les déchets de plastique en polyéthylène téréphtalate qui sont produits par les entreprises, les ménages et les administrations publiques doivent d'abord être collectés, triés avant d'être recyclés.

A. La collecte

La collecte est le procédé fondamental par lequel les matières recyclables sont détournées des dépotoirs et acheminées vers des établissements de transformation ou de manutention (Figure 9), les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis en centre d'enfouissement technique.



Figure 9 : La collecte des déchets plastiques [73].

Les modes de collecte utilisés pour la collecte du plastique d'emballage ménagers et d'autres déchets plastiques en sont distincts.

- La collecte en apport volontaire ;
- La collecte sélective en porte-à-porte ;
- La collecte des encombrants [73].

B. Le tri

Quelle que soit l'origine du plastique collecté (bouteilles, tubes, châssis de fenêtres...), un traitement préalable de tri, nettoyage, purification, peut être nécessaire pour assurer une valorisation judicieuse (Figure 10).

- **Etape 1** : Les habitants déposent leurs bouteilles dans des poubelles adaptées, des camions spéciaux les emmènent dans des centres de tri.
- **Etape 2** : Ils sont chargés dans un tapis roulant, on les secoue dans des cribles pour ôter les petits déchets.
- **Etape 3** : Les matériaux sont séparés mécaniquement ou manuellement, ils sont triés par catégories (bouteilles, flacon plastiques, couleur).
- **Etape 4** : Ils sont compactés, pour les transporter plus facilement dans des usines de recyclage [74].



Figure 10 : le tri manuel des déchets plastiques [74].

C. Le recyclage

C 1. Le broyage, lavage et séchage

Après la collecte et tri des déchets plastiques, ils sont broyés transformés en paillettes, puis ils sont lavés à chaud (Figure 11).

Les paillettes propres doivent être complètement séchées. (Toute humidité résiduelle peut affecter la qualité du produit fini).

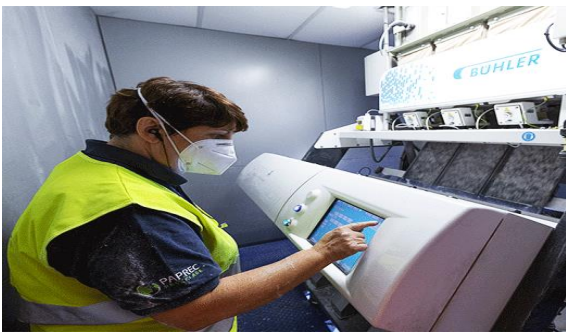


Figure 11 : La machine de broyage, lavage et séchage des déchets plastiques [75].

C 2. La fonte et le filtrage :

Les paillettes séchées sont passés dans une extrudeuse où la chaleur et la pression font fondre le plastique (Chaque type de plastique a un point de fusion particulier). Le plastique fondu subit un filtrage serré (Figure 12), (Cette étape permet d'enlever tout contaminant qui aurait résisté au cycle de lavage) [75].



Figure 12 : Le filtrage des déchets plastiques [75].

C 3. La granulation :

Les pailles sont refroidies puis coupées en granules. (Celles-ci sont entreposées pour la vente et l'expédition. Les granules obtenues serviront de matière première pour de nouveaux produits, ils sont pris en charge par les usines de transformation. Ils sont intégrés dans la chaîne de transformation qui leur est spécifique et en sortent sous forme de matière prête à l'emploi (Figure 13) [75].



Figure 13 : La granulation des déchets plastiques [75].

2.2.2 Avantages et limites du recyclage des plastiques

On peut dire que le recyclage des plastiques a plusieurs avantages que d'inconvénients, et cela on peut le constater à travers plusieurs exemples qui sont :

A. Avantages du recyclage

a. Protection de l'environnement

En triant les déchets, on devient le premier maillon de la chaîne du recyclage et contribue activement au développement durable : le processus de recyclage implique en effet l'utilisation de matières premières secondaires issues de déchets et permet ainsi d'éviter toutes les phases d'extraction et de transformation de la matière première naturelle qui sont polluantes et coûteuses en énergie [76].

b. Préservation des ressources

Le recyclage permet de briser la chaîne immuable des ressources transformées en produits qui, en fin de vie, deviennent des déchets qu'il faut éliminer. Une boucle vertueuse est ainsi créée par l'utilisation de matière première issue de déchets à la place de matière première naturelle. Par exemple, une tonne de plastique permet d'économiser 800 kilos de pétrole brut. A une époque où la pénurie des ressources pétrolifères se dessine à moyen terme, une telle économie prend toute son importance [76].

c. Une question d'image

Il est avéré que les entreprises œuvrant dans le respect de l'environnement sont perçues beaucoup plus favorablement. La pratique du recyclage permet donc d'améliorer l'image de votre société auprès de vos clients comme du grand public [76].

d. Soutenir l'économie locale

Le recyclage favorise l'économie locale et contribue par conséquent à la création d'emplois [76].

B. Les inconvénients de recyclage

Il existe plusieurs limites, on les illustre comme suit :

- La première limite est politique. Il est souvent utilisé pour la communication d'entreprises qui vendent des produits ayant une durée de vie limitée. Ils produisent des déchets, mais l'entreprise communique sur le fait qu'ils sont recyclables, et sous couvert d'écologie, les distribuent à grande échelle. Finalement, dans ce cas, le recyclage sert d'alibi et masque la seule volonté de produire plus, sans pour autant accorder l'importance (et donc le budget) nécessaire à la réduction des déchets.
- Le recyclage coûte cher, il entraîne d'ailleurs plusieurs types de coûts, parmi lesquels des coûts de transports et de traitements en générale assez élevés.
- Le coût de la main-d'œuvre est lui aussi important. La collecte et le tri et le traitement des déchets nécessitent en général beaucoup de personnel. Si le coût de la main-d'œuvre est élevé, les déchets recyclés seront moins compétitifs en termes de prix sur le marché.
- Le processus de recyclage (broyage, lavage, séchage, extrusion et la granulation) nécessite une grande consommation d'énergie. Donc, une charge importante pour l'entreprise [76].

2.3 Procédé de recyclage du PET par des bactéries (*Ideonella sakaiensis*)

2.3.1 Données scientifiques de la bactérie (*Ideonella sakaiensis*)

En 2016, des scientifiques japonais ont découvert une bactérie capable de décomposer le plastique PET, principalement connu dans les bouteilles en plastique et les fibres de vêtements. Désormais, des chercheurs danois vont accélérer le processus de dégradation afin que toutes les montagnes de déchets plastiques puissent être utilisées [77].

La nature a encore une fois surpassé les humains. En seulement 80 ans, l'évolution a réussi à produire un organisme capable de vaincre un matériau synthétique, le plastique, qui n'existait pas auparavant dans la nature. Cet organisme est la bactérie connue sous le nom *Ideonella sakaiensis* 201-F6, qui est capable de décomposer le polyéthylène téréphtalate (PET), un type de plastique utilisé entre autres dans les bouteilles de soda. Le PET est fabriqué à partir d'éthylène glycol et de téréphtalate de diméthyle (DMT), tous deux principalement fabriqués à partir de pétrole brut. *Ideonella sakaiensis* est capable de décomposer le PET. Les scientifiques japonais ont découvert les capacités de la bactérie en le voyant se développer sur de grandes quantités de bouteilles en PET dans une station de recyclage [77].

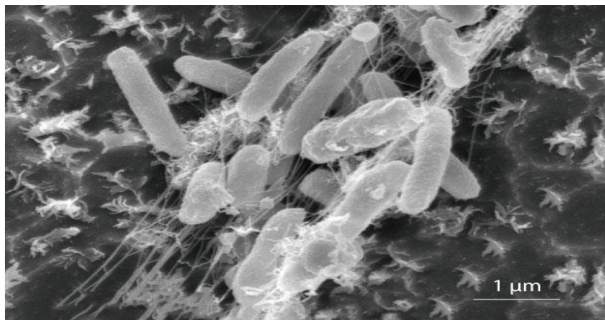


Figure 14 : image microscopique d'*Ideonella sakaiensis* [78].

Ideonella sakaiensis (*sakaiensis* appartenant à la ville de Sakai au Japon où la première souche a été isolée). Les cellules sont des bâtonnets Gram-négatifs, aérobies, non sporulés, tiges (0,6-0,81,2-1,5 µm), mobiles avec un flagelle polaire (Figure 14) [78].

Les colonies ont un diamètre de 0,5-1,0 mm, circulaires, en relief, translucides avec une marge entière et non pigmentées, ou crème après incubation à 30 C sur une gélose NBRC no. 802 géloses pendant 2 jours. Le cytochrome oxydase et la catalase sont positifs [78].

2.3.2 Moyens techniques utilisés

Cette expérience a été menée par Shosuke Yoshida et al (2018) [79].

- Dépistage

250 échantillons environnementaux contaminés par du PET (pendant environ cinq ans) (sédiments, sol, eaux usées et boues activées) ont été collectés dans la cour d'une usine de recyclage de bouteilles en PET dans la ville de Sakai, à Osaka, au Japon. Ils ont été prélevés à 2 à 3 cm sous le niveau de l'eau ou à la surface du sol.

Environ 1 g des échantillons a été cultivé individuellement dans un tube à essai (ø18×180 mm) contenant 10 ml d'extrait de levure à 0,05 %, 0,2 % de sulfate d'ammonium et 1 % d'oligo-éléments dans un tampon phosphate 10 mm (pH 7,0) avec un film mince PET à faible cristallinité (film PET).

Le film PET a été stérilisé dans de l'éthanol à 70 % et séché à l'air stérile avant d'être placé dans le tube à essai. Le tube a été secoué à 300 coups/min à 30°C. Un milieu de laitue et d'œuf modifié contenant 0,15% d'extrait de laitue séchée, 0,15% d'extrait d'œuf, 0,2% de sulfate d'ammonium et 1% des oligo-éléments dans un tampon phosphate 10 mm (pH 7,0) a été utilisé pour une culture stable de n° 46 .

- Isolement d'*Ideonella sakaiensis* 201-F6

L'*Ideonella* a été diluée en série en utilisant l'approche du nombre le plus probable dans un milieu prototype d'extrait de levure-carbonate de sodium-vitamines : 0,01 % d'extrait de levure, 0,02 % d'hydrogénocarbonate de sodium, 0,1 % de sulfate d'ammonium, 0,01 % de carbonate de calcium, 0,1 % de mélange de vitamines (0,05 % de thiamine-HCl, 0,05 % de niacine, 0,03 % d'acide p-aminobenzoïque, 0,01 % de pyridoxal-HCl, 0,01 % de pantothénate, 0,005 % de biotine et 0,05 % de vitamine B12) et 1 % d'oligo-éléments dans du tampon phosphate 10 mm (pH 7,0).

Chaque échantillon dilué a été cultivé avec un film PET (ø 6 mm) dans un puits d'une plaque à 96 puits à 30°C pendant 6 jours. L'activité de dégradation du PET a été estimée visuellement sur la base du changement de transparence du film dû à la dégradation. Parmi les échantillons positifs, l'échantillon qui était le plus dilué au début de la culture a été utilisé dans le cycle du dosage. Ce cycle a été répété pour concentrer les micro-organismes PET-lytiques.

- Croissance d'*Ideonella sakaiensis* sur film PET

I. sakaiensis a été cultivé sur du milieu d'agarose à 1,5 % contenant 1,0 % de polypeptone, 0,2 % d'extrait de levure et 0,1 % de MgSO₄ pendant 4 jours à 30°C.

Une seule colonie de la plaque a étéensemencée dans un tube à essai (ø18 180 mm) contenant un film PET immergé dans du milieu YSV : 0,01 % d'extrait de levure, 0,02 % d'hydrogénocarbonate de sodium, 0,1 % de sulfate d'ammonium, 0,01 % de carbonate de calcium, 0,1 % mélange de vitamines (0,25 % de thiamine-HCl, 0,005 % de biotine et 0,05 % de vitamine B12) et 1 % des oligo-éléments dans un tampon phosphate 10 mm (pH 7,0) et agité à 300 tours/min à 30 °C.

Lorsque la période de culture était supérieure à 1 semaine, le fluide de culture a été remplacé par du milieu YSV frais chaque semaine.

- Microscopie électronique à balayage (MEB)

Après la culture d'*I. Sakaiensis* avec un film PET, le film a été immédiatement trempé dans du glutaraldéhyde à 2 % tamponné au phosphate pour la fixation des cellules.

2.4 Procédé de recyclage du PET par des champignons (*Penicillium simplicissimum*)

I. Données scientifiques de *Penicillium sp*

Le nom *Penicillium* est donné à un genre de champignons imparfaits (Deutéromycètes) qui comprend environ 300 espèces, réparties en quatre sous genres. Les formes parfaites (téléomorphes) de certaines d'entre elles sont connues, et appartiennent à l'embranchement des Ascomycota (genres *Eupenicillium* et *Talaromyces* notamment).

Ce sont des contaminants fréquents de nombreux substrats, notamment des aliments. Certains d'entre eux produisent des métabolites toxiques pour les mammifères [80].

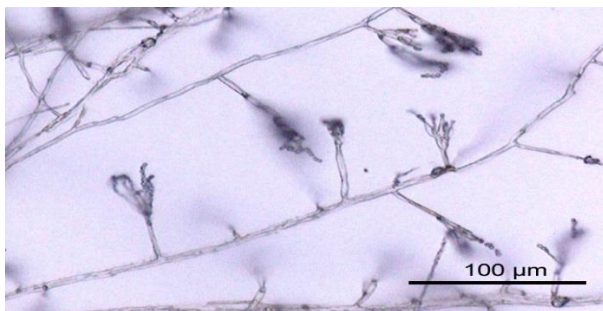


Figure 15 : Image microscopique de *Penicillium sp*. Grossissement : 200 [80].

a. Morphologie

Les *Penicillium* sont caractérisés par la présence de conidiophores dressés, plus ou moins ramifiés, terminés des phialides. Les phialides sont disposées en verticilles à l'extrémité des conidiophores. Elles sont insérées directement (*Penicillium monoverticillés*) ou par l'intermédiaire d'une rangée de métules (*Penicillium biverticillés*) ou de deux rangées successives de métules et rameaux (*Penicillium triverticillés*) sur les conidiophores. Les phialides sont serrées les unes contre les autres, l'ensemble donne une image de pinceau (ou pénicille). Les conidies produites en grand nombre par les phialides restent en chaîne et contribuent à donner à la tête conidienne un aspect en pinceau [80].

b. Physiologie

La température optimale de croissance des *Penicillium* se situe le plus souvent entre 20°C et 25°C. De ce fait, leur distribution est plutôt tempérée [80].

c. Classification

Les *Penicillium* sont les formes asexuées de plusieurs espèces d'Ascomycètes. Leur position systématique est : Fungi, Ascomycota, Pezizomycotina, Eurotiomycetes, Eurotiomycetidae, Eurotiales, Trichocomaceae. Pour la plupart des espèces la forme sexuée n'est pas connue ; les formes sexuées connues sont rattachées à différents genres notamment *Eupenicillium* ou *Talaromyces*.

Depuis une dizaine d'années la systématique des *Penicillium*, comme celle des autres groupes de Deutéromycètes, a considérablement évolué en fonction des nouvelles données apportées par les techniques de la biologie moléculaire ; et il est vraisemblable que cette évolution continuera.

La nomenclature a également été modifiée. Jusqu'à récemment l'identification et la classification des *Penicillium* étaient basées sur leurs caractères morphologiques et sur leurs caractères physiologiques. Ces critères sont maintenant supplantés par les méthodes basées sur l'étude des séquences d'ADN, mais elles restent valables dans un grand nombre de cas, et permettent au minimum de classer les espèces dans différents sous-groupes [80].

2.4.1 Moyens techniques utilisés

Cette expérience a été menée par Ramalingappa Bellibatlu (2014) [80].

- Prélèvement d'échantillon de sol

Un échantillon de sol a été collecté dans une décharge locale du district de Shivamogga, apporté au laboratoire et conservé dans des conditions de laboratoire pour une utilisation ultérieure.

- Isolement et identification des champignons du sol

La procédure d'enrichissement a été utilisée pour l'isolement des champignons où le polyéthylène téréphtalate a été utilisé comme seule source de carbone. Le champignon isolé a été identifié sur la base de son apparence microscopique et macroscopique à l'aide de manuels standard. Les colonies ont été conservées à 4 °C dans des géloses inclinées à 2 % de malt et d'extrait de levure.

- Dépistage des champignons pour la dégradation du polyéthylène téréphtalate :

a- Dosage sur plaque

Le champignon isolé a étéensemencé dans un milieu contenant 0,3 g de NH_4NO_3 , 0,5 g de K_2HPO_4 , 0,1 g de NaCl , 0,02 g de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 2 g d'agar, 0,5 g de polyéthylène téréphtalate et

100 ml d'eau distillée. Ce test sur plaque de gélose est également une méthode semi-quantitative simple pour connaître la dépolymérisation du polymère par l'organisme. Après inoculation avec des champignons dans un milieu contenant de fines particules de PET, la formation d'un creux clair autour de la colonie indique la première étape de la biodégradation fongique.

b- Dégradation du polyéthylène téréphtalate

Les disques préposés de PET autoclavé, stérilisé en surface et traité aux UV de 1 cm de diamètre préparés à partir de sacs en polyéthylène téréphtalate ont été transférés de manière aseptique dans la fiole conique contenant 50 ml de milieu salé minéral.

La stérilisation de surface a été effectuée en traitant des disques de polyéthylène téréphtalate avec de l'éthanol pendant 1 min, puis, ils ont été traités avec une solution d'hypochlorite de sodium pendant 3 min et ont été lavés avec de l'eau distillée stérile trois fois. Une boucle pleine d'organismes a été ajoutée au milieu. Le contrôle a été maintenu avec des disques de polyéthylène téréphtalate dans le milieu exempt de microbes.

Des triples ont été conservés pour chaque type de polyéthylène téréphtalate et laissés sur agitateur. Après 3 mois d'incubation, les disques en plastique ont été collectés, lavés abondamment à l'eau distillée, séchés dans une étuve à air chaud à 50 °C pendant une nuit puis pesés pour le poids final.

-Confirmation de la dégradation du PET :

La dégradation du PET a été confirmée par microscopie électronique à balayage, spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier et spectroscopie de résonance magnétique nucléaire.

2.5 Procédé de recyclage du PET par les vers de cire (*Achroia grisella*)

2.5.1 Données scientifiques d'*Achroia grisella*

Achroia grisella Fabricius, la petite teigne de la cire (Figure 16), est considérée comme un ravageur des abeilles mellifères inoccupées, *Apis* spp., des ruches et des matériaux de ruche entreposés. Cependant, les teignes de cire peuvent être considérées comme des insectes bénéfiques dans les colonies sauvages, car elles détruisent les rayons qui restent après la mort d'une colonie d'abeilles ou l'abandon du site de nidification. Ces rayons abandonnés abritent potentiellement des agents pathogènes et/ou des résidus de pesticides laissés par la colonie précédente. Les mites de cire consomment les rayons abandonnés, minimisant ainsi le risque d'exposition des futurs habitants de la cavité. Les petites teignes des cires ont un cycle de vie similaire à celui des grandes teignes des cires, *Galleria mellonella* [81].



Figure 16 : Une teigne de la cire adulte, *Achroia grisella*, sur un morceau de peigne à couvain [81].

Œufs : Les femelles adultes pondent généralement des œufs dans des crevasses protégées près d'une source de nourriture. Les œufs sont blanc crème et sphériques (Figure 17). Le temps qu'il faut aux œufs pour éclore est variable, avec des températures plus chaudes conduisant à un développement plus rapide pour tous les stades de la vie. Les œufs mettent généralement cinq à huit jours pour éclore [81].

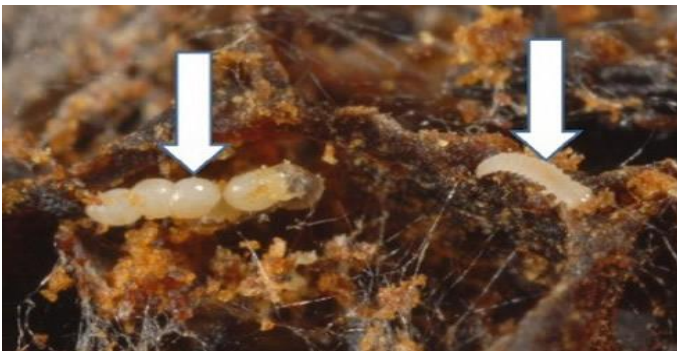


Figure 17 : œufs (à gauche) et un premier stade larvaire (à droite) de la petite teigne de la cire, *Achroia grisella*, des œufs et des larves de premier stade [82].

Larves : Les larves ont un corps blanc étroit avec une tête brune et un bouclier pronotal (Figure 18). Le développement larvaire peut prendre entre un et cinq mois, avec une moyenne de six à sept semaines à 29° à 32°C. Les larves subissent sept mues. La plupart de la croissance larvaire se produit au cours des deux derniers stades et les larves matures mesurent environ 20 mm de long. Les larves traversent des tunnels de filage de soie en peigne de cire d'abeille, qu'elles recouvrent d'excréments. Le stade larvaire est le seul stade de la vie qui se nourrit. Les larves consomment généralement des rayons contenant du couvain d'abeilles, du pollen et du miel. Les larves préfèrent le couvain et les rayons à pollen aux rayons vierges et/ou à miel. Cependant, les petites teignes des cires se nourrissent souvent sur le sol de la ruche parce que les plus grandes teignes des cires les supplantent pour le rayon de couvain souhaitable dans les zones où les deux espèces coexistent (Figure 18) [82].



Figure 18 : La pyrale de la cire au dernier stade, *Galleria mellonella* L., larve (en haut) et la petite teigne de la cire, *Achroia grisella* Fabricius, larve (en bas). Les deux espèces sont similaires en apparence, la principale différence étant la taille [82].

Pupes : Les larves matures se nymphosent n'importe où dans la ruche d'abeilles mellifères et tissent des cocons de soie résistants autour d'elles avant la nymphose. Les pupes mesurent environ 11 mm de long et sont de couleur jaune-ocre. Les cocons sont blancs et ont une sangle qui les maintient en place. Il peut être difficile d'identifier les cocons car ils sont souvent couverts d'excréments et d'autres débris. Les pupes peuvent prendre jusqu'à deux mois pour arriver à maturité, mais le temps moyen jusqu'à l'émergence des adultes est d'environ 37 jours [82].

Adultes : Les adultes de la petite teigne de la cire mesurent environ ½ pouce de long et ont un corps élancé. Leur envergure est d'environ ½ pouce de large. En général, les mâles sont plus petits que les femelles (Figure 19). Leur coloration va du gris argenté au beige et ils ont une tête jaune proéminente. Les adultes vivent environ une semaine et sont plus actifs la nuit. L'accouplement se produit généralement dans les ruches d'abeilles mellifères et les mâles attirent les femelles vers les sites d'accouplement avec des signaux ultrasonores. Les femelles pondent également leurs œufs la nuit. Pendant la journée, les adultes restent cachés dans les arbres et les buissons près des ruches [82].



Figure 19 : Comparaison des petites teignes femelles (à gauche) et mâles (à droite), *Achroia grisella*. Les photos sont à la même échelle. A noter que le mâle est plus petit que la femelle [82].

2.5.2 Procédures expérimentales

Cette expérience a été menée par Harsha Kundungal (2014) [83].

- Préparation des vers et les films PET

Des larves d'*A. Grisella* et de la cire en nid d'abeilles ont été récoltées dans les ruches d'*Apis cerana indica*, ferme apicole, Nilambur, Kerala, Inde. Un film d'emballage en polyéthylène téréphtalate haute densité ayant une épaisseur supérieure à 51 µm et une densité de 0,941 g/m³ a été acheté sur le marché local, Pondichéry, Inde.

- Prélèvements et identifications de spécimens

Sur la base de la morphologie, la larve collectée a été identifiée et validée à l'aide des monographies disponibles.

L'identité génétique des larves a été confirmée par des études de séquençage du gène du cytochrome oxydase mitochondriale.

- Biodégradation du PET

Pour évaluer la dégradation du PET, de petits vers de cire ont été laissés en contact avec le film de PET préposé dans un récipient en verre de 1000 ml.

Chaque conteneur a étéensemencé avec 100 petits vers de cire (poids moyen de 52,2 ± 3,6 mg/ver) plus 2,5 g de film PET. Les témoins ont été nourris avec PC. La perte de poids des films PC et PET en fonction du temps causée par une moindre consommation de vers de cire a été mesurée périodiquement. Pour une mesure précise du poids, le film PET a été lavé avec une solution de dodécylsulfate de sodium (SDS) à 2 % (v/v), puis avec de l'eau désionisée plusieurs fois et a été séché pendant 3 h à 40 °C et le pourcentage de perte de poids a été calculé en utilisant la formule suivante :

$$Perte\ de\ poids\ (\%) = \frac{\text{poids initial} - \text{Poids final}}{\text{poids initial}} \times 100$$

Pour vérifier le nombre de trous formés sur la surface du PET par une consommation moindre de vers de cire, les vers de cire individuels ont été laissés en contact direct avec le film PET et le nombre de trous produits a été compté à différents intervalles de temps.

2.6 Des bactéries pour fabrication du bioplastique grâce à l'espèce (*Pseudomonas putida*)

2.6.1 Données scientifiques de *Pseudomonas putida*

Identification taxinomique et historique des souches

Nom binomial : *Pseudomonas putida*

Désignation taxinomique :

- Règne : Bactéries
- Embranchement : Protéobactéries.
- Classe : Gammaprotéobactéries.
- Ordre : Pseudomonadales.
- Famille : *Pseudomonadaceae*.
- Genre : *Pseudomonas*.
- Espèce : *putida* [84].

Les synonymes les plus courants associés à l'espèce *P. putida* comprennent : *Pseudomonas ovalis* ; *Bacillus putidus* ; *Arthrobacter siderocapsulatus* ; et *Pseudomonas barkeri* [84].

Les membres du genre *Pseudomonas* sont des bactéries à Gram négatif, diversifiées, largement répandues et dominées par des colonisateurs saprophytes, non pathogènes, des écosystèmes du sol, de l'eau et de la rhizosphère ainsi que par des colonisateurs commensaux non pathogènes de la peau saine des humains (Figure 20). Historiquement, le genre *Pseudomonas sensu lato* comprenait des protéobactéries alpha, bêta, gamma-bêta et gamma, parmi lesquelles plusieurs ont probablement été reclassées selon les méthodes de taxonomie modernes.

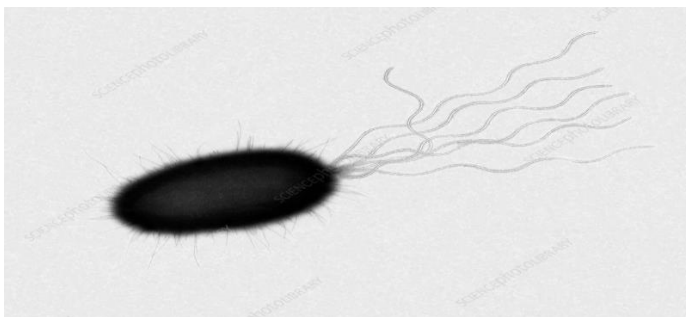


Figure 20 : Micrographie électronique à transmission de *Pseudomonas putida* Gram-négatif, aérobie, entérique, procaryote en bâtonnets avec flagelles polaires [84].

Présence naturelle

L'espèce *P. putida* se trouve dans la plupart des sols et des habitats aquatiques où il y a de l'oxygène disponible, mais elle pourrait être mieux adaptée aux milieux terrestres. Elle a été isolée de diverses sources, dont les suivantes :

Sols et rhizosphères

- Rhizosphères du riz au Brésil, des bananes dans les Antilles françaises, de la canne à sucre (lieu géographique non précisé) et du poids en Suède
- Échantillons de racines du soja et de l'eau des sols de cultures de soja (lieu non précisé) ; racines de la tomate et du blé (lieu non précisé).
- Plantes de maïs (elles sécrètent des substances allélochimiques qui attirent les bactéries *P. putida*) (lieu non précisé).
- Échantillons de sols du Japon, de l'Antarctique, de la zone sub-alpine de l'Himalaya, et un échantillon de sol de la cour d'une maison de la région métropolitaine de Louisville, KY (É.-U.) [84].

Animaux

- Peau de grenouille, Colombie.
- Coussinets plantaires, bouche et oreilles de chats, Louisville, KY, É.-U.
- Échantillons de reins provenant de différentes espèces de poissons d'ornement de Colombie, de Floride (É.-U.) et de Singapour [84].

Milieux aquatiques

- Dans des lacs et autour de certains lacs en Antarctique.
- Dans des milieux marins contaminés par des hydrocarbures en Malaisie.
- Dans des ruisseaux aux É.-U., à des concentrations de $6,9 \times 10^2$ cellules/ml à $7,3 \times 10^3$ cellules/ml, dans les sédiments, la concentration de *P. putida* variait de $5,7 \times 10^4$ cellules/g poids sec à $1,2 \times 10^7$ cellules/g.
- Dans des échantillons d'eau douce et de liqueur mixte d'eaux usées de la rivière Kat de Fort Beaufort et de la rivière Tyume de la ville d'Alice, en Afrique du Sud [84].

Humains

- Échantillons provenant des mains d'auxiliaires familiaux, Manhattan, É.-U. dans lesquels *P. fluorescens/putida* la bactérie étaient prédominante [84].

Environnements aménagés

- Cartes à bande magnétique d'hôpitaux du Royaume-Uni.
- Eau de réservoirs de distribution publique, au Massachusetts, É.-U.

- Surfaces, eaux et drains domestiques, ordures ménagères, Louisville, KY É.-U.
- Fauteuils dentaires en Finlande.
- Surfaces humides dans des hôpitaux, dont celles de certains drains et éviers, éléments en plastique, tubulures, appareils médicaux et solutions, en France et au Massachusetts, É.-U [84].

Aliments

- Viande réfrigérée avariée et poisson en Italie ; volaille et produits laitiers en Australie.
- Échantillons réfrigérés de laits de vache et de chèvre crus, en France et en Turquie [84].

2.6.2 Procédures expérimentales

Cette expérience a été menée par Iman H Gatea *et al.*, (2018) [84].

Collecte d'échantillons

Des échantillons de sol, des boues d'épuration et des déchets de détergents ont été collectés sur différents sites à Bagdad Isolement et purification des bactéries. Une séquence de séries de modèles environnementaux sélectionnés a été réalisée et étalée sur des plaques de milieu gélosé aux nutriments. Les plaques sont incubées à 30°C pendant 48 heures. Les colonies isolées ont été purifiées pour obtenir une seule colonie et ont maintenu une goutte inclinée à 4°C.

- Dépistage des producteurs de PHA

Le colorant Soudan Black B a été utilisé pour un test qualitatif de la production de PHA en tant que criblage rapide des producteurs de PHA. Le milieu gélosé nutritif additionné de glucose à 1 % a été autoclavé et versé dans des boîtes de Pétri. Après solidification, les plaques ont été inoculées avec les isolats bactériens. Les plaques ont été incubées à 30°C pendant 24 à 48 heures, pour éliminer l'excès de coloration des colonies, elles ont été lavées avec de l'éthanol à 98 %. Les colonies de couleur bleu foncé étaient positives pour la production de PHA.

- Détection du PHA avec le bleu du Nil

Les isolats positifs pour le noir Soudan B ont été davantage criblés par le bleu du Nil A, une coloration plus spécifique, qui est considérée comme un milieu gélosé nutritif riche en carbone, plus rapide et plus sensible, complété par 0,5 g/ml de Nil bleu A et inoculés avec des isolats bactériens et la croissance des cellules s'est produite en présence du colorant.

Après le bleu du Nil, une fluorescence orange vif lors de l'irradiation avec la lumière UV a été montrée à partir des colonies accumulant du PHA, et leur intensité de fluorescence a augmenté avec l'augmentation de la teneur en PHA des cellules bactériennes. Les isolats qui présentaient une fluorescence orange vif ont été sélectionnés comme accumulateurs de PHA.

- Milieu de production

Pour la production de PHA, la bactérie a été cultivée en milieu basal appelé milieu productif contenant (g/L) : $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1.0, KH_2PO_4 1.5, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 9.0, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.2, 1 ml de solution d'oligo-éléments ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 10, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.25, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1.0, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.5, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 2.0, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.23, 1.0 ml d'huile de friture usagée comme unique source de carbone. 100 ml de milieu ont été préparés, autoclavés et utilisés pour la production de PHA par les organismes.

Le pH a été ajusté à 7,0 avant la stérilisation. Conditions expérimentales : des expériences de lot ont été réalisées dans des flacons agités pour la production du bio polymère a été quantifiée dans des flacons agités comme expérimentations en lots. Des flacons ont été inoculés avec les isolats bactériens et incubés pendant 48 h à 30°C, 120 tour/min. Ensuite, le PHA produit a été extrait par la méthode au chloroforme et quantifié à l'aide d'un graphique standard d'acide crotonique.

- Extraction et analyse quantitative de PHA

Échantillon a été extrait du support de production, gé à 10 000 tour/min à 4°C pendant 20 min. Le surnageant a été jeté et 0,1 ml d'acétone a été ajouté au culot et conservé jusqu'à ce qu'il sèche.

Une fois l'acétone séchée, 1:1 de 500µl de NaClO et du chloroforme ont été Le mélange a été soigneusement mélangé et conservé pendant environ 30 minutes. Puis centrifugé à 10 000 tour/min pendant 30 min à 4°C pendant 20 min. Trois couches ont été formées : NaClO supérieur, débris cellulaires du milieu et chloroforme inférieur avec PHA.

La couche de chloroforme a été pipetée dans des bouteilles en verre. Conservé jusqu'à ce que le chloroforme sèche. Ensuite, 5 ml d'acide sulfurique ont été ajoutés dans les bouteilles et maintenus dans un four à air chaud à 100 °C pendant 1 heure, ce qui le convertit en acide crotonique. L'absorbance a été prise à 235 nm en utilisant de l'acide sulfurique comme blanc dans un spectrophotomètre UV.

- Quantification du PHA par spectrophotométrie

La poudre d'acide crotonique a été dissoute dans de l'acide sulfurique et une solution standard de 1 mg d'acide crotonique/10 ml d'acide sulfurique a été préparée. Une STD de travail de 100, 200, 300... 1000 µg/3 ml d'acide sulfurique a été préparée. Le blanc a été préparé en ajoutant 3 ml d'acide sulfurique. La lecture de l'absorbance a été effectuée à 235 nm. Un graphique standard de concentration en fonction de l'absorbance a été préparé.

CHAPITRE 3

RESULTATS ET DISCUSSION



3.1 Dégradation du PET par Des bactéries (*Ideonella sakaiensis*)

3.1.1 Résultat

Sur des échantillons environnementaux collectés et contaminés par des débris de PET, notamment des sédiments, du sol, des eaux usées et des boues activées sur un site de recyclage de bouteilles en PET.

À l'aide de ces échantillons, a été recherché des micro-organismes susceptibles d'utiliser un film PET comme principale source de carbone pour la croissance, le poids initial du film PET est 60 mg.

Ideonella sakaiensis a été capable de dégrader le film de polyéthylène téréphtalate. Cette méthode indiquant la capacité d'*Ideonella sakaiensis* d'utiliser le polyéthylène téréphtalate comme seule source de carbone. La perte de poids pour le PET était de 1,46 mg par jour à 30°C (2,56% par jour). Le film PET était très endommagé (Figure 21) et presque complètement dégradé après 6 semaines à 30°C.

Toutes ces études sont encore au stade expérimental, mais les résultats obtenus nous confirment la nécessité de faire passer ces expériences au stade industriel.

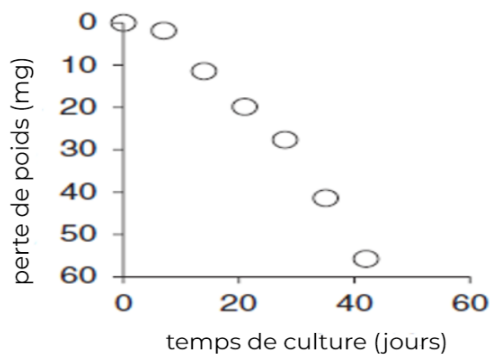


Figure 21 : Evolution dans le temps (jours) de la dégradation du PET (mg) par *I. sakaiensis* à 30°C.

3.1.2 Discussion

La biodégradation des déchets des plastiques par les bactéries (*Ideonella sakaiensis*) est une solution prometteuse pour l'élimination de ces déchets qui se répandent dans le monde entier, et constitue une véritable alternative aux techniques traditionnelles. Toutes ces études sont délicates au niveau du laboratoire. Mais devront continuer à se développer en technologie de biodégradation afin de contribuer à l'absorption efficace de ces déchets, ce qui ne peut se faire qu'en passant du stade du laboratoire au procédé industriel.

3.2 Dégradation du PET par des champignons (*Penicillium simplicissimum*)

3.2.1 Résultats

- **Dégradation du polyéthylène téréphtalate autoclavé** : *Penicillium simplicissimum* a été capable de dégrader le polyéthylène téréphtalate autoclavé, indiquant son capacité d'utiliser le polyéthylène téréphtalate comme seule source de carbone. La perte de poids pour le polyéthylène téréphtalate autoclavé était de 16 % (Tableau 3).

Tableau 3. Perte de poids du polyéthylène téréphtalate autoclavé.

poids initial (mg)	Poids final (mg)	Perte de poids (mg)	Perte de poids
0.10	0.084	0.016 ± 0.001	16%

± : Écart-type

- **Dégradation du polyéthylène téréphtalate traité aux UV** : *Penicillium simplicissimum* a été capable de dégrader le PET traité aux UV plus efficacement que l'autoclave et la surface stérilisée. La perte de poids pour le PET traité aux UV était de 38 % (Tableau 4).

Tableau 4. Perte de poids du polyéthylène téréphtalate traité aux UV.

poids initial (mg)	Poids final (mg)	Perte de poids (mg)	Perte de poids
0.10	0.062	0.038 ± 0.001	38%

± : Écart-type

- **Dégradation du polyéthylène téréphtalate stérilisé en surface (sans aucun traitement)** :

Penicillium simplicissimum a été capable de dégrader le PET stérilisé en surface. Cette méthode a confirmé que cet organisme peut utiliser le PET sans aucun prétraitement tel que la chaleur, la lumière UV et l'acide, la perte de poids pour le PET stérilisé en surface était de 7,7 % (Tableau 5).

Les résultats de ces expérimentations en laboratoire nous montrent la grande capacité de ces champignons à dégrader le PET et nous assurent qu'ils sont prêts à passer au stade industriel.

Tableau 5. Perte de poids du polyéthylène téréphtalate stérilisé en surface.

poids initial (mg)	Poids final (mg)	Perte de poids (mg)	Perte de poids
0.10	0.0923	0.0077 ± 0.0014	7.7%

± : Écart-type

3.2.2 Discussion

Les quantités de déchets plastiques augmentent de façon spectaculaire, des solutions si efficaces doivent être trouvées pour se débarrasser de ces déchets. La dégradation du plastique par les champignons est un projet assez encourageant en raison des résultats intéressants présentés par ces expériences, qui prédit son succès dans le processus d'élimination des déchets répandus par terre et par mer.

3.3 Dégradation du PET par les vers de cire (*Achroia grisella*)

3.3.1 Résultats

Les tests de dégradation du PET ont été effectués avec le petit ver de cire pendant 8 jours selon cette expérience. Les petits vers de cire étaient capables de mâcher et de faire des trous dans le film PET, lorsqu'il était laissé en contact direct avec le ver. Les trous ont commencé à apparaître après 45 min avec une estimation de 2,01 trous par ver et par heure.

À partir des 2,5 g de PET initiaux, la perte de poids totale à la fin de l'expérience était 1,46 g par le moindre ver de cire nourri de PET. Le pourcentage de perte de poids post-dégradation pour les films PET par un groupe de 100 petits vers à cire (*A. grisella*) a été calculé à 43,3 % du poids initial (2,5 g) en 8 jours correspond à une dégradation moyenne de 1,83 mg de PET par larve et par jour, la consommation de PET a augmenté tout au long de l'expérience (Figure 22).

La dégradation du PET par les vers de cire n'est encore que des expériences en laboratoire, en attendant le passage au stade industriel.

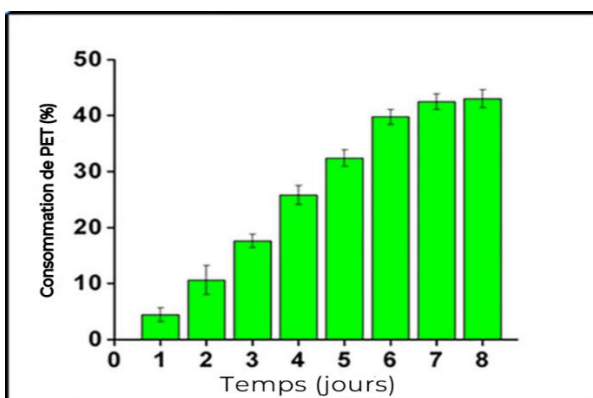


Figure 22 : Consommation de PET (%) dans le temps.

3.3.2 Discussion

La biodégradation des déchets plastiques par les vers de cire (*Achroia grisella*) est très récente. Il est considéré comme un projet prometteur pour réduire ces déchets dispersés dans toutes les parties de la terre et dans les mers et les océans, qui sont devenus une menace pour la vie de divers êtres vivants. Cette solution est susceptible de révolutionner ce domaine. Toutes ces études sont assez efficaces au niveau du laboratoire.

3.4 Production du bioplastique (plastique de type PHA) grâce à l'espèce (*Pseudomonas putida*)

3.4.1 Résultats

Dans la présente étude, 50 bactéries ont été isolées du sol, des boues d'épuration et des déchets pétroliers pour la production du plastique de type PHA.

La bactérie *P. putida* a été sélectionnée et criblée pour produire du PHA ; elle a été cultivée dans des milieux contenant du huile de maïs comme source de carbone standard. Nous avons remarqué que ces isolats bactériens étaient capables de produire des quantités importantes de PHA au cours de la croissance en utilisant les milieux de production contenant une seule source de carbone qui était l'huile de maïs.

La bactérie *P. putida* est efficace pour produire le matériau, le poids des cellules sèches était de 4,9 g/l tandis que le PHA atteignait 2,80 g/l, donnant 57 % de PHA, comme le montre le tableau 6.

Les quantités de plastique produites sont très faibles, ces expérimentations ont encore un long chemin à parcourir avant de passer à l'état industriel.

Tableau 6. Production de PHA par isolat bactérien *P. putida*.

Isolat bactérien	Biomasse g/l	PHA g/l	content PHA %
<i>P. putida</i>	4.90	2.80	57%

3.4.2 Discussion

La production de bioplastiques est une étude très récente, elle suscite un regain d'intérêt depuis le début des années 2000, c'est-à-dire que des micro-organismes peuvent les décomposer naturellement en matière organique, dans des conditions de température, d'humidité et d'oxygénation adéquates. Il est nécessaire de poursuivre les recherches dans ce domaine pour

atteindre des résultats efficaces qui nous permettent de produire du plastique écologique, biodégradable en quelques jours, au lieu du plastique traditionnel qui met des années à être dégradé son seule fin de vie possible est l'incinération. Ces bioplastiques pourront ainsi remplacer les (PET) utilisés et qui sont pour la plupart toxiques et dangereux pour l'environnement comme pour l'homme. Ce programme doit se poursuivre par la création d'une nouvelle filière de valorisation de ces déchets et cela ouvre la voie à une nouvelle ère sans pollution plastique.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Différentes actions de recherches nationales et internationales ont été encouragées ces dernières années devant l'ampleur de la pollution par les plastiques en mer. La compréhension des mécanismes de leur biodégradation en mer est à ses balbutiements. Si certains mécanismes ont été observés en condition de laboratoire, leur étude en milieu naturel reste largement inexplorée. Par exemple, les mécanismes moléculaires de bio-détérioration, bio-fragmentation, bio-assimilation et bio-minéralisation sont aujourd'hui inconnus. La diversité des microorganismes associés à ces différentes étapes de la biodégradation est également ignorée. La compréhension de ces processus permettra de mieux définir les taux de biodégradation des plastiques et de mieux prédire le devenir des plastiques dits « biodégradables » en mer.

La mer est le réceptacle ultime de tous les déchets produits sur terre (80% des déchets retrouvés en mer proviennent de la terre). La solution au problème de la pollution des plastiques en mer ne viendra certainement pas de la mer elle-même, mais d'une prise de conscience des citoyens qui sont responsables de cette pollution (plus de 30% des déchets plastiques retrouvés en mer proviennent d'un manque de collecte de la part des ménages). La récupération et le traitement des déchets des matières plastiques sont devenus un impératif qui gouverne pour tout développement. Cependant leur valorisation ne se développera que si les conditions suivantes sont réunies :

- le traitement doit répondre à un impératif écologique.
- le procédé utilisé doit être rentable économiquement.
- les déchets utilisés doivent pouvoir être approvisionnés régulièrement en quantité et qualité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] WRIGHT SL, KELLY FJ. (2017) Plastic and human health: a micro issue? *Environ Sci Technol*, 51:6634–6647.
- [2] PIKUDA O, GENBO XU, E, BERK D, TUFENKJI N. (2019) Toxicity assessments of micro- and nanoplastics can be confounded by preservatives in commercial formulations. *Environ Sci Technol Lett*. 6(1):21-25.
- [3] PAN Z, GUO H, CHEN H, WANG S, SUN X, ZOU Q, ZHANG Y, LIN H, CAI S, HUANG J. (2019) Microplastics in the Northwestern Pacific: abundance, distribution, and characteristics. *Sci Tot Environ*. 650:1913-1922.
- [4] ANDRADY A. (2017) The plastic in microplastics: A review. *Mar. Pollut. Bull*. 119, 12-22.
- [5] HELMENSTINE A. (2012) Plastic Definition. In *Chemistry About.com*. Chemistry. 49(1-2):33-42
- [6] REYNE, M. (1998) *Les plastiques*. Paris, PUF. p 125.
- [7] Lower S. (2009). *Polymers and Plastics: an Introduction*. In *Chem1 Virtual Textbook*. States of Matter. <http://www.chem1.com/acad/webtext/states/polymers.html>
- [8] SPERLING LH. (2006) *Introduction to physical polymer science*. 4th ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons, Inc. p 845.
- [9] VERSICOLOR AJ. (2015) towards a definition of microplastics: Considerations for the specification of physico-chemical properties. RIVM Letter report. Bilthoven (NL): National Institute for Public Health and the Environment. p 38.
- [10] ECKERT EM, DI CESARE A, KETTNER MT, ARIAS-ANDRES M, FONTANETO D, GROSSART HP, CORNO G. (2018) Microplastics increase impact of treated wastewater on freshwater microbial community. *Environ Pollut*. 234:495-502.
- [11] GESAMP [Joint Group of Experts on the Scientific Aspects]. (2016) Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: Part two of a global assessment. Dans : Kershaw PJ, Rochman CM, *Rapports et études No 93*. London, England: International Maritime Organization. p 220.

- [12] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. (2016) *The New Plastics Economy: Rethinking the Future of Plastics*. p 74.
- [13] BROWNE, MARK A. (2014) Sources and Pathways of Microplastics to Habitats, in: Bergmann: *Marine Anthropogenic Litter*, pp. 229–244, doi: 10.1007/978-3-319-16510-3_9.
- [14] GESAMP (2015) Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment. 98p
- [15] Geyer R., Jambeck J. R., Lavender Law K. (2017) Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances* 3, e1700782.
- [16] ENGLER RE. (2012) The complex interaction between marine debris and toxic chemicals in the ocean. *Environ Sci Technol*. 46(22):12302-12315.
- [17] ADEME, Marek C., Parisot F., ECOGEOS, Guyomard M. (2020) Lutte contre la pollution par les déchets plastiques en milieu marin. Synthèse. p9.
- [18] BARNES DK, GALGANI F, THOMPSON RC, BARLAZ M. (2009) Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philos Trans R Soc B Biol Sci*. 364:1985e98.
- [19] BRIASSOULIS D, BABOU E, HISKAKIS M, SCARASCIA G, PICUNO P, GUARDE D. (2013) mapping and analysis of the agricultural plastic waste generation and consolidation in Europe. *Waste Manag Res J Int Solid Wastes Public Clean Assoc ISWA*. 31:1262e78.
- [20] ACCINELLI C, ABBAS HK, SHIER WT, VICARI A, LITTLE NS, ALOISE MR. (2019) Degradation of microplastic seed film-coating fragments in soil. *Chemosphere*. 226:645e50.
- [21] ZUBRIS KAV, RICHARDS BK. (2005) Synthetic fibers as an indicator of land application of sludge. *Environ Pollut*. 138:201e11.
- [22] DEHGHANI S, MOORE F, AKHBARIZADEH R. (2017) Microplastic pollution in deposited urban dust, Tehran metropolis, Iran. *Environ Sci Pollut Res*. 24:20360e71.
- [23] RINKU VERMA, K. S. VINODA, M. PAPIREDDY, A.N.S GOWDA. . (2016) Toxic Pollutants from Plastic Waste- A Review. 701 – 708.
- [24] DRIS R, GASPERI J, MIRANDE C, MANDIN C, GUERROUACHE M, LANGLOIS V, TASSIN B. (2017) A first overview of textile fibers, including microplastics, in indoor and outdoor environments. *Environ Pollut*. 221:453-458.

- [25] WRIGHT SL, KELLY FJ. (2017) Plastic and human health: A micro issue? *Environ Sci Technol.* 51(12):6634-6647.
- [26] PATHAN SI *et al.* (2020) Soil Pollution from Micro- and Nanoplastic Debris: A Hidden and Unknown Biohazard. *Sustainability*, 12(18), 7255–31. <http://doi.org/10.3390/su12187255>
- [27] DRIS R *et al.* (2017) Sources and Fate of Microplastics in Urban Areas: A Focus on Paris Megacity <https://www.researchgate.net/publication/322177024>
- [28] FULLER S, GAUTAM A. (2016) A Procedure for Measuring Microplastics using Pressurized Fluid Extraction. *Environ. Sci. Technol.*, 50, 5774–5780.
- [29] Alimi OS, Farner Budarz J, Hernandez LM, Tufenkji N. (2018) Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: Aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport. *Environ Sci Technol.* 52(4):1704-1724.
- [30] ANDRADY, A. L. (2011) Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.* 62, 1596-1605.
- [31] MUSIOŁ, M., RYDZ, J, JANEKZEK H, RADECKA I, JIANG G, KOWALCZUK M. (2017) Forensic engineering of advanced polymeric materials Part IV: Case study of oxo-biodegradable polyethylene commercial bag – Aging in biotic and abiotic environment. *Waste Manage.* 64, 20-27.
- [32] YAKIMETS I, LAI D, GUIGON M. (2004) Effect of photo-oxidation cracks on behaviour of thick polypropylene samples. *Polym. Degradation Stab.* 86, 59-67.
- [33] LE GRAND A, MAXIME V, KEDZIERSKI M, DUVAL H, DOUZENEL P, SIRE O, LE TILLY V. (2017) Assessment and monitoring of water quality of the gulf of Morbihan, a littoral ecosystem under high anthropic pressure. *Mar. Pollut. Bull.* In Press.
- [34] NG EL, HUERTA LWANGA E, ELDRIDGE SM, JOHNSTON P, HU HW, GEISSEN V, CHEN D. (2018) An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Sci Total Environ.* 627:1377-1388.
- [35] NATHALIE GONTARD. (2019). interview réalisée pour la rédaction de ce rapport d'information.
- [36] LEBRETON L *et al.* (2017) River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications* volume 8, 15611.
- [37] GALGANI F *et al.* (2019) Monitoring and Assessment guidelines for Marine Litter in

Mediterranean MPAs. AMARE project, 57 p., <https://doi.org/10.13155/59840>

- [38] ERIKSEN M *et al.* (2014) Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion Plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLoS one*, 9(12), e111913.
- [39] CHIBA S *et al.* (2018) Human footprint in the abyss: 30 year records of deep-sea Plastic débris. *Marine Policy*, 96, 204-212.
- [40] VAN CAUWENBERGHE L, VANREUSEL A, MEES J, JANSSEN C R. (2013) Microplastic pollution in deep-sea sediments. *Environmental Pollution*. 182, 495-499.
- [41] ZETTLER E.R., MINCER T.J., AMARAL-ZETTLER L.A. (2013) Life in the "Plastisphere": Microbial Communities on Plastic Marine Debris. *Environmental Science & Technology*. 47, 7137-7146.
- [42] WEINSTEIN JE, CROCKER BK, GRAY AD. (2016) from macroplastic to microplastic: Degradation of high-density polyethylene, polypropylene, and polystyrene in a salt marsh habitat. *Environ Toxicol Chem*. 35(7):1632-1640.
- [43] BARNES D, MILNER P. (2005) Drifting plastic and its consequences for sessile organism dispersal in the Atlantic Ocean. *Marine Biology* 146: 815-825.
- [44] DEVI G P, KUMAR M, MADHAVI B, GUNTUR G C, GUNTUR A. (2014) Adverse effects of plastic on environment and human beings. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Science Special Issue 3*: 56-58.
- [45] ALBERTSSON A C, ANDERSSON S O, KARLSSON S. (1987) The mechanism of biodegradation of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability* 18:73-87.
- [46] DRIS R, GASPERI J, SAAD M, MIRANDE C, TASSIN B. (2016) Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment? *Mar Pollut Bull*. 104(1-2):290-293.
- [47] NOBLE WC, LIDWELL OM, KINGSTON D. (1963) The size distribution of airborne particles carrying micro-organisms. *J Hyg*. 61(4):385-391.
- [48] LUSHER AL, HERNANDEZ-MILIAN G, O'BRIEN J, BERROW S, O'CONNOR I, OFFICER R. (2015) Microplastic and macroplastic ingestion by a deep diving, oceanic cetacean: The True's beaked whale *Mesoplodon mirus*. *Environ Pollut*. 199:185-191.

- [49] PEEKEN I, PRIMPKE S, BEYER B, GUTERMANN J, KATLEIN C, KRUMPEN T, BERGMANN M, HEHEMANN L, GERDTS G. (2018) Arctic sea ice is an important temporal sink and means of transport for microplastic. *Nat Commun.* 9(1):1505.
- [50] PENG J, WANG J, CAI L. (2017) Current understanding of microplastics in the environment: Occurrence, fate, risks, and what we should do. *Integr Environ Assess Manag.* 13(3):476-482.
- [51] KLEIN M, FISCHER EK. (2019) Microplastic abundance in atmospheric deposition within the Metropolitan area of Hamburg, Germany. *Sci Total Environ.* 685:96-103.
- [52] Chris Walkinshaw, Penelope K. Lindeque, Richard Thompson, Trevor Tolhurst, Matthew Cole. (2019) Microplastics and seafood: lower trophic organisms at highest risk of Contamination
- [53] KOELMANS AA, MOHAMED NOR NH, HERMSEN E, KOOI M, MINTENIG SM, DE FRANCE J. (2019) Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. *Water Res.* 155:410-422.
- [54] BAKIR A, ROWLAND S J, THOMPSON R C. (2014) Enhanced desorption of persistent organic pollutants from microplastics under simulated physiological conditions. *Environ. Pollut.* 185, 16–23.
- [55] ALIMI O, FARNER B, HERNANDEZ L, TUFENKJI N. (2018) Microplastics and nanoplastics in aquatic environments: aggregation, deposition, and enhanced contaminant transport. *Environ. Sci. Technol.* 52, 1704–1724.
- [56] BAKIR A, O’CONNOR I, ROWLAND S, HENDRIKS A, THOMPSON R. (2016) Relative importance of microplastics as a pathway for the transfer of hydrophobic organic chemicals to marine life. *Environ. Pollut.* 219, 56–65.
- [57] HUANG W, SONG B, LIANG J, NIU Q, ZENG G, SHEN M, DENG J, LUO Y, WEN X, ZHANG Y. (2020) Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health.
- [58] WRIGHT S, KELLY F. (2017) Plastic and human health: A micro issue? *Environ Sci Technol.* 51(12):6634-6647.
- [59] BJORNDAL K, BOLTEN A, LAGUEUX C. (1994) Ingestion of marine debris by Juvenile Sea turtles in coastal Florida habitats. *Marine Pollution Bulletin*, 28, 154–158.
- [60] TAMARA S, GALLOWAY B. (2015) Micro- and Nano-plastics and Human Health.

- [61] DONALDSON K, TRAN C. (2002) Inflammation caused by particles and fibers. *Inhal Toxicol*, 14:5–27.
- [62] WHO (1997) Determination of airborne fibre number concentrations: a recommended method, by phasecontrast optical microscopy (membrane filter method).
- [63] PIMENTEL J, AVILA R, LOURENÇO A. (1975) Respiratory disease caused by synthetic fibres : A new occupational disease. *Thorax*, 30:204–219.
- [64] Gasperi J *et al.* (2018) Microplastics in air : Are we breathing it in ? *Curr Opin Environ Sci Health*. 1:1-5.
- [65] FLEMMING H, WINGENDER J. (2010) The biofilm matrix », *Nat Rev Micro*, vol. 8, no 9, p. 623-633.
- [66] CHATTERJEE A *et al.* (2011) Biofilm growth alters regulation of conjugation by a bacterial pheromone. *Mol Microbiol*. 81(6):1499-1510.
- [67] ECKERT EM *et al.* (2018) Microplastics increase impact of treated wastewater on freshwater microbial community. *Environ Pollut*. 234:495-502.
- [68] PRATA J C. (2018) Airborne microplastics: Consequences to human health? *Environ Pollut*. 234: 115-126.
- [69] BOUDET C. (2003) Voyage au cœur de la matière plastique (les microstructures des polymères). Ed, CNRS, Paris.
- [70] MORIN J C. (2000) Guide de l'utilisateur des profiles plastiques, syndicat national des profilés plastiques, Paris, France.
- [71] MARCO Y. (2003) Caractérisation multi-axiale du comportement et de la microstructure d'un semi-cristallin : application au cas du PET, Thèse de Doctorat, ENS Cachan, France.
- [72] IOANNIS AS, GIORGIA F, DAVIDE T. (2021) Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows, and barriers. p 694-705.
- [73] DESACHY C. (2001) Les déchets : sensibilisation à une gestion écologique. Ed, TEC & DOC.
- [74] HESTIN M. (2013) Etude des contraintes juridiques et techniques pour un marquage des produits portant sur les recommandations de tri. (www.ademe.fr).

- [75] GABIRAULT. (2013) Etude de valorisation des déchets plastiques de déchèterie.
(www.Exeltys.fr)
- [76] TOM TIETENBERG, LYNNE LEWIS. (2013) Économie de l'environnement et du développement durable. 0234-1498.
- [77] PROSTAK SERGIO. (2016) Ideonella sakaiensis: Newly-Discovered Bacterium Can Break Down, Metabolize Plastic. 0304-3894.
- [78] THOUNY LAURA. (2016) Une bactérie mangeuse de plastique, la solution pour dépolluer les océans.
- [79] KAZUMI HIRAGA, SHOSUKE YOSHIDA, SOMBOON TANASUPAWAT, KOHEI ODA, TOSHIHIKO TAKEHANA. (2016) *Ideonella sakaiensis* sp. nov., isolated from a microbial consortium that degrades poly(ethylene terephthalate), International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, vol. 66, n° 8, p. 2813-2818.
- [80] SOWMYA H, RAMALINGAPPA M, THIPPESWAMY B. (2014) Degradation of polyethylene by *Penicillium simplicissimum* isolated from local dumpsite of Shivamogga district. 0141-3910.
- [81] NATIONAL BEE UNIT. (2010) Wax moth. The Food and Environment Research Agency, New Zealand. 0261-2194.
- [82] ELLIS JD, GRAHAM JR, MORTENSEN A. (2013) Standard methods for wax moth research. Journal of Apicultural Research 52 : 1-17.
- [83] HARSHA KUNDUNGAL *et al.* (2019) Efficient biodegradation of polyethylene (HDPE) waste by the plastic-eating lesser waxworm (*Achroia grisella*). 0048-9697.
- [84] IMAN H GATEA *et al.* (2018) Isolation and characterization of *Pseudomonas putida* producing bioplastic (polyhydroxy alkanoate) from vegetable oil wastes. 469-473.