

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU**



**FACULTE DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES**  
**AGRONOMIQUES**  
*Département de Biologie*

## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

*En vue de l'obtention du diplôme du Master en Ecologie et environnement*  
*Spécialité : Biodiversité et environnement*  
*Thème*

# **SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE** **SUR LE PLASTIQUE**

Réalisé par :  
Mr CHABANE JUBA

*Devant le jury composé de:*

Présidente : Mme SAHMOUN F.

MAA à l'UMMTO

Promotrice : Mme SADOUDI-ALI AHMED D.

Professeur à l'UMMTO

Examinatrice : Mme CHIBANE G.

MAA à l'UMMTO

**Promotion : 2019/2020**



# *Remerciements*

❖ *Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma gratitude à ma promotrice Madame SADOUDI-ALI AHMED D., Professeur à l'université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou d'avoir accepté de m'encadrer et pour ses précieux et pertinents conseils dans l'élaboration de ce mémoire ainsi que sa disponibilité tout au long de mon travail.*

❖ *Je tiens à remercier également les membres du jury: Madame SAHMOUNE F. qui m'a fait l'honneur de présider le jury et Madame CHIBANE G .Qui a accepté d'examiner mon travail.*

❖ *Sans oublier d'exprimer ma gratitude à l'ensemble des enseignants de l'UMMTO en particulier ceux du Master BIODIVERSITE ET ENVIRONNEMENT qui ont et contribué à ma formation.*

❖ *Enfin, mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la concrétisation de ce travail.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail :*

*A mes très chers parents pour tout leur courage et leur soutien et d'avoir été là tout au long de mes études et aussi pour tout leur dévouement pour que je réussisse dans mes études et dans ma vie ; je ne les remercierai jamais assez.*

*A ma chère sœur Kamelia et mon frère Massinissa merci pour votre optimiste, dynamique, aide et soutien précieux.*

*Mes deux chères grands-mères et ma tante qui m'ont apporté assez de soutien pour réaliser ce travail.*

*A mes camarades de promo.*

*A mes amis.*

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE PLASTIQUE</b> .....	<b>3</b>
I.1. Historique sur les matières plastiques .....	4
I.2. Définition .....	5
I.3. Production et processus d'élaboration .....	6
I.4. Types de plastiques .....	7
<b>CHAPITRE II : POLYMERES ET POLYMERISATION</b> .....	<b>10</b>
II.1. Définition du polymère .....	10
II.2. Polymérisation .....	11
II.3. Classification des polymères.....	11
II.3.1. Selon leur comportement thermique .....	11
II.3.2. Selon leur nature chimique .....	13
II.3.3. Selon leur origine .....	13
II.3.4. Selon leur domaine d'application .....	13
II.3.5. Selon la structure de leurs chaînes (dimensionnalité) .....	13
II.4. Domaines d'application des matières des plastiques .....	15
II.5. Recyclage du plastique .....	16
II.5.1. Processus de collecte, de tri et de recyclage .....	16
II.5.2.1. Recyclage mécanique (matière) .....	17
II.5.2-2. Recyclage chimique .....	17
<b>CHAPITRE III : Plastiques et Environnement</b> .....	<b>18</b>
III.1. Toxicité du plastique et perturbation de la chaîne alimentaire .....	18
III.2. Impact du plastique sur le milieu marin .....	20
III.3. Risques pour les êtres vivants .....	21
III.4. Risques toxicologiques pour la santé humaine .....	22
III.5. Déplétion de la couche d'ozone .....	22
III.6. Origine des débris plastiques .....	22

<b>CHAPITRE IV : Biodégradation du plastique.....</b>	<b>24</b>
IV.    1. Définitions	
IV.1.1. Dégradation .....	24
IV.1.2. Biodegradation .....	25
IV.2. Mécanisme de biodégradation .....	25
IV.2.1. Processus biochimiques .....	26
IV.2.2. Processus enzymatiques .....	28
IV.2.3. Méthodes microbiologiques .....	28
IV.2.3.1. Méthode des zones claires .....	29
IV.2.4. Méthode respirométrique .....	29
IV.3. Facteurs biologiques de la biodégradation .....	31
IV.3.1. Influence des paramètres abiotiques .....	31
IV.3.2. Influence des paramètres intrinsèques .....	32
IV.3.3. Facteurs biologiques de la biodégradation .....	32
Exemple d'étude réalisée sur la dégradation du plastique .....	32
Conclusion .....	34
Références bibliographique.....	35

## LISTES DES FIGURES

<b>Figure 1:</b> Evolution sur l'apparition des différents polymères. ....	3
<b>Figure 2:</b> Marché d'utilisation du plastique dans le monde .....	4
<b>Figure 3:</b> Processus d'élaboration des thermoplastiques classiques .....	6
<b>Figure 4:</b> Structures moléculaires du PE, du PS et du PP et du PVC .....	10
<b>Figure 5 :</b> Structure moléculaire du PET .....	10
<b>Figure 6:</b> Représentation schématique d'un polymère thermoplastique .....	12
<b>Figure 7:</b> Illustration des thermodurcissables .....	12
<b>Figure 8 :</b> Illustration d'un exemple d'élastomère .....	13
<b>Figure 9 :</b> Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire .....	14
<b>Figure 10:</b> Représentation schématique d'un polymère Bidimensionnel (Carbone graphite),	14
<b>Figure 11:</b> Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel .....	15
<b>Figure 12:</b> (a) Tortue de mer ingérant du sachet plastique, (b) oiseau de mer ingérant du plastique .....	21
<b>Figure 13:</b> Différentes étapes de la biodégradation du plastique par les bactéries .....	27
<b>Figure 14:</b> Biofilm formé par <i>Rhodococcus ruber</i> C208 sur la surface de polyéthylène UV photooxydée, observé au microscope électronique à balayage. ....	28

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Nom, abréviation et formule chimique des principaux plastiques retrouvés dans les déchets. ....	9
Tableau II : Certains domaines d'application du plastique .....	16



Les polymères synthétiques sont apparus à la fin du dix-neuvième siècle vers les années 1860, mais ce n'est qu'après la seconde guerre mondiale que l'essor des plastiques a vraiment commencé. Depuis, nous observons un accroissement progressif de leur production, qui atteint ces dernières années plusieurs millions de tonnes/an(Shimao, 2001).

Grâce à leurs nombreuses propriétés, les plastiques sont utilisés dans de nombreux secteurs tels que l'alimentation, la médecine, les cosmétiques, les détergents et d'autres domaines chimiques, l'automobile et la santé (Shimao, 2001).

On estime même à plus de 8 milliards de tonnes la totalité des plastiques produites à ce jour. En 2016, la production mondiale de plastique a atteint 335 mégatonnes (Anonyme, 2017) Il ne fait aucun doute que les propriétés physiques et chimiques des plastiques font de ce matériau la norme dans d'innombrables domaines. Des propriétés telles que la dureté, la résistance à l'eau et diverses résistances à la dégradation représentent des normes d'intérêt pour les fabricants.

Les polymères plastiques les plus couramment utilisés pour divers emballages sont le polyéthylène (PE basse, moyenne ou haute densité), le polypropylène (PP), le polystyrène (PS), le polychlorure de vinyle (PVC), le polyuréthane (PUR), le phtalate d'éthylène (PET), polybutylène téréphtalate (PBT) et nylon (Shah et al., 2008). Ces matières synthétiques sont intrinsèquement présentes dans les écosystèmes naturels et provoquent diverses perturbations (Jambeck et *al.*, 2015).

Le plastique a été conçu à la base pour améliorer les conditions de vie de l'homme, mais aujourd'hui, il devient une véritable préoccupation environnementale. En effet, chaque année, des tonnes de plastiques sont fabriquées pour être utilisées sur une durée souvent limitée. Après utilisation, les plastiques deviennent des déchets qui peuvent finir leur course dans l'environnement s'ils ne sont pas traités. S'ils sont abandonnés sur le sol, ils atteindront et s'accumuleront dans les rivières, les fleuves, puis ils se retrouveront en fin de parcours dans les océans. On estime qu'au total environ 12 milliards de tonnes devraient se retrouver disséminées dans l'environnement d'ici 2050(Geyer,2017)

Les matières plastiques dérivées de ressources non renouvelables, tel le pétrole et le gaz naturel, forment la majeure partie des matières plastiques produites. Mais avant leur développement, les premiers plastiques prenaient leur origine dans le monde végétal et animal. On utilisait alors les ressources naturelles telles que la corne, le caoutchouc, le coton,

le bois et le sang pour élaborer des matières plastiques. Ces matières ont été délaissées au profit de ressources pétrolières pour des raisons économiques et techniques (Geyer,2017)

Cependant, l'utilisation de matières renouvelables connaît depuis quelques années un regain de popularité. Ceci s'explique par le choc pétrolier des années 1970, amenant l'instabilité des prix des ressources pétrolières, et la sensibilisation croissante de la population aux problèmes environnementaux (Thielen, 2012).

La pollution des milieux marins par les micros- et les macro-plastiques perturbe fortement l'équilibre des écosystèmes et entraîne des perturbations notamment lors d'ingestions par les organismes vivants. Afin de réduire cette pollution, différentes voies sont exploitées. En ce sens, de nombreux micro-organismes ont déjà été étudiés afin d'intervenir dans une dégradation biologique de polymères plastiques (Li et *al.*, 2016).

L'objectif de ce travail est de rapporter l'impact des matières plastiques sur l'environnement et sur la santé ainsi que les différents mécanismes de leur dégradation et de leur recyclage.

Ce travail est présenté en quatre chapitres :

Le premier rapporte des généralités sur le plastique, le deuxième traite le polymère et la polymérisation. Le troisième s'intitule plastique et environnement tandis que le quatrième chapitre concernera la biodégradation du plastique .Nous clôturera ce travail par une conclusion

I. Généralités sur les plastiques

I.1. Historique sur les matières plastiques

Les matières plastiques sont employées dans tous les secteurs de consommation avec une production mondiale dépassant les 300 millions par an depuis 2014 (Liberton et al., 2017 ;Matsuguma, 2017). L'évolution du plastique à travers les différentes révolutions et l'histoire de cette invention débutèrent depuis 1860(figure 1), jusqu'à la mise en forme du polypropylène en 1954 (Brydson, 1999 ; Gilbert, 2017). Depuis, les matériaux plastiques ont connu un développement continu et restent indispensables à de multiples applications de la vie quotidienne.

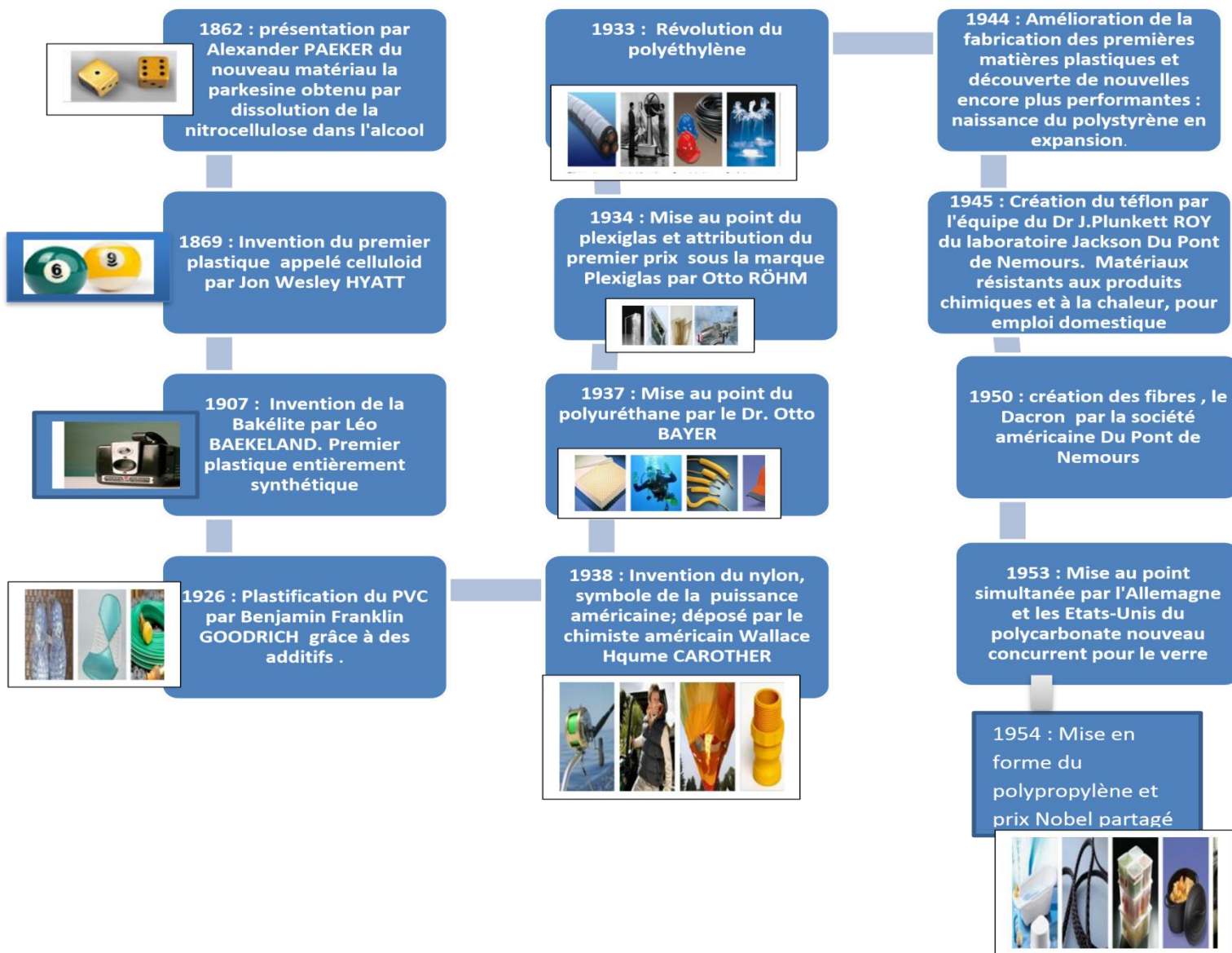
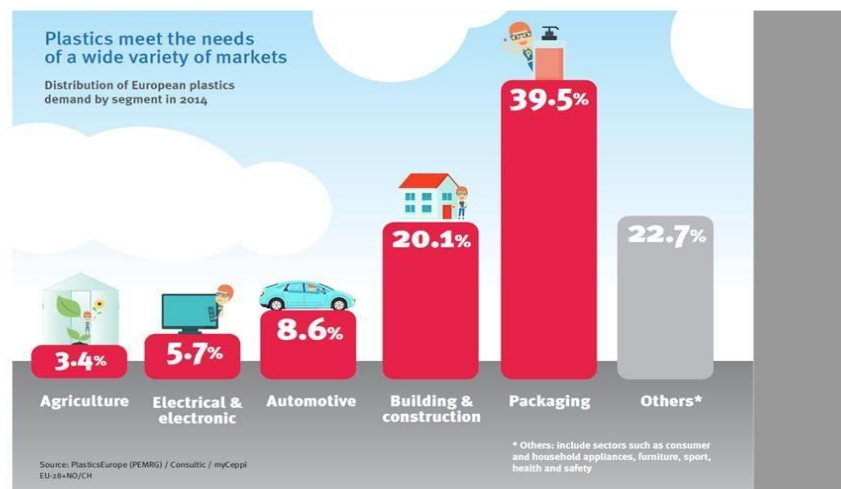


Figure 1: Historique sur l'apparition des différents polymères. (Brydson, 1999 ; Gilbert, 2016)

L'évolution du plastique corrélée à ses atouts majeurs, font de lui un matériau de substitution, au détriment des métaux (Gilbert, 2017). Ainsi, l'accroissement du plastique, et ses multiples applications, le placent au premier rang des parts de marché, devant les matériaux traditionnels (Duval, 2009). Sa consommation mondiale est passée de 1.500.000 tonnes en 1950 à 311.000.000 tonnes en 2014 (Cholake et al., 2017). Ses performances le rendent indispensable dans plusieurs domaines tels que l'automobile, l'agriculture et l'emballage (Figure 2).



**Figure 2:** Marché d'utilisation du plastique dans le monde (Lechner, 2014)

## I.2. Définition

Le terme « plastique » provient du latin *plasticus*, « relatif au modelage », emprunté du terme grec *plastikos*, « malléable, qui sert à modeler » (Rey, 1992)

La « matière plastique » se définit de la manière suivante : « matière synthétique, constituée de macromolécules obtenues par polymérisation ou polycondensation et qui peut être moulée ou modelée » (Rey, 2007).

La définition du terme « plastique » ramène prioritairement à la notion de mise en forme : « qui a le pouvoir de donner la forme » (Rey, 2007). En effet, le terme « plastique » a d'abord été employé en tant qu'adjectif : « qui vise la reproduction ou la création de formes par modelage », se rapprochant de l'expression art plastique (Rey, 2007). Ainsi, le terme plastique semble avoir été depuis toujours associé à la mise en forme. Il est à noter que le terme « plastique », utilisé comme nom commun, constitue une ellipse de « matière plastique » (Rey, 2007).

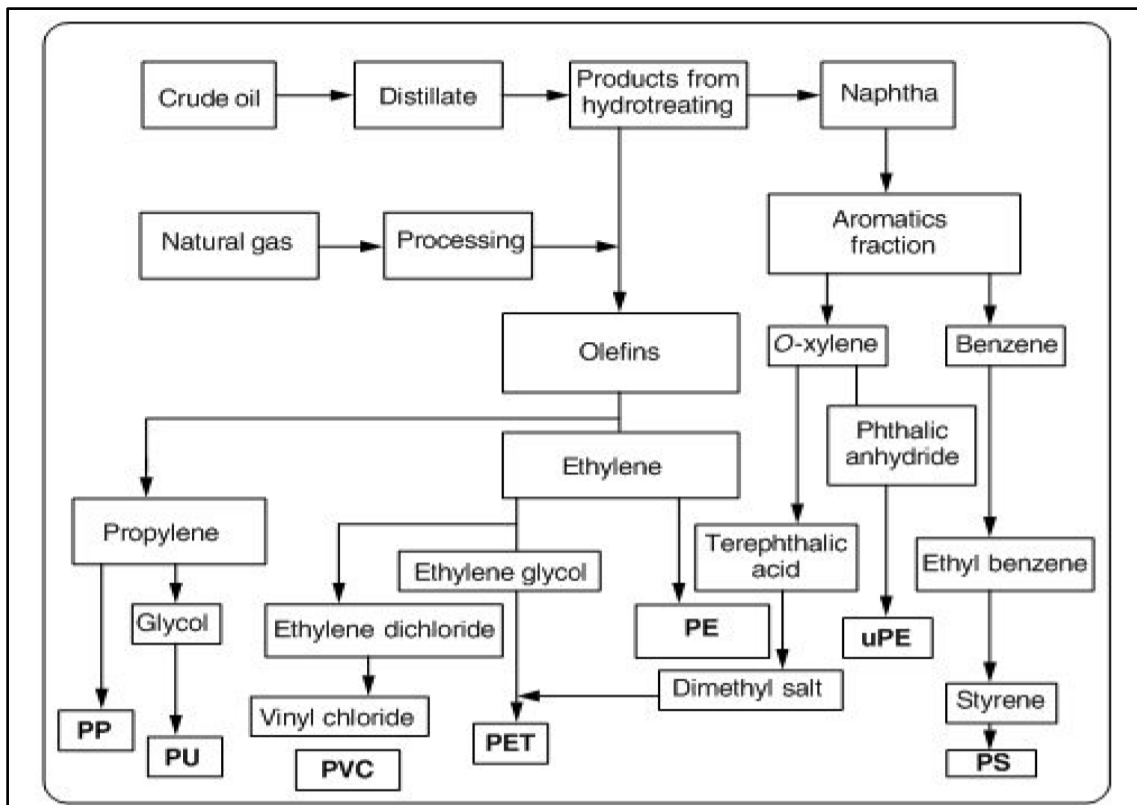
Dans le domaine de la chimie, plusieurs définitions sont proposées. Des définitions partielles, très larges et incomplètes, sont données : « n'importe quelle matière qui peut être chauffée ou moulée et qui conserve sa forme une fois refroidie est un plastique » (CCSP, 2009b) ou « matière intrinsèquement sans forme pouvant être moulée ou modelée sous la chaleur et/ou la pression » (Koch, 2013).

Les matières plastiques présentent plusieurs avantages par rapport à d'autres matériaux à savoir :

- Faible densité ;
- Peu altérables face à l'humidité, à la corrosion, aux agents chimiques, aux bactéries et aux champignons ;
- Peu coûteuses à produire ;
- Imperméables à l'eau, aux gaz et aux solvants ;
- Grande résistance mécanique ;
- Isolants électriques, thermiques ou acoustiques ;
- Non-altération de la qualité des aliments ;
- Aseptiques et faciles d'entretien ;
- Etirables pour certaines ;
- Translucides ou transparentes pour certaines ;
- Faciles de coloration ;
- Recyclables pour certaines.

### **I.3. Production et processus d'élaboration**

Les matières plastiques synthétiques sont essentiellement produites à partir de monomères issus de la pétrochimie (Reyne, 1998). Elles sont produites à partir de charbon ou de gaz naturel, bien que le pétrole soit le matériau brut le plus utilisé pour la production des matières plastiques (PHS, 2010). Les raffineries créent des sous-produits dans les tours de raffinage à partir du pétrole brut (Reyne, 1998). C'est à cette étape que seront séparés par distillation l'essence, les naphthes, la paraffine, le diésel et les huiles lourdes (PHS, 2010). La figure 3 présente le processus d'élaboration des thermoplastiques courants à partir du pétrole et du gaz naturel.



**Figure 3:**Processus d'élaboration des thermoplastiques classiques ( Andrady, 2003b)

Le producteur de matières plastiques utilise donc comme intrant les nappes ou les oléfines, qu'il transformera, par vapocraquage, en intermédiaires, les monomères tels l'éthylène, le propylène, le butène et autres hydrocarbures insaturés (Reyne, 1998 ; PHS, 2010). Ces monomères seront transformés en polymères, se présentant sous forme de poudre solide ou de résine liquide (Reyne, 1998).

Les industriels utilisent les polymères sous forme de granules. Les polymères produits sous forme de poudre ou de résine doivent être soumis à un processus d'extrusion (Reyne, 1998). Les polymères sont rarement utilisés seuls, d'autres produits entrent dans la composition des matières plastiques (PHS, 2010). Des additifs ou adjuvants sont ajoutés afin d'améliorer certaines propriétés physicochimiques (Reyne, 1998). Les deux termes ne sont pas à confondre. Les additifs peuvent représenter une part importante de la matière plastique, ils sont ajoutés dans des proportions allant jusqu'à 50 % de celle-ci, tandis que les adjuvants ne seront employés que dans de faibles proportions, généralement inférieures à 2 % (Reyne, 1998). Six types d'additifs sont employés : les renforts, les charges, les plastifiants, les stabilisants, les antioxydants et les colorants (Reyne, 1998).

**a. Les renforts** sont utilisés pour accroître la tenue mécanique et la rigidité ( fibre de verre, carbone).

**b. Les charges** sont ajoutées afin d'apporter une propriété spécifique (talc, calcaire) ou comme matériel de charge pour réduire le coût (farine de bois, coton, cellulose)(Reyne, 1998).

**c. Les plastifiants** sont utilisés pour donner de la souplesse et réduire la fragilité (phosphates, palatales, adirâtes, sébacées, stéarates, glycols), surtout dans les PVC; les stabilisants (sels, stéarates), et les antioxydants (amines aromatiques, dérivés phénoliques), dans les PE, PP et PS,. Enfin, les colorants sont utilisés pour modifier l'apparence de la matière (pigments minéraux ou organiques) (Reyne, 1998).

**d. Les adjuvants** confèrent des propriétés diverses.

**e. Les réticulant** apportent une structure pontée qui mène aux thermodurcissables.

**f. Les gonflants** apportent une structure cellulaire. Les solvants facilitent l'enduction ou l'imprégnation.

**g. Les anti-UV** retardent la dégradation photochimique.

**h. Les antistatiques** dissipent l'accumulation de charges électriques. Les tensio-actifs jouent un rôle de dispersant.

**i. Les lubrifiants** facilitent le démoulage. Des fongicides, ignifugeants et désodorisants peuvent, également être ajoutés (Reyne, 1998).

#### I.4. Types de plastiques

Les plastiques sont réparties en trois catégories principales :

**a. Les thermoplastiques** : ce sont des polymères obtenus à partir de petites molécules carbonés qui, sous l'effet de la chaleur, fondent et redeviennent rigides à température ambiante. Cette catégorie représente 75% des déchets plastiques (Abbou, 2009) Les liaisons de ces plastiques sont faibles et peuvent être rompues lorsqu'elles sont chauffées et se reforment une fois la matière refroidie. Parmi les thermoplastiques, les catégories les plus utilisées sont :

•**PEHD** (Polyéthylène Haute Densité) utilisé dans des applications à parois épaisses rigides notamment pour les bouteilles de lait, de détergent et de produits ménagers, flacons de shampoing, certains sacs poubelles, bouteilles d'huile, barquettes et pots de yaourt, etc. ;

•**PE** (Polyéthylène) est le plastique le plus courant et le moins cher, il constitue un bon isolant électrique. Grâce à ses propriétés, il peut être réutilisé facilement ;

•**PET** (Polyéthylène téréphtalate) est utilisé essentiellement dans les emballages (bouteilles, pots, barquettes) notamment pour la fabrication de bouteilles à usage unique car il est léger, n'est pas coûteux et se recycle facilement. Il est, également, utilisé dans la fabrication de pièces d'équipement et d'automobile. Il est employé en fibres textiles ;

•**PEBD** (Polyéthylène Basse Densité) sert à la fabrication des films d'emballage, sacs poubelles, films pour l'agriculture, etc. ;

•**PP** (Polypropylène) est un polymère très utilisé car il est facile à colorer et n'absorbe pas l'eau. Il est utilisé dans la fabrication des fibres synthétiques et équipements automobiles, pots et flacons etc. ;

•**PVC** (Polychlorure de Vinyle) est un plastique très instable qui se brise facilement, toutefois, il constitue un bon isolant électrique, peu combustible et résistant à la chaleur. Il sert à produire des barquettes, des boites alimentaires, les tuyaux de canalisation, etc. ;

•**PS** (Polystyrène) est un plastique dur et cassant employé essentiellement dans la fabrication des emballages à usage unique pour viande, glace, appareils électriques, tasses et assiettes, les barquettes et pots utilisés dans l'alimentation etc.

**b. Les thermodurcissables** : ils ont la particularité de devenir insolubles (ils ne peuvent pas se dissoudre) et infusibles (ils ne peuvent pas être fondus) après polymérisation. Ils ne peuvent plus subir des modifications après refroidissement du fait de leur rigidité. Ce sont généralement des polyesters insaturés (Abbou, 2009). C'est le cas des cabines de bateaux, piscines, toitures et vernis. Ces plastiques possèdent des liaisons chimiques solides qui ne se cassent pas sous l'effet de la chaleur. Parmi ces plastiques, citons :

• Polyuréthanes ;

• Polyesters ;

• Epoxydes ;

• Phénoliques ;



• Bakélite (résine synthétique) ;

• Mélamine.

**c. Les élastomères** : Un élastomère est un polymère présentant des propriétés « élastiques », obtenues après réticulation. Il supporte de très grandes déformations avant rupture. Le terme de « caoutchouc » est un synonyme usuel d'élastomère, il est utilisé essentiellement pour la fabrication de pneumatiques, joints, gants médicaux, chaussures, etc (Abbou, 2009).

Le tableau I rapporte le nom, l'abréviation et la formule chimique des quelques plastiques trouvée dans les déchets.

**Tableau I** : Nom, abréviation et formule chimique des principaux plastiques retrouvés dans les déchets (Abbou, 2009).

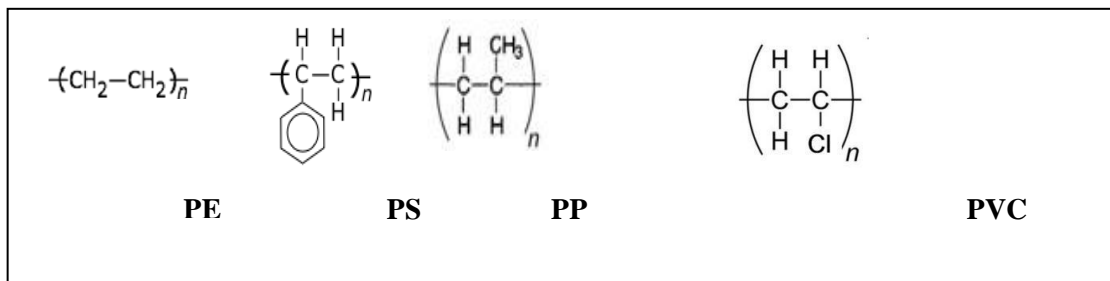
Nom	Abréviation	Formule chimique
Polyéthylène	PE	$-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-$
Polypropylène	PP	$-\left[ \begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH} \\   \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n-$
Polystyrène	PS	$-(\text{CH}_2-\text{CH})_n-$ 
Poly(téréphtalate d'éthylène)	PET	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\underset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-\text{C}_6\text{H}_4-\underset{\text{O}}{\underset{\parallel}{\text{C}}}-$
Polychlorure de vinyle	PVC	$-(\text{CH}_2-\text{CH})_n-$ 

**Chapitre II : Polymère et polymérisation**

**II.1. Définition du polymère**

Les matières plastiques sont faites de polymères. Puisque la plupart des matières plastiques sont constituées d'un seul type de polymère, par exemple le polyéthylène (PE), le terme « polymère » est généralement employé par extension pour désigner les matières plastiques.

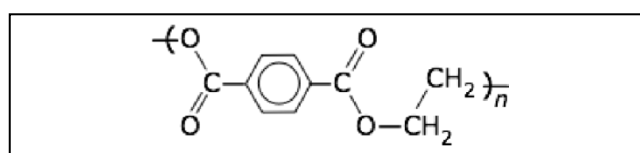
Un polymère est un assemblage de plusieurs monomères, des molécules de base chimiquement liées en une macromolécule (Reyne, 1998). La longue chaîne du polymère rassemble les monomères de manière structurée (Anonyme, 2007). La formule chimique d'un polymère rappelle la formule du monomère en ajoutant la lettre « n », précisant que le monomère est répété n fois dans la chaîne (Olivier, 2013). La figure 4 présente les formules de quatre polymères : le polyéthylène (PE), le polystyrène (PS), le polypropylène (PP) et le polychlorure de vinyle (PVC).



**Figure 4:** Structures moléculaires du PE, du PS et du PP et du PVC (Lower, 2009)

Dans les cas des PE, PS, PP et PVC de la figure 4 chaque polymère n'est formé que d'un seul type de monomère. Par exemple, le PE n'est composé que de monomères d'éthylène, le PS n'est composé que de monomères de styrène, le PP n'est composé que de monomères de propylène et le PVC n'est composé que de monomères de chlorure de vinyle. D'autres polymères sont composés de monomères de différentes natures assemblés en alternance (Olivier, 2013). C'est le cas pour le polyéthylène téréphtalate (PET) qui résulte d'un assemblage d'acide téréphtalique et d'éthylène glycol (Olivier, 2013).

La formule chimique du PET est présentée dans la figure 5. Le d'éthylène peut être reconnu par la formation  $CH_2-CH_2$ .



**Figure 5 :** Structure moléculaire du PET (Lower, 2009)

Tous les polymères courants sont formés d'une chaîne d'atomes de carbone comportant l'hydrogène (Reyne, 1998). Certains polymères intègrent aussi l'oxygène ou le silicium, le chlore, le fluor, l'azote, le phosphore ou le soufre (CCSP, 2009b).

### **II.2. Polymérisation**

La polymérisation est le terme générique qui décrit tout type de réaction de formation des polymères résultant de l'assemblage de monomères en de longues chaînes (SDP, 2010). Les plus courantes sont la polycondensation et la polyaddition (Anonyme, 2007).

#### **II.2.1. Polycondensation**

Elle implique des monomères de bases différentes qui se lient entre eux (Lower, 2009). Cette réaction génère une petite molécule comme résidu, qui consiste souvent en H<sub>2</sub>O ou en HCl (Cantor, 2011). Par exemple, lors de la polymérisation du PET, chaque arrivage d'acide téréphtalique et d'éthylène glycol entraîne le rejet d'une molécule d'eau (Olivier, 2013).

#### **II.2.2. Polyaddition**

Elle utilise plutôt l'ouverture des insaturations des monomères (liens doubles ou liens triples) pour lier successivement les monomères. Elle requiert l'initiation par un catalyseur sur un premier monomère, puis la réaction se déroule spontanément en chaîne (Reyne, 1998). Les matières plastiques courantes qui résultent de la polyaddition sont le PE, le PP et le PVC (Anonyme, 2007). Peu importe le type de réaction, celle-ci se fera généralement sous l'effet de la chaleur et de la pression (Cantor, 2011).

### **II.3. Classification des polymères**

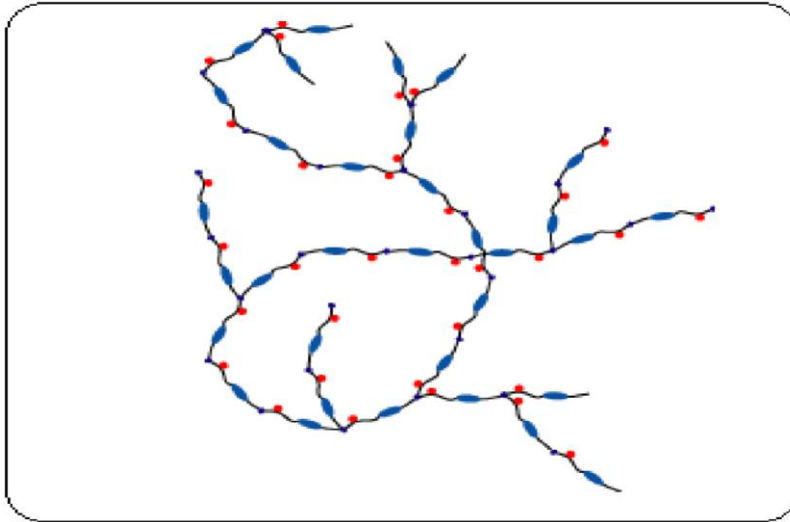
Il existe plusieurs modes de classification des polymères. Ils sont classés selon divers critères :

#### **II.3.1. Selon leur comportement thermique**

Les propriétés des polymères permettent des usages très variés. On peut ainsi les regrouper dans quatre familles :

##### **a. Les thermoplastiques**

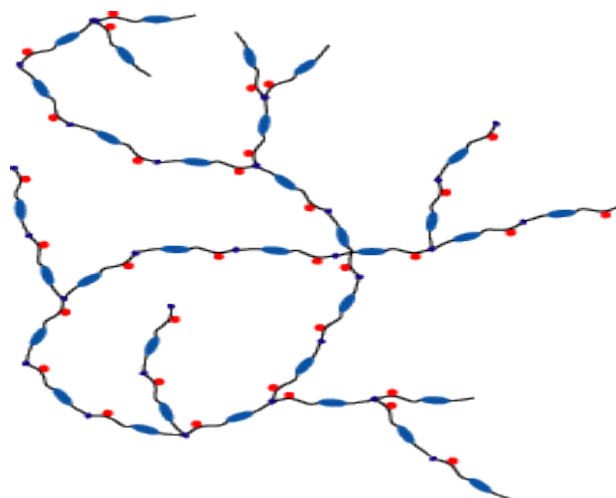
Ce sont des polymères linéaires ou ramifiés pouvant être ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique. Ces polymères peuvent être cristallins, thermoplastes amorphes ou thermoplastes semi-cristallins comme le polyéthylène (PE), le poly chlorure de vinyle (PVC) ou le polystyrène (PS). Ils sont mis en forme par diverses techniques comme l'injection, l'injection-soufflage et l'extrusion (figure 6).



**Figure 6:** Représentation schématique d'un polymère thermoplastique (Fontanille et *al.*, 2005)

**b. Les thermodurcissables**

Ce sont des produits (poudre à mouler solide ou résine liquide) transformé irréversiblement par polymérisation en un réseau tridimensionnel infusible et insoluble que l'on qualifie de thermodurcissable (figure 7). Il est souvent dans l'usage de l'industrie, d'employer abusivement le terme thermodurcissable pour désigner à la fois le système réactif initial, soluble et fusible et le produit final et infusible. Le réactif initial peut être composé d'un monomère ou d'un mélange de monomères ou plus fréquemment d'un mélange des polymères linéaires de faible masse molaire (Fontanille et *al.*, 2005)



**Figure 7:** Représentation schématique d'un polymère thermodurcissables (Fontanille et *al.*, 2005)

### a. Les élastomères

Ce sont des polymères linéaires ou ramifiés transformés par vulcanisation en un réseau tridimensionnel faiblement réticulé infusible et insoluble. Ils se différencient des thermodurcissables par leurs propriétés d'élasticité caoutchoutière, c'est-à-dire la capacité à subir de très grandes déformations réversibles sous l'action de contraintes mécaniques (figure8). (Fontanille et *al.*, 2005)



**Figure 8 :** Illustration d'un exemple d'élastomère (pneu) (anonyme,2011)

### II.3.2 Selon leur nature chimique

On distingue selon Anonyme( 2006)

- a. Polymères minéraux ;
- b. Polymères organiques ;
- c. Polymères mixtes.

### II.3.3 Selon leur origine

On peut classer les polymères en trois catégories : les polymères naturels, les polymères artificiels et les polymères synthétiques (Fontanille et *al.*, 2005)

### II.3.4 Selon leur domaine d'application

Il est difficile de proposer une classification exhaustive tant la variété des propriétés a multiplié les applications des polymères, comme matériaux en particulier. Il est cependant possible de regrouper les polymères en trois grandes catégories :

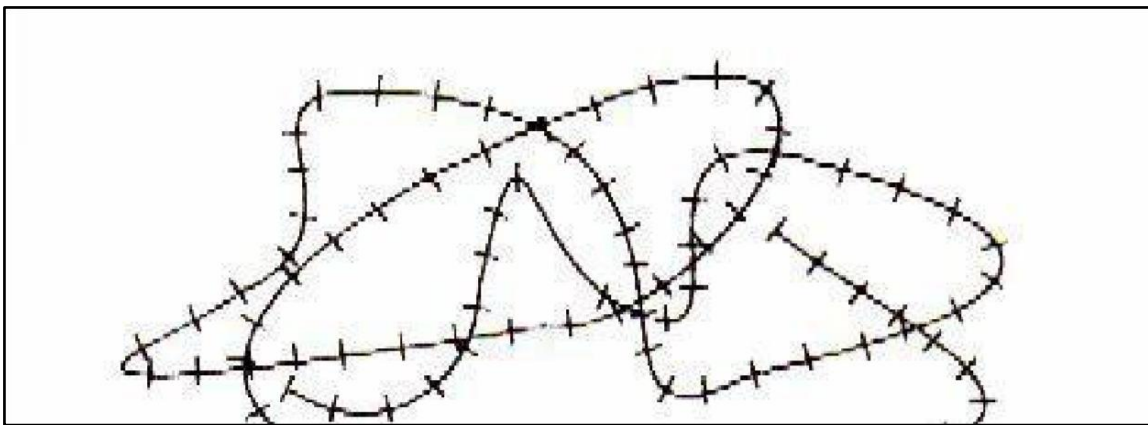
- a. Les polymères de grande diffusion ;
- b. Les polymères techniques ;
- c. Les polymères spéciaux (ou polymères de fonction)(Boulechfar et *al.*, 2007)

### II.3.5 Selon la structure de leurs chaînes (dimensionnalité)

Les polymères sont classés en trois catégories :

**a. Polymères linéaires (ou monodimensionnels)**

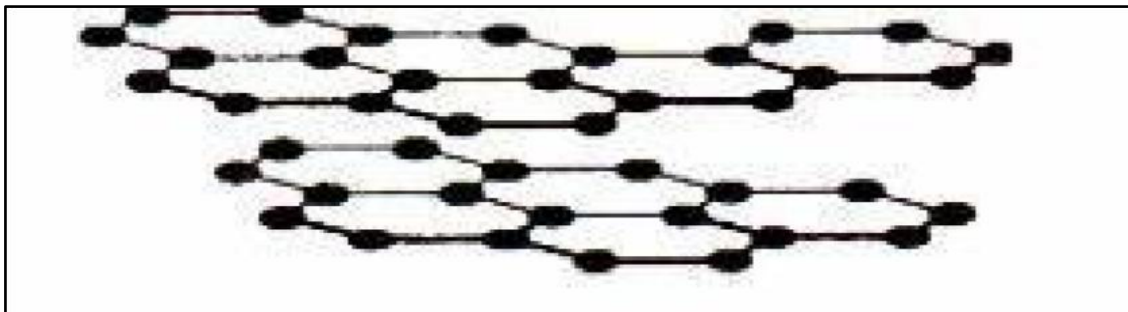
Pour ces polymères chaque chaîne macromoléculaire est constituée d'un nombre élevé mais fini d'unités monomères ; de tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents. Une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles figurant chacun une unité monomère (figure 9) ; un ensemble de chaînes polymères est constitué d'entités de longueur propre désignée par le terme de poly molécularité.



**Figure 9 :** Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire (Anonyme, 2018)

**b. Polymères bidimensionnels**

Certains de ces polymères peuvent être produits par la nature (carbone graphite, kératine...). Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples (figure 10).

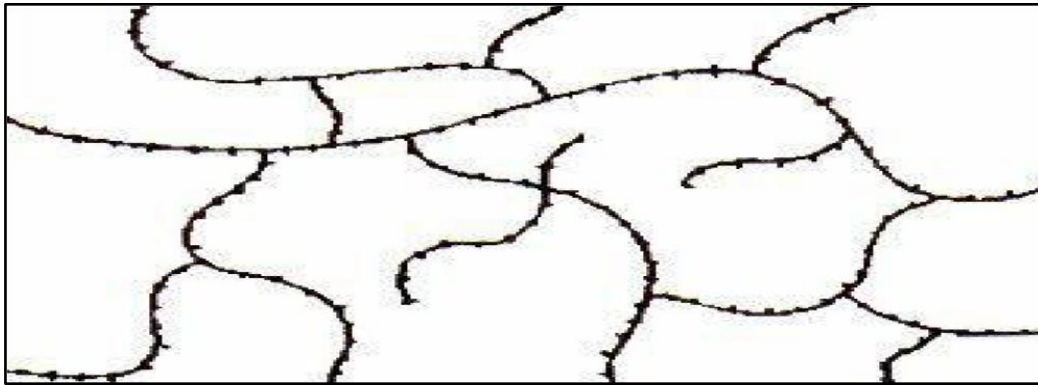


**Figure 10:** Représentation schématique d'un polymère bidimensionnel (Carbone graphite),

(Anonyme, 2018)

### c. Polymères tridimensionnels

Ces polymères résultent de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ou encore de la réticulation, par voie physique ou chimique, de polymères linéaires. (Figure 11)



**Figure 11:** Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel (anonyme 2018)

### II.3.6 Selon leur importance économique

Pour les polymères, comme pour tous produits industriels, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix. Ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères commerciaux :

- ❖ Les polymères de grande diffusion : dont le volume des ventes et de production est élevé et dont le prix est faible. C'est le cas du PE, PP, PS, PVC ;
- ❖ Les polymères à hautes performances : dont le volume des ventes est le plus faible et les prix sont les plus élevés ;
- ❖ Les polymères techniques : dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes, cas des polyamides et du polyéthylène

### II.4. Domaines d'application des matières des plastiques

Le plastique se trouve dans différents domaines d'application, le tableau II ci-dessous résume certains usages

**Tableau II:** Certains domaines d’application du plastique

Usages	Exemples
Emballage	<b>Alimentaire</b> : Bouteilles de lait d’huile et graisses, pots de yaourt <b>Industriel</b> : Emballages de pièces industrielles et sacs poubelles
Transports	Citernes routières Caisses de camions frigorifiques Feux de position et tapis de voiture
Industrie électrique lourde et électrodomestique	Planche de tableau en bakélite Composants pour radio, corps et aspirateurs
Industrie chimique	Revêtements de cuves Cuves de stockage
Bâtiment	Revêtement de sols et dalles Toitures et bardage Peintures extérieures et intérieures Faux plafonds, rampes d'escalier
Agriculture	Tubes d'irrigation et de drainage Bacs à fleurs, bancs de jardin

### II.5. Recyclage du plastique

Le recyclage existait depuis l’âge de bronze (BENSAADA et al., 2015) (il y a 6000 ans), mais ce n’est qu’à partir du 19<sup>ème</sup> siècle qu’il s’est accentué notamment avec l’industrialisation massive et le changement dans les modes de vie et de consommation. En effet, à partir des années 1970 et avec la mise en place du rapport Meadows « Halte à la croissance » pour dénoncer les surexploitations des ressources naturelles, le recyclage est placé comme un des procédés qui permet d’économiser les ressources et l’énergie dans une logique de développement durable. Par ailleurs, le recyclage des déchets plastiques devient de plus en plus important car il permet de transformer les déchets en ressources qui, sous la pression conjuguée de l’évolution démographique et de l’épuisement relatif des matières premières, deviennent indispensables à l’économie mondiale.

### II.5.1. Processus de collecte, de tri et de recyclage du plastique

#### II.5.1.1. Collecte et tri

Les déchets plastiques qui sont produits par les entreprises, les ménages et les administrations publiques doivent d'abord être collectés, triés avant d'être recyclés.

##### ❖ 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. Les déchets non recyclables sont incinérés ou enfouis dans le centre d'enfouissement technique. Les modes de collecte utilisés pour le plastique d'emballage ménagers et d'autres déchets plastiques en sont distincts (Desachy, 2001).

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

##### ❖ Tri

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

### II.5.2. Techniques de recyclage

Le recyclage constitue un domaine d'action du développement durable qui consiste en la réintroduction directe d'un déchet dans le circuit de production dont il est issu, en remplacement total ou partiel de la matière première. Ainsi, selon la nature des plastiques, deux types de recyclage peuvent être distingués :

#### II.5.2.1. Recyclage mécanique (matière)

Il est essentiellement réservé aux thermoplastiques et consiste à broyer et refondre la matière plastique réversible pour fabriquer des produits finis commercialisables, des granulés ou des poudres de plastique. Par ailleurs, ce type de recyclage exige un plastique homogène (composé d'une seule résine) qui doit être broyé et ajouté aux granulés de résine vierge avant la phase de plastification (Safer, 2015).

### II.5.2.2. Recyclage chimique

Il consiste à décomposer les plastiques en leurs éléments de base, soit en monomères, soit en pétrole, par un procédé chimique (pyrolyse, hydrogénation, etc.) ou thermique. Ce dernier consiste en l'incinération des plastiques afin de récupérer leurs chaleurs et de l'utiliser comme source d'énergie pour le chauffage, la production d'électricité ou de vapeur (Safer, 2015). Ce procédé porte le nom de dépolymérisation et s'applique généralement au polyéthylène téréphtalate (PET) dont l'objectif est d'obtenir des résines qui peuvent être incorporées dans la fabrication des produits qui vont contenir des aliments et des boissons (Azzem, 2007)

### CHAPITRE III : Plastiques et Environnement

La fin de vie du plastique peut être particulièrement nocive pour l'environnement. Le plastique se trouve partout car il sert à de multiples usages. Il pollue et présente des risques pour la santé. (Neymour, 1956 ; Nicholson 2017)

Il se retrouve sous toutes formes : emballages, bouteilles, sachets, pare-chocs de voiture et etc. En principe, c'est un matériau simple à fabriquer, économique, solide, léger et résistant à la corrosion. Il favorise notre hygiène de vie grâce à la conservation des aliments et permet d'économiser de l'énergie pour le transport grâce aux matériaux compactés. Cependant, le problème principal du plastique est souvent celui de son usage unique : une fois dans la nature, il peut mettre jusqu'à plusieurs centaines d'années pour se décomposer. Toutefois, les préoccupations concernant son utilisation et son élimination sont diverses et comprennent :

- L'accumulation de déchets dans les décharges et les habitats naturels ;
- L'ingestion ou l'enchevêtrement de plastiques par diverses espèces terrestres et marines ;
- Le lessivage ;
- La contamination de la chaîne alimentaire par le transfert du micro plastique de la faune à l'humain (Thompson, 2009 ; Whitacre, 2012) ;

En termes de volume, le plastique serait le déchet le plus rencontré, avec une importante quantité qui se retrouverait en mer.

#### III.1 Toxicité du plastique et perturbation de la chaîne alimentaire

La pollution par les plastiques peut avoir plusieurs conséquences. Mise à part, la pollution visuelle qu'elle engendre, les plastiques touchent les organismes marins de manière directe ou indirecte à différents échelons de la chaîne alimentaire (Wright *et al.*, 2013).

Au plan chimique, les matières plastiques sont constituées d'enchaînements de séquences identiques (ou polymères) de molécules carbonées, principalement d'hydrocarbures, molécules organiques toxiques pour de nombreux organismes, susceptibles de s'accumuler le long des chaînes alimentaires. Dans les zones d'accumulation, la concentration de micro plastiques observée (de taille de 0,5 à 5mm) est comparable à celle du zooplancton (entre 0.005 mm et plus de 50 mm). La Méditerranée, par exemple, présente des ratios micro plastiques/zooplancton compris entre 1/10 et 1/2 (Collignon *et al.*, 2012). Le risque pour les prédateurs du zooplancton (i.e. les poissons) d'ingérer du micro plastique est donc considérable. Le temps de résidence du plastique dans de petits

poissons pélagiques est évalué entre 1 jour et 1 an (Davidson et Asch, 2011). Les fragments de micro plastiques ingérés sont retrouvés dans les déjections des animaux, ils peuvent couler avec les cadavres ou encore être transférés aux prédateurs et ainsi atteindre les échelons supérieurs de la chaîne alimentaire (Cózar et *al.*, 2014).

Les plastiques sont également des vecteurs de dispersion de composés toxiques qui peuvent aussi s'accumuler dans les chaînes alimentaires. Ces composés peuvent être directement présents dans la composition des plastiques, ou bien s'adsorber à leur surface. Dans le premier cas, il s'agit d'additifs (phtalates, biphényles) incorporés à certains plastiques pour augmenter leur résistance. Différents travaux ont montré que ces composés peuvent être toxiques pour certains animaux et l'homme (Lithner et *al.*, 2011). D'autres composés toxiques (hydrocarbures, pesticides, DDT, PCB) peuvent s'adsorber sur les plastiques, ce qui est susceptible d'augmenter leur dispersion, leur persistance en mer et leur accumulation dans les échelons trophiques les plus élevés (Teuten et *al.*, 2009).

Les effets désastreux de l'ingestion des débris plastiques confondus avec des proies sont également bien documentés, avec des conséquences sur les systèmes digestifs des animaux tels que les poissons, les oiseaux, les tortues de mer et les mammifères marins, pouvant entraîner leur mort (Andrady, 2011). Ces débris sont également considérés comme vecteurs de dispersion d'algues toxiques (Masó et *al.*, 2007) et de microorganismes pathogènes (Zettler et *al.*, 2011). Les animaux marins sont confrontés la présence du plastique, qui se trouve sur le bord des côtes (50 à 80% des déchets). Les scientifiques ont découvert plus de 260 espèces animales différentes ayant ingéré du plastique : tortues, oiseaux, mammifères ou poissons (Andrady et *al.*, 2011 ; Eriksen et *al.*, 2014). Certes l'ingestion des débris marins est connue pour affecter particulièrement les tortues et les oiseaux de mer (figure 12) mais la plus grande menace de l'ingestion se produit lorsqu'elle bloque le tube digestif ou remplit l'estomac, conduisant à une potentielle mort de ces espèces (Rochman et *al.*, 2013)



**Figure 12:** (a) Tortue de mer ingérant du sachet plastique, (b) Oiseau de mer ingérant du plastique

L'homme, étant positionné au sommet de la chaîne alimentaire, peut ingérer des matières plastiques en consommant des produits de mer qui en contiennent. Il s'expose alors à des risques potentiels de maladie. Cela est dû à la présence de composés chimiques dans les plastiques comme le biphtalate. En effet, un certain nombre de composés associés aux plastiques, notamment le palatale et le bisphénol peuvent causer des troubles sanitaires chez l'Homme.

### III.2. Impact du plastique sur le milieu marin

L'augmentation de la production du plastique enregistrée ces dernières décennies a entraîné une augmentation des déchets plastiques se retrouvant en mer. En effet près de 75 à 80.000.000 tonnes par an de plastique d'emballages utilisés dans le monde finissent dans les océans (Corcoran et *al.*, 2009). C'est à dire que 60 à 80% de plastique se retrouve dans les mers et océans, atteignant parfois 90 à 95% dans certaines régions du monde (UNEP, 2011). D'immenses tourbillons de plastiques se forment ainsi dans les mers et océans, appelé par certain « le septième continent », dont le plus grand est le tourbillon océanique du pacifique nord, où convergerait près d'un million d'objets au kilomètre carré (Moore et *al.*, 2001).

En Méditerranée, une forte concentration de débris plastique est aussi enregistrée. Les micro-déchets de plastique sont ainsi estimés à 250 milliards, et la concentration atteindrait 900 000 particules au Km<sup>2</sup> dans certaines zones (Turener, 2011). Ces débris marins finissent pour la plupart par s'échouer sur les plages et les côtes sous l'action des vents et des courants. Les plages du monde entier sont ainsi jonchées de débris plastiques, qui représentent une réelle menace pour les organismes marins (Thompson et *al.*, 2004).

### III.3. Risques pour les êtres vivants

En raison de leur persistance dans l'environnement, associée à leur résistance physique et leur résistance à la biodégradation, les matériaux polymères présentent un danger pour les écosystèmes (Rudnik, 2010). En effet, les matières plastiques peuvent constituer une menace pour les animaux en entrant dans leur alimentation et en nuisant à leur santé ou en les emprisonnant (Andrady, 2003).

Les matières plastiques sont conduites par les courants aériens et marins vers des zones marines où elles s'accumulent, notamment dans le nord-est de l'océan Pacifique et dans le nord de l'océan Atlantique. La situation est plus catastrophique dans l'environnement marin où les déchets plastiques, principalement constitués de matériaux d'emballage, s'accumulent à la surface de l'eau ou migrent sous la surface et nuisent aux mammifères, aux oiseaux, aux poissons et aux tortues (Andrady, 2003).

Les grands vertébrés marins peuvent s'enchevêtrer dans les matières plastiques ou en ingérer. L'enchevêtrement occasionne des problèmes notables : mort, lésions cutanées, vulnérabilité due à l'arrêt de l'alimentation, etc. L'ingestion de matières peut occasionner l'obstruction des voies digestives, des dommages aux organes, voire la mort. Dans tous les cas, il y a une diminution de la qualité de vie et de la performance reproductive des espèces concernées. Certains plastiques attirent davantage certaines espèces que d'autres. Par exemple, les albatros ingèrent les plastiques de couleur rouge ou rose, qu'ils confondent avec une ressource alimentaire, le krill. Par ailleurs, les matières plastiques à la dérive pourraient jouer un rôle de vecteur quant à l'introduction d'espèces exotiques envahissantes (Gregory et Andrady, 2003).

### III.4. Risques toxicologiques pour la santé humaine

Certains monomères seraient dommageables pour la santé et l'environnement, notamment le styrène et le chlorure de vinyle, qui s'avèrent toxiques, voire cancérogènes pour l'être humain, mais peu persistants dans l'environnement (Verghese *et al.*, 2012). Toutefois les polymères, même le PS, ne semblent présenter aucun danger (Andrady, 2003). Le plus souvent, ce sont les additifs ajoutés à ces polymères qui présentent ce genre de risque selon le même auteur le PE ou le PP, par exemple, ne semblent pas présenter de risques toxicologiques. Cependant, il en est autrement pour le PVC. En effet, les additifs entrant généralement dans sa composition, utilisés comme plastifiant ou comme stabilisant, présentent un danger pour la santé humaine et l'environnement (Andrady, 2003.). Certains adjuvants peuvent également

présenter un risque, notamment les polybromodiphényléthers (PBDE), utilisés comme agents ignifuges.

Les phtalates entrent dans la composition des plastiques, notamment le PVC, comme plastifiant, afin de les rendre plus souples, moins cassants et plus transparents (Lewis, 2012). Dans le PVC, ils peuvent constituer de 10 à 50 % du poids total (Lewis, 2012 ; LCSP, 2011). Les phtalates contenus dans les matières plastiques tendent à migrer lentement vers la membrane du matériau et rejoindre l'environnement, pouvant ainsi entrer en contact avec le corps humain (Andrady, 2003). Ils présentent un risque pour la santé humaine par leur rôle de perturbateurs endocriniens, ayant comme conséquence de diminuer la fertilité masculine et d'augmenter les risques de cancer de la prostate et des testicules (Lewis, 2012).

Plusieurs de ces plastifiants se retrouvent en faible quantité dans l'environnement et manifestent une faible toxicité aiguë et chronique bien établie, mais aucune évidence ne semble établie quant au caractère cancérigène chez l'homme (Andrady, 2003). Ils présentent également des risques pour l'environnement, mais se biodégradent assez rapidement en condition aérobie.

### **III.5. Déplétion de la couche d'ozone**

Des agents mécaniques utilisés avec les matières plastiques étaient auparavant responsables du phénomène de déplétion de la couche d'ozone. Les chlorofluorocarbures (CFC) étaient utilisés comme agent gonflant dans le polyuréthane (PUR) expansé, un thermodurcissable, et dans le PS expansé. Le passage à l'état gazeux de ces CFC liquides conférait les propriétés gonflantes et formait la myriade de petites bulles donnant la propriété isolante des panneaux. Ces plastiques expansés sont les mousses rigides isolantes des panneaux de construction, des frigos et congélateurs d'autrefois.

Cependant, ces gaz s'échappaient durant la vie du matériau ou en fin de vie, contribuant au phénomène de déplétion de la couche d'ozone. Le Protocole de Montréal, adopté en 1985, imposa l'abolition de l'utilisation des CFC, sauf exceptions. Ainsi, certains agents de gonflage alternatifs, notamment le dioxyde de carbone, les cyclopentanes et les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), sont par la suite utilisés, ne contribuant pas de manière significative à la déplétion de la couche d'ozone (Andrady, 2003).

Ainsi, puisque les composés responsables de la déplétion de la couche d'ozone ont été abolis, les plastiques biosourcés ne pourront plus en contenir.

### III.6. Origine des débris plastiques

Il est communément admis dans la bibliographie internationale qu'environ 70 à 80% des déchets retrouvés dans les mers et sur le littoral sont d'origine tellurique et que le plastique provient des activités maritimes (Hidalgo,2012). Cependant, une étude menée exclusivement sur le littoral de plus de cent pays par International Clean Up montre que près de 60% des déchets récoltés sur les plages proviennent directement des activités menées sur place(Henry, 2010). Les fragments de plastique proviennent de deux sources différentes :

- ❖ Une source intérieure : les déchets sont transportés vers les côtes via les cours d'eau, le vent, les systèmes de drainages ou les activités humaines. Les dépôts de déchets provenant de l'intérieur des terres se manifestent principalement par une accumulation aux embouchures des cours d'eau et des sorties d'égouts. Les déchets abandonnés sur place se concentrent aux abords des accès de plage (Frias, 2010).
- ❖ Directement à partir des mers ou les variétés de plastiques flottantes de faibles densités s'accumulent et sont transportés sur de grandes distances (Frias, 2010). Les dépôts de déchets sur la plage se font principalement sous forme de débris plastique qui marque la limite haute du niveau de la mer. Lors des phénomènes de tempêtes on remarque une concentration plus accentuée des déchets sur les plages (Henry, 2010).

## CHAPITRE IV : Biodégradation du plastique

### IV.1.Définition

#### IV.1.1. Dégradation

La dégradation d'un matériau signifie la perte de ses propriétés physico-chimiques (Vert et *al.*, 1992). Dans le cas d'un matériau polymère, cette perte de propriétés peut se produire en raison de modifications physico-chimiques dans l'assemblage des macromolécules qui forment le matériau et/ou suite à une rupture de ces macromolécules.

Toutefois, il existe plusieurs situations qu'il est nécessaire de distinguer en terme de dégradation :

- ✓ Le matériau est dégradé partiellement, ce qui aboutit à la formation de fragments macromoléculaires qui peuvent être plus petits mais très semblables au matériau d'origine d'un point de vue chimique.
- ✓ Le matériau est dégradé ainsi que les macromolécules, ce qui se traduit par la rupture des chaînes macromoléculaires provoquée par un procédé chimique comme une hydrolyse ou une oxydation, ou par des agents biologiques tels que les micro-organismes ou l'action d'enzymes, ou encore les deux conjugués (Vert et *al.*, 1992). Les produits de dégradation résultants peuvent se trouver dispersés dans l'environnement sans former d'interactions, ou peuvent être intégrés dans des cycles biologiques et transformés en eau et en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Ils peuvent également être assimilés par des micro-organismes et ainsi contribuer à la formation d'une nouvelle biomasse.

Il existe différents types de dégradation : la dégradation abiotique causée par des facteurs physiques tels que l'oxygène, l'eau ou la lumière, et la dégradation biotique due à l'action de micro-organismes. En conditions naturelles, ces deux types de dégradation peuvent être combinés et mener les polymères à différents degrés de dégradation (fragilisation, fragmentation, solubilisation) (Calmon-Déciaudet *al.*, 1998).

L'ISO (International Standards Organisation) a établi des définitions pour les termes « dégradation » et « détérioration » (ISO 472, 1988; Vert et *al.*, 1992). La dégradation d'un matériau peut être définie comme une « modification dans la structure chimique d'un plastique entraînant des changements de propriétés ». La détérioration est une « modification permanente dans les propriétés physiques d'un plastique mise en évidence par une altération de ses propriétés ».

### IV.2.2. Biodegradation

D'après Feuilloley (1999), un dictionnaire classique définit le terme biodégradable tel que : « se dit d'un produit industriel qui, laissé à l'abondance, est détruit par les bactéries ou d'autres agents biologiques ». Cette définition présente le matériau biodégradable comme un matériau capable de prendre en charge sa propre élimination.

Les polymères biodégradables sont devenus très populaires mais la définition de ce terme n'est pas toujours claire et donne lieu à de nombreuses interprétations : la détérioration ou la perte d'intégrité physique. Beaucoup de polymères dits "biodégradables" sont en fait "biodégradables", "hydro-dégradables", "photodégradables", etc. L'emploi du terme "biodégradable" pour qualifier certains plastiques a conduit les différents organismes de normalisation (ISO, ASTM, DIN, JPBS, CEN) à établir des définitions sur la notion de plastiques biodégradables.

La biodégradabilité primaire (ou facile, « *readybiodegradability* ») est l'altération de la structure chimique. Le résultat se traduit par la perte de propriétés spécifiques du polymère. Il est très important de la mesurer pour les polymères utilisés pour des applications durables (bâtiment, automobile, etc.).

La biodégradabilité ultime (ou inhérente, « *inherentbiodegradability* » ou minéralisation) concerne les matériaux totalement dégradés par des micro-organismes avec la production de dioxyde de carbone (en aérobiose) ou de méthane (en anaérobiose), d'eau, de sels minéraux et de nouveaux constituants cellulaires (biomasse).

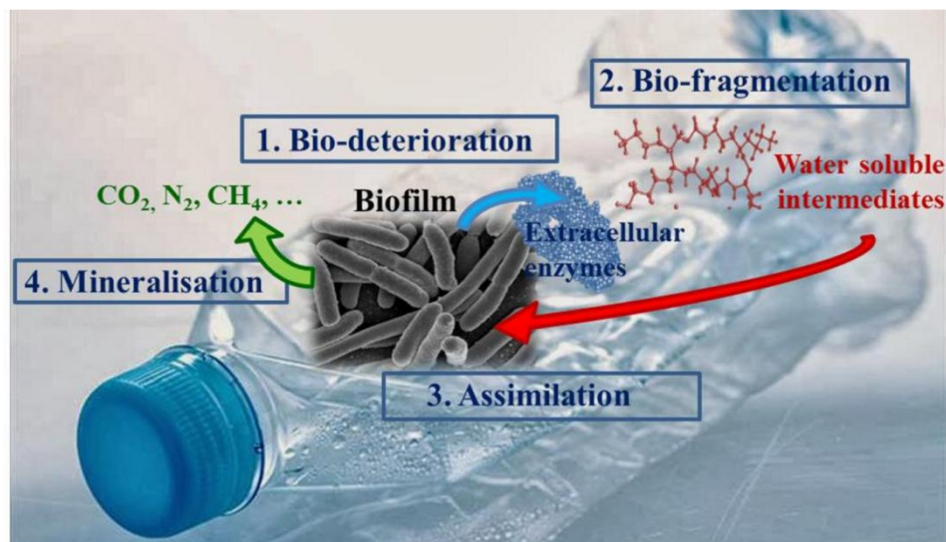
Les définitions de « biodégradation » et de « biodégradabilité » concernant les plastiques peuvent être qualifiées respectivement de « procédé induit par une activité biologique qui conduit à un changement de la structure chimique du matériau en produits métaboliques naturels » et « un plastique est biodégradable si tous ses constituants organiques sont sujets à une dégradation biologique complète » (Muller et *al.*, 1994).

### IV.2. Mécanisme de biodégradation

Tous les matériaux polymères sont exposés aux conditions naturelles environnementales et leur surface est recouverte par des micro-organismes, excepté dans le cas de pièces stériles (Gu, 2003 b). Ces micro-organismes sont capables de dégrader une large gamme de polymères naturels et synthétiques.

### IV.2.1 Processus biochimiques

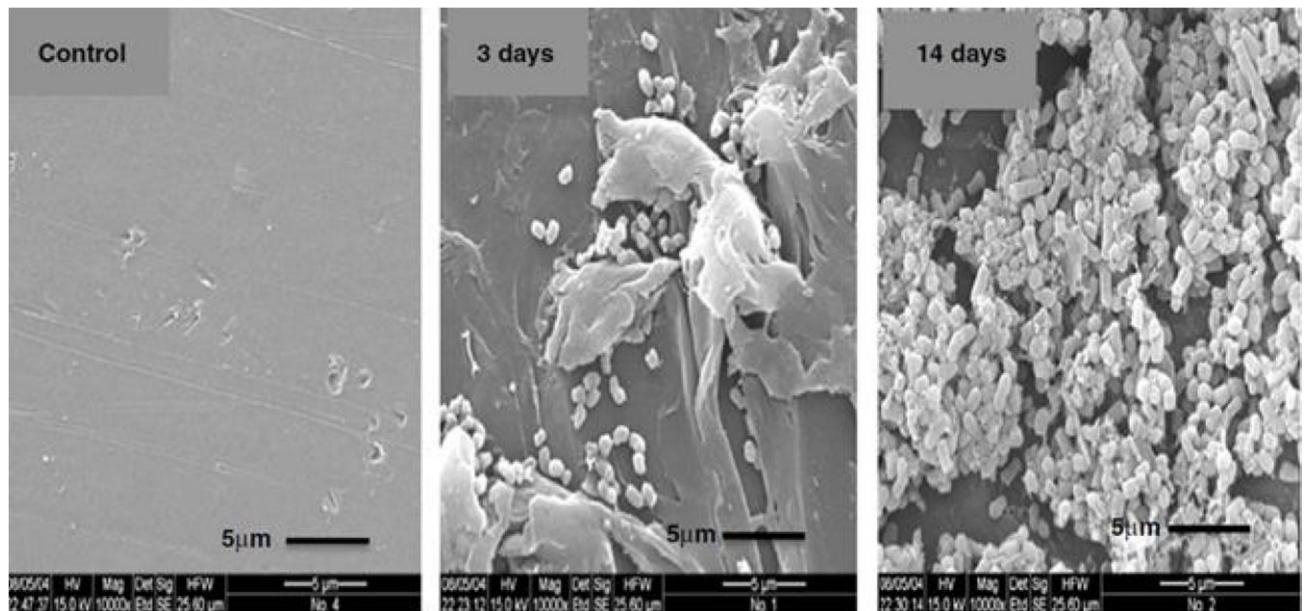
Un plastique qui arrive en mer va d'abord subir une dégradation abiotique (non biologique). Des dégradations physiques (vagues, température et UV) et chimiques (oxydation ou hydrolyse) vont contribuer à fragiliser les structures des polymères et réduire le plastique en morceaux de plus petite taille (Ipekoglu et *al.*, 2007). La dégradation biologique intervient ensuite. Elle comprend de quatre étapes successives (Figure 13).



**Figure 13:** Différentes étapes de la biodégradation du plastique par les bactéries (Dussus et Ghiglione, 2005)

1. La bio-détérioration est engendrée par l'action mécanique du biofilm bactérien qui se forme à la surface du plastique (Figure 14) et qui va pouvoir agrandir les fissures déjà présentes

(Bonhomme et *al.*, 2003). Une dégradation chimique peut également être réalisée par la grande diversité des espèces présentes dans le biofilm, telle que la production de composés acides par les bactéries chimiolithotrophes et chimioorganotrophes.



**Figure 14:** Biofilm formé par *Rhodococcus ruber* C208 sur la surface de polyéthylène UV photooxydée, observé au microscope électronique à balayage. (Sivan *et al.*, 2011).

2. La bio-fragmentation est l'action d'enzymes bactériennes libérées à l'extérieur des cellules pour cliver les polymères plastiques en séquences plus courtes, oligomères et monomères. Les oxygénases, par exemple, rendent les polymères de plastique plus hydrosolubles et donc plus facilement dégradables par les bactéries. Les lipases et les estérases attaquent spécifiquement les groupes carboxyliques, les endopeptidases et les groupements amines. Différentes espèces bactériennes sont impliquées dans ce processus (Ghosh *et al.*, 2013).

3. L'assimilation consiste au transfert des molécules plastiques de taille <600Da (daltons) dans les cellules bactériennes et à leur transformation en composés cellulaires et en biomasse.

4. La minéralisation correspond à la dégradation complète du plastique en molécules oxydées (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O).

Des études ont démontré que la souche *R. ruber* C208 incubée 30 jours sur du polyéthylène photo-oxydé conduisait à la formation d'un biofilm et contribuait à la perte de 8% du poids sec de plastique (Sivan, 2011). Si d'autres exemples de ce type ont été rapportés dans la littérature, ces observations reposent néanmoins sur des études en condition de laboratoire qui utilisent une seule espèce bactérienne. Or, le processus en milieu naturel est beaucoup plus complexe et fait intervenir de nombreuses espèces bactériennes (Zettler *et al.*, 2013)

### IV.2.2. Processus enzymatique

C'est une méthode qui permet de donner des informations sur la susceptibilité du substrat à l'attaque enzymatique. Elle est basée sur l'utilisation directe d'enzymes pures ou d'un surnageant issue d'une culture microbienne ayant démontré la capacité de dégrader le polymère.

La sélection des souches est effectuée par la méthode des zones claires. Une fois que l'isolement de la colonie formant la zone la plus grande est identifié, l'hydrolyse enzymatique du polymère peut être réalisée seulement en utilisant le surnageant de la culture microbienne (Li *et al.*, 2007) ou l'application de l'enzyme après sa purification.

Pour la méthode enzymatique, l'évaluation de la biodégradabilité se base sur le dosage des produits d'hydrolyse (Li *et al.*, 2007) par chromatographie à haute performance (HPLC), chromatographie à phase gazeuse (CPG) ou l'identification de la structure des différents composés solubles par résonance magnétique nucléaire (RMN).

En ce qui concerne les polymères à base d'amidon ou de cellulose, le pourcentage de biodégradabilité est évalué par dosage des sucres réducteurs après une hydrolyse enzymatique (Copinet *et al.*, 2001). La méthode de DNS (Dinitrosalicylique) est la plus utilisée pour doser les oses réducteurs présents dans le milieu (Millers, 1959). Mais cette méthode ne permet pas d'identifier la nature de ces oses, pour cela une HPLC couplée à un réfractomètre est généralement utilisée. La quantité des sucres réducteurs passe de 0 à 16% après 100 jours, grâce à une hydrolyse enzymatique d'un polymère à base d'amidon de maïs avec une  $\alpha$  amylase (Araújo *et al.*, 2004). Après 48 jours de réaction enzymatique, le pourcentage d'hydrolyse du TPS (amidon thermoplastique) avec l' $\alpha$  amylase et l'amyloglucosidase atteint 58% (Gàsparet *et al.*, 2005).

### IV.2.3. Méthodes Microbiologiques

Ce sont des méthodes qui se basent sur le développement microbien pour déterminer la capacité des microorganismes (bactéries ou champignons) à dégrader un polymère particulier. Pour ce faire, la croissance de ces microorganismes est mise en évidence en utilisant le polymère comme source de carbone. Ces méthodes sont qualitatives.

#### IV.2.3.1 Méthode des zones claires

C'est une méthode utilisée pour les tests réalisés sur un milieu gélosé. Le polymère constitue la seule source de carbone dans le milieu de culture et il peut être déposé à la surface sous forme de film (Calmon et *al.*, 1998) ou ajouté à la gélose (Tokiwa et *al.*, 2006) sous forme de poudre, ce qui rend dans ce cas la gélose opaque. Après inoculation avec le surnageant d'une boue active ou d'un sol, la croissance des souches ayant le pouvoir de dégrader le polymère provoquera l'apparition de zones claires. En utilisant cette méthode, (Jareratet *al.*, 2003) ont isolé *Saccharothrixwaywayandensis* qui a eu la capacité de dégrader jusqu'à 95% du PLA (acide polylactique) après 7 jours d'incubation dans un milieu liquide.

#### IV.2.3.2 Méthode d'envahissement

L'envahissement des polymères par les microorganismes permet de mettre en évidence la sensibilité des matériaux étudiés à l'attaque microbienne. Le film plastique est déposé à la surface d'un milieu gélosé après étalement de la suspension microbienne (concentration de 10<sup>7</sup> microorganismes/mL de milieu (Coma,1992)). La souche 3118 appartenant au genre *Amycolatopsis* est capable de dégrader 50% d'un film de PLA après 8 semaines d'incubation à 30°C (Ikura et *al.*, 1999).

L'estimation de la biodégradabilité basée sur la méthode d'envahissement est fondée sur l'observation directe du matériau envahie par les microorganismes.

Que ce soient les zones claires ou l'envahissement, ces méthodes sont seulement d'ordre qualitatif mais faciles à mettre en œuvre. Elles constituent un test rapide qui permet l'orientation des formulations polymériques vers du biodégradable et la sélection des souches biodégradant les matériaux.

#### IV.2.4 Méthode respirométrique

Les mesures respirométriques permettent de quantifier, en condition aérobie, la dégradation du matériau plastique jusqu'à sa disparition complète du milieu, grâce à son assimilation par des microorganismes.

##### IV.2.4.1 Mesure de la consommation d'oxygène

Les microorganismes aérobies consomment de l'oxygène pour oxyder le carbone du polymère sous forme de dioxyde de carbone. La mesure de la quantité d'oxygène consommée permet d'évaluer le pourcentage de minéralisation. Cette quantité peut être mesurée par une

électrode à oxygène en l'introduisant dans le milieu de culture (Mezzanotte *et al.*, 2005) ou par un respiromètre ( Reuschenbach *et al.*, 2003).

#### IV.2.4.2 Mesure de la production de dioxyde de carbone

La mesure de la quantité de dioxyde de carbone produit pendant la respiration des microorganismes en utilisant le matériau comme seule source de carbone est la technique la plus utilisée pour les tests de respirométrie. Le dioxyde de carbone issu de la biodégradation du polymère est utilisé pour le calcul du pourcentage de la minéralisation. Lors de cette méthode, l'inoculum microbien utilisé produit naturellement du dioxyde de carbone pendant la respiration endogène, cette valeur doit être retranchée en utilisant un témoin sans polymère (Mezzanotte *et al.*, 2005).

#### IV.2.4.3 Mesure de CO<sub>2</sub> par piégeage chimique

C'est le moyen le plus simple de capter le CO<sub>2</sub> libéré pendant la minéralisation durant la biodégradation d'un polymère. Le CO<sub>2</sub> est piégé dans une solution alcaline de soude (Mohe *et al.*, 2006) ou d'hydroxyde de baryum (Vázquez-Rodríguez *et al.*, 2006; Iovino *et al.*, 2007) en large excès de concentration connue. Le dosage acido-basique de la solution permet de quantifier la soude ou l'hydroxyde de baryum n'ayant pas réagi avec l'acide.

#### IV.2.4.4 Choix de l'inoculum

La qualité et la source de l'inoculum microbien affectent énormément les résultats de la biodégradabilité d'un polymère. La cellulose est 100% biodégradée après 50 jours en utilisant une boue issue d'une station d'épuration d'une usine (Mezzanotte *et al.*, 2005). Les sources de l'inoculum utilisées pour les méthodes respirométriques sont très variées: boue active d'une station d'épuration d'une usine, à partir d'un effluent secondaire, d'un éluant de compost ou d'un sol, voir d'un mélange d'inoculum (Calmon-Decriaud *et al.*, 1998) ou encore des microorganismes sélectionnés par la méthode d'envahissement ou des zones claires.

#### IV.2.4.5 Des changements de morphologie et de poids du polymère

La mesure de la biodégradabilité par perte de poids consiste à peser la masse de l'échantillon avant et après son incubation. Pour avoir des résultats satisfaisants, il est nécessaire de soumettre le polymère à un nettoyage parfait pour ne pas fausser la mesure de la masse. Le polymère est susceptible d'absorber de l'eau, il est donc nécessaire de le sécher

avant la pesée (Agarwalet *al.*, 1998). Il est important de noter que cette mesure reste valable tant que l'intégrité du matériau est conservée.

Une comparaison de la structure de surface d'un film plastique avant et après le test donne une information sur la dégradation de la morphologie liée à l'action des microorganismes. Le microscope électronique à balayage permet de confirmer le développement des colonies microbiennes provoquant ainsi une dégradation importante au niveau de la surface (Tokiwaet *al.*, 2004).

### **IV.3. Facteurs biologiques de la biodégradation**

#### **IV.3.1. Influence des paramètres abiotiques**

Parallèlement au processus de biodégradation, des processus abiotiques peuvent également intervenir dans la dégradation des polymères. Ces processus abiotiques incluent l'hydrolyse chimique, la dégradation thermique et l'oxydation ou la scission de chaînes polymères. Par irradiation (photo dégradation). Pour certains matériaux polymères, ces effets sont utilisés directement pour induire le processus de biodégradation (Weilandet *al.*, 1995; Chielliniet *al.*, 2003 ; Abd El-Rehimet *al.*, 2004; Kaczmareket *al.*, 2004).

L'exposition de matériaux polymères dans le milieu naturel à de tels facteurs doit également être prise en considération dans les mécanismes de biodégradation. Lors de la coexistence de processus biotiques et abiotiques, les mécanismes de dégradation de matériaux polymères peuvent être aussi désignés sous le nom de « dégradation environnementale ».

#### **IV.3.2. Influence des paramètres intrinsèques**

Un paramètre intervenant également dans l'étude de la biodégradation de matières plastiques est la complexité de leurs structures chimiques et de leurs formulations. Les plastiques sont généralement constitués de différents polymères (mélanges) et d'additifs de faibles masses molaires (par exemple : plastifiants, colorants, antioxydants, etc.). Le polymère, lui-même, peut contenir différents éléments structuraux (co-polymères) et ceux-ci peuvent être distribués statistiquement le long de la chaîne polymère (co-polymères) ou distribués alternativement (co-polymères alternés). La présence de longs blocs de chaque structure polymère (co-polymères à blocs) ou la formation de réseaux (polymères réticulés) est également possible. Pour une même composition globale, ces différentes structures de polymères peuvent influencer directement l'accessibilité des chaînes polymères au clivage enzymatique.

Tous les facteurs décrits ci-dessus influent sur les résultats et doivent être pris en compte lors des mesures de biodégradation des matériaux plastiques. Ainsi, l'analyse de la biodégradabilité des matières plastiques implique différentes approches scientifiques.

#### IV.3.3. Les facteurs biologiques de la biodégradation

Il apparaît de plus en plus clairement que les micro-organismes jouent un rôle majeur dans l'organisation, le fonctionnement et l'évolution de la plupart des écosystèmes. Le terme de « micro-organismes » englobe un groupe d'êtres vivants de taille microscopique et pour la plupart unicellulaires. On peut citer *Ideonellasakaiensis* une bactérie découverte au Japon qui peut dégrader le plastique grâce à une enzyme spécifique (Yoshida, 2016)

#### Exemple d'une étude réalisée sur la biodégradation du plastique

Cette étude est un exemple réalisé par Alice Delacuvellerie et al, (2019) sous le thème Le plastique dans l'écosystème marin héberge des microbiens dégradants dont *Alcanivorax borkumensis* comme acteur clé de dégradation du polyéthylène. L'objectif principal de ce travail est d'étudier la composition bactérienne des biofilms associés au plastique. Pour la première fois, a été utilisé le séquençage d'amplicon d'ARNr 16S pour comparer les compositions de microbiome associé aux macroplastiques prélevés en mer Méditerranée dans des sédiments et flottants dans l'eau à partir du même emplacement géographique (Calvi, Corse). Dans un deuxième temps, une méthode d'enrichissement a été utilisée pour sélectionner des consortiums bactériens capables de former des biofilms sur des plastiques (PET, LDPE, PS). Cette étude a révélé le profil de l'ARNr 16S des plastiques sur le fond marin méditerranéen similaire à ceux trouvés dans d'autres régions de la Méditerranée. De plus, il a été montré que les communautés bactériennes qui poussent sur du plastique flottant et se déposent sur un seul point géographique (c'est-à-dire surface contre sédiment) ont des communautés bactériennes uniques, alors qu'il existe des communautés dans la couche colloïdale. Les micro-organismes constituent une niche environnementale unique. Des méthodes d'enrichissement sont utilisées pour détecter d'éventuels produits de dégradation microbienne spécifiques. De plus, les communautés bactériennes capables de former des biofilms à la surface de polymères synthétiques dépendent évidemment de la plasticité. Plusieurs espèces bactériennes susceptibles de dégrader les hydrocarbures ont été enrichies sur divers plastiques, et des associations d'espèces ont été observées sur des films LDPE dont *Alcanivorax borkumensis*. Les résultats obtenus montrent clairement qu'ils peuvent former un grand biofilm à la surface du LDPE et le dégrader. Bien que toutes les études aient révélé sa capacité à biominéraliser les hydrocarbures pétroliers, cette étude a montré pour la première

fois son potentiel à dégrader les structures solides à base d'alcane (comme le PEBD plastique à base de pétrole). Le mécanisme de dépolymérisation partielle de la dégradation du LDPE-LDPE est très important, des recherches supplémentaires sont donc nécessaires.

## CONCLUSION

La présente étude est une synthèse bibliographique sur le plastique et sur sa dégradation microbiologique ou biochimique. Il en ressort que le plastique est un assemblage de plusieurs monomères qui créent, à leur tour, un polymère qui est le composant essentiel du plastique tels que les thermoplastiques, les thermodurcissable et les élastomères. Le plastique présente d'énormes impacts sur l'environnement aussi bien sur le plan esthétique que visuel notamment les grandes décharges et les déchets jetés partout dans l'environnement au quotidien, Il a aussi des impacts sur la santé humaine en raison des cellules cancérigènes dégagée des matières plastiques notamment dans les océans et en mer. Des impacts sont également constatés sur de nombreuses plantes et sur les animaux entraînant parfois leurs mort suite à la persistance des matières plastiques dans leur environnement et en entrant dans l'alimentation des êtres vivants ; ce qui nuit à leur santé en les empoisonnant. Vu tous ces impacts négatifs, le recyclage du plastique est une nécessité pour, d'une part, réduire ces impacts et, d'autre part, valoriser les déchets des matières plastiques pour d'autres utilisation comme le broyage et la réutilisation dans des domaines tels que l'immobilier et l'agriculture ; ce qui nous permet de tirer bénéfice du plastique comme déchet.

La dégradation du plastique prend de nombreuse années pour certains produits et pour d'autres des décennies voir des siècles pour cela, il faut trouver des alternatives au plastique et privilégier le recyclage :

- Essayer de remplacer le plastique par d'autres produits moins polluants pour l'environnement et moins toxiques pour la santé humaine tels que les sachets en carton.
- Améliorer les techniques de recyclage et placer des bacs spéciaux à proximité des habitations et dans les villes pour faciliter le recyclage du plastique.
- Valoriser les déchets plastiques par une production d'énergies utilisables dans divers autres domaines.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- Addou A.,2009** Traitement des déchets : valorisation, élimination, éd. Ellipses.p56.
- Agarwal M., Koelling W., Chalmers J.,1998.** Characterization of the degradation of Polylactic Acid Polymer in a solid Substrate Environment.*Biotechnol. Prog.*Vol. 14: 517-526.
- Alberta Auraùjo M., Cunha Antonio M., Mota M.,2004.**«Enzymatic degradation of starch
- Andrady A.L.,2011-** Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*,V65:1596-1605.
- Andrady, A. L., 2003**Microplastics in the marine environment. *Mar. Pollut. Bull.*v62: 1596–1605
- Augusta J., Müller R.-J., Widdecke H.,1993.** A rapid evaluation plate-test for the biodegradability of plastics, *Applied microbiology and biotechnology* 39: 673-678.
- BensaadaS., Benmachiche M., Bouziane M T., Mazouz H., 2015.**
- Environnement et recyclage du déchet. *Revue science des matériaux*, laboratoire LARHYSS N°03. *Biotechnology Letters*, Vol. 25: 401-404.
- Bode H. B., Kerkhoff K., Jendrossek D., 2001.** Bacterial degradation of natural andsynthetic rubber, *Biomacromolecules* 2 (1): 295-303.
- Bonhomme S., Cuer A., Delort AM., Lemaire J., Sancelme M., Scott G .,2003.**
- Environmental biodegradation of polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 81: 441452.
- BoulechfarChérifa., 2017** Synthèse et caractérisation des nanocomposites polyéthylène haute densité / Montmorillonite. Mémoire de registre Université Mentouri Constantine, p98 : 46 :51.
- Brydson, J. A.,1999** *Plastics Materials*. (Butterworth-Heinemann)p58.
- Calmon-Decriaud A., Bellon-Maurel V., Silvestre F., 1998.**Standard methods for testing the aerobic biodegradation of polymeric materials. Review and perspectives, *Advances in polymer science*.Vol.135:207-226.
- Cantor, K. et Watts, P. , 2011.**Plastics Materials. *In*Kutz, M., *Applied lastics EngineeringHandbook: Processing and Materials* Oxford, Elsevier. (Collection PDLHandbook Series)(chap. 1, p. 3-5).

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- Chemistry Encyclopedia. 2007.** Plastic. *In Chemistry Daily. Chemistry–Plastic* 22-26.
- Chiellini E., Corti A., Swift G., 2003 a.** Biodegradation of thermally-oxidized, fragmented low-density polyethylenes, *Polymer degradation and stability* 81:341-351.
- Cholake, S. T., Rajarao, R., Henderson, P., Rajagopal, R. R. & Sahajwalla, V., 2017** Composite panels obtained from automotive waste plastics and agricultural macadamia shell waste. *J.Clean. Prod.* 151: 163–171
- Collignon, A., 2012** Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea. *Mar. Pollut. Bull.* Vol 64 : 861–864.
- Coma V., 1992** «Proposition d’une méthodologie pour l’estimation de la biodégradabilité de matériaux d’emballage», Thèse de l’Université Champagne-ardenne, 1992.
- Copinet A., Bliard C., Onteniene J., Couturier Y., 2001** «Enzymatic degradation and deacetylation of native and acetylated starch-based extruded blends», *Polymer Degradation and Stability.* Vol. 71: 203-212.
- Corcoran, P. L., Biesinger, M. C. & Grifi, M., 2009** Plastics and beaches: A degrading relationship. *Mar. Pollut. Bull.* 58: 80–84.
- Cózar, A., 2014** Plastic debris in the open ocean. *Proc. Natl. Acad. Sci.* Vol 3: 17-32.
- Davison, P. & Asch, R., 2011** Plastic ingestion by mesopelagic fishes in the North Pacific Subtropical Gyre. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 432: 173–180.
- Derraik J.G.B., 2002.** The pollution of the marine environment by plastic debris. *Marine Pollution Bulletin*, 44 : 842-852
- Duval, C., 2009.** *Matières plastiques et environnement - 2e éd.: Recyclage. Biodégradabilité. Valorisation.* (Dunod,) 32-38.
- Enoki M., Doi Y., Iwata T., 2003.** Oxidative degradation of cis- and trans-1,4-polyisoprenes and vulcanized natural rubber with enzyme-mediator systems, *Biomacromolecules* 4(2):314-320.
- Eriksen, M., 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 : 11-19.
- Feuilloley P., 1999.** Un label européen de biodégradabilité , *Biofutur* n°193 : 19-21.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

**Fontanille M., Gnanou Y., 2005** Chimie et Physico-chimie Des Polymères (cours), 2e et 3e cycles. Dunod, Paris, 4-8.

**Frias J.P.G.L., Sobral P., Ferreira A.M., 2010.** Organic pollutant in the microplastics from to beaches of the portugues coast *.Marine Pollution Bulletin*, 60:1988-1992.

**Gàspar M., Benko Z., Dogossy G., Réczey K., Czigàny T.,2005.**Reducing water absorption in compostable starch-based plastics, *Polymer Degradation and Stability*, Vol.90 :563-569.

**Gautron P.,2001.**Valorisation et recyclage des déchets. Les déchets : sensibilisation à une gestion écologique, éd. TEC et DOC,,p11-114.

**Geyer, R., Jambeck., J. R. & Law., K. L. Production.,2017** use, and fate of all plastics ever made.*Sci. Adv.* **3**, 178-185p.

**Ghosh SK., Pal S., Ray S.,2013.** Study of microbes having potentiality for biodegradation of plastics. *Environmental Science and Pollution Research* 20: 4339-4355.

**Gilbert, M., 2005***Brydson's Plastics Materials*.p58-64

**Gu J.-D., 2003 b.** Microbial deterioration of synthetic and biological polymers used in engineering and construction, In: A. Steinbüchel, ed. *Biopolymers*, volume 10: general aspects and special applications, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany. 97-138.

**Henry M., 2010.**Pollution du milieu marin par les déchets solides : Etat des connaissances ; Perspectives d'implication de l'Ifremer en réponse au défi de la Directive Cadre Stratégie Marine et du Grenelle de la Mer. Rapport final. 64p.

**Ikura Y., Kudo T.,1999.**Isolation of a microorganism capable of degrading poly-(L-lactide) »*J.Gen. Appl. Microbiol.*Vol. 45:247-251.

**Iovino R., Zullo R., Rao M., Cassar L., Gianfreda L.,2007** .Biodegradation of poly(lacticacid)/starch/coir biocomposites under controlled composting conditions, *Polymer Degradation and Stability* 1-11.

**Ipekoglu B, Böke H, Cizer O.,2007.** Assessment of material use in relation to climate in historical buildings. *Building and Environment*, 42: 970-978.

**Jarerat A.,Tokiwa Y.,2003** «Poly(l-lactide) degradation by *Saccharothrix Waywayandensis*»48-56,

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- Kaczmarek H., Świątek M., Kamińska A., 2004.** Modification of polystyrene and poly(vinyl chloride) for the purpose of obtaining packaging materials degradable in the natural environment, *Polymer degradation and stability* 83 (1).35-45.
- Lacoste J., Carlsson D. J., 1992.** Gamma-, photo-, and thermally-initiated oxidation of linear low density polyethylene: a quantitative comparison of oxidation products. *Journal of polymer science* 30 : 493–500.
- Lebreton , L. C. M., 2017.** River plastic emissions to the world's oceans. *Nat. Commun.* **8**, 15-21
- Lechner, A., 2014.** The Danube so colourful: a potpourri of plastic litter outnumbered fish larvae in Europe's second largest river. *Environ. Pollut. Barking Essex 1987*: 177 181
- Lewis, H. et Stanley, H., 2012.** Complying with Regulations. In Verghese, K., Lewis, H. et Fitzpatrick, L., *Packaging for Sustainability* London, Springer Vol.4:155-170.
- Li Z., Lin H., Ishii N., Chen G., Inoue Y., 2007 .** Study of enzymatic degradation of microbial copolyesters consisting of 3-hydroxybutyrate and medium-chain-length 3-hydroxyalkanoates, *Polymer Degradation and Stability*. Vol. 92: 1708-1714.
- Lithner., D., Larsson., A. & Dave., G., 2011.** Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. *Sci. Total Environ.* **409** :3309–3324 .
- Masó M, Garcés E, Pagès F and Camp J., 2007.** Drifting plastic debris as a potential vector for dispersing Harmful Algal Bloom (HAB) species. *Sci. Mar.* 67: 107–111
- Matsuguma, Y., 2017.** Microplastics in Sediment Cores from Asia and Africa as Indicators of Temporal Trends in Plastic Pollution. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 1–10
- Mezzanotte V., Bertani R., Innocenti F., Tosin M., 2005.** Influence of inocula on the results of biodegradation tests, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 87 : 51-56
- Miller G.L., 1956** Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar *Analytical Chemistry*, Vol.31:426-428.
- Müller R. J., Augusta J., Walter T., Widdecke H., 1994.** The development and modification of some special test methods and the progress in standardisation of test methods in Germany. In: Doi, Y. and Fukuda, K. (eds.) *Biodegradable plastics and polymers*. Elsevier, New York, p. 237-249.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

**Olivier, M.,2013.** Notions de base sur les matières plastiques72-80p.

**Reuschenbach P., Pagga U., Strotmann U.,2003.**A critical composition of respirometric biodegradation tests based on OECD 301 and related test methods, *Water Research*, vol. 37: 1571-1582.

**Rey, A.,2007.***Le nouveau petit Robert de la langue française* .Paris, Dictionnaires Le Robert. 2837 p.

**Rey. A.,1992.***Dictionnaire historique de la langue française – Tome 2.* Paris, Dictionnaires Le Robert. 2383 p.

**Reyne, M.,1998.** *Les plastiques.* Paris, PUF. 125 p.

**Rochman, C. M., Hoh, E., Hentschel, B. T. & Kaye., S.,2013.** Long-Term Field Measurement of Sorption of Organic Contaminants to Five Types of Plastic Pellets: Implications for Plastic Marine Debris. *Environ. Sci. Technol.***47** : 1646–1654.

**SaferK., « Environnement et développement durable », Polycopié de cours, 2015, P 59.**  
17 AZEM S., « Mélanges de polymères : Application à la Récupération et au Recyclage des Déchets », workingpaper, UMMTO, 2007. d. Dunod, Paris, 2004

**San Diego Plastics (SDP),,2010.** Plastics Definitions and Terms. *In* San Diego Plastics14-26p.

**Seymour, R. B., 1956** Plastics. *Ind. Eng. Chem.***48**, 1760–1774.

**Shang J., Chai M., Zhu Y., 2003.** Photocatalytic degradation of polystyrene plastic under fluorescent light, *Environmental science and technology* 37 (19), p. 4494-4499.

**SivanA.,2011.** New perspectives in plastic biodegradation. *Current Opinion in Biotechnology*, 22: 422-426.

**Teuten EL, Saquing JM., 2009.** Transport and release of chemicals from plastics to the environment and to wildlife. *Phil. Trans. R. Soc. B* 364: 2027-2045  
thermoplastic compounds used in prostheses: identification of the degradation products in solution», *Biomateriels.* Vol. 25: 2687-2693.

**Thompson R.C,Lsen y Mitchell R.P, Davis A, Rowland S,J,John.A.W.G,Mecgingle D, Russelle A.E., 2004-** Lost at Sea: where is all the plastic, *Science*, 304, 838.

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

**Thompson, R. C., Moore, C. J., Saal, F. S. vom & Swan, S. H., 2009.** Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 364, 2153–2166.

**Tokiwa Y., Clabia P., 2006** .«Biodegradability and biodegradation of poly(lactide)», *Appl Microbiol Biotechnol*, Vol. 72: 244-251.

**Tolinsky, M., 2010.** *Plastics and Sustainability*. Salem, Scrivener Publishing, 269 p.

**UNEP., 2011.** Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from Land-based Activities, p16.

**Vert M., Feijen J., Albertsson A., Scott G., Chiellini E., 1992.** Biodegradable Polymers and Plastics, The Royal Society of Chemistry, Cambridge 250-268p.

**Weiland M., Daro A., David C., 1995.** Biodegradation of thermally oxidized polyethylene, *Polymer degradation and stability* 48 (2), p. 275-289.

**Whitacre, D. M., 2012** *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. (Springer Science & Business Media) 98-114p.

**Yabannavar A. V., Bartha R., 1994.** Methods for assessment of biodegradability of plastic films in soil, *Applied and environmental microbiology* 60: 3608-3614.

**Yoshida S., Hiraga K., Takehana T., Taniguchi I., Yamaji H., Maeda Y., 2016.** *A bacterium that degrades and assimilates PET*, *Science*. Vol. 351:1196-1199.

**Zettler ER., Mincer .T.J ., Amaral-Zettler. LA., 2013.** Life in the “plastisphere”: microbial communities on plastic marine debris. *Environmental Science and Technology*, 47: 7137-7146.

**Zettler, E.R., Mincer, T.J., Amaral-Zettler, L.A., 2013.** Life in the “Plastisphere”: microbial communities on plastics marine debris. *Environ. Sci. Technol.* 47 (13), 7137–7146.

**Autres références :**

## REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

**Conseil canadien sectoriel des plastiques (CCSP) ., 2009b.** Initiation aux plastiques. *In* Le Conseil canadien sectoriel des plastiques. *Initiation aux plastiques.* [http://www.careersinplastics.ca/pages/an\\_introduction\\_to\\_plastics/index\\_fr.shtml](http://www.careersinplastics.ca/pages/an_introduction_to_plastics/index_fr.shtml) (Page consultée le 1er février 2013).

**Gabirault.,2013** « Etude de valorisation des déchets plastiques de déchèteries », (WWW.Execetys.fr).

**Hestin M.,2013** « Analyse des contraintes juridiques et techniques pour un marquage des produits portant sur les recommandations de tri », (WWW.ademe.fr), Juin 2013

**Hidalgo-Ruz V; GutowL;Thompson C.et THIEIL M.,2012.**Microplastique in the marine environment : a review of the method used for identification and quantification. *Environnemental Science and Technologie*, 46, 30603075.

[http://www.chemistrydaily.com/chemistry/Plastic#Price\\_and\\_the\\_future](http://www.chemistrydaily.com/chemistry/Plastic#Price_and_the_future)

**ISO International Standard Organisation) 472., 1988.** Plastics - Vocabulary,

**Koch, P.,2013.** Plastics. *In* Advameg. *Chemistry Explained : Foundations and Applications.*

<http://www.chemistryexplained.com/Pl-Pr/Plastics.html>(Page consultée le 1er février 2013).

**Lower, S.,2009.** Polymers and Plastics: an Introduction. *In* Chem1 Virtual Textbook. *States of*

*Matter.* <http://www.chem1.com/acad/webtext/states/polymers.html>

**Plastics Historical Society (PHS),2010.** An Introduction to Plastics. *In* Plastics Historical Society