

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



Département de Génie de l'Environnement

PROJET DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME  
D'INGENIEUR D'ETAT EN GENIE DE L'ENVIRONNEMENT

Présenté par: Melle AKKOUCHE Rym

Thème :

Etude du comportement dans le sol de  
nouvelles formulations pour emballages  
plastiques biodégradables à base de  
mélanges PEBD/PLA

**Président :** Pr N. MAMERI

Professeur à l'E.N.P.

**Examineur:** Melle Y. DJEMAI-ZOUGHACHE

Chargée de cours à l'E.N.P.

**Promoteurs:** Pr. B. BOUBKEUR

Professeur à l'Université de  
Boumerdes

Pr. N. BELHANECHÉ

Professeur à l'E.N.P.

*Promotion 2010*

## **Remerciements :**

Mes remerciements vont vers Mme BELHANECHÉ et Mme BOUBKEUR dont la disponibilité, l'attention et l'écoute pour la réalisation de ce mémoire ont été d'un apport considérable. Je les remercie également pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu me consacrer et la patience dont elles ont fait preuve.

Je remercie Mr N.MAMERI d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire. Mes remerciements vont également à l'égard de Melle Y. DJEMAI-ZOUGHACHE qui a accepté d'examiner mon travail.

Il me tient sincèrement à cœur de remercier Mme BELHOUSSE et Mr GABOUZE du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, pour l'accueil chaleureux et pour m'avoir autorisé à effectuer les analyses spectroscopiques en relation avec ce mémoire.

Je tiens également à adresser mes remerciements à Mme MENASSERIA, de l'Entreprise Nationale des Transpolymères, pour les mesures des indices de densité.

Je remercie également Mr R. BELLOUCHE, chef du département « Pédologie » au sein de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques, pour avoir accepté d'analyser le sol.

Je suis reconnaissante à toute personne ayant contribué à la réalisation de ce travail, particulièrement les ingénieurs et étudiants en post graduation du département du Génie de l'Environnement (Hassiba, Soumia, Oum Essaad, Mlle HANK, Latifa) pour toute l'aide qu'ils m'ont prodigué.

Spéciaux remerciements à Yasmine, JiJi, Yakine, Necro et Amine Touimer pour l'aide qu'ils m'ont apportée.

J'adresse mes remerciements à mes parents qui m'ont toujours soutenu, à tous mes proches, spécialement mes cousines et mes meilleurs amis, qui m'ont été d'un très grand soutien moral, et à tous mes camarades, des deux côtés de la Méditerranée, par leur présence et encouragements.

Je remercie enfin, toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

# **Table des matières**

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>CHAPITRE I : Le Polyéthylène Basse Densité</b> .....	4
1. Historique.....	4
2. Fabrication.....	5
2.1 Polyéthylène basse densité radicalaire.....	5
2.2 Polyéthylène basse densité linéaire.....	6
3. Propriétés physiques.....	7
4. Propriétés mécaniques.....	7
5. Propriétés électriques .....	8
6. Propriétés thermiques.....	8
7. Comportement au feu.....	8
8. Tenue chimique.....	8
9. Tenue au temps.....	8
10. Applications.....	9
<b>CHAPITRE II : L'acide Polylactique</b> .....	10
1. L'acide lactique.....	10
1.1 Définition.....	10
1.2 Origine.....	10
2. Polymérisation de l'acide polylactique.....	11
2.1 Polycondensation directe.....	11
2.2 Polymérisation par ouverture du cycle R-O-P.....	11
3. Propriétés.....	12
3.1 Propriétés thermophysiques et mécaniques.....	12
3.2 Stabilité – Dégradation.....	14
4. Applications.....	15
5. Marché – Potentiel.....	16
<b>CHAPITRE III : Le sol</b> .....	18
1. Introduction.....	18
2. Pédogénèse.....	18
3. Texture.....	18

4. Structure.....	18
4.1 Facteurs de structuration.....	19
4.2 Caractéristiques morphologiques de la structure.....	19
4.3 Effet de la structure.....	19
5. Quelques éléments d'un bilan hydrique.....	19
6. Potentiel capillaire.....	20
7. Eléments nutritifs.....	20
a. Sources d'éléments nutritifs dans le sol.....	20
b. Le complexe sortant - phénomènes de sorption et d'échange.....	20
c. Immobilisation sous forme organique.....	21
d. Equilibre ionique – rétrogradation.....	21
e. Acidité du sol.....	21
8. Composés du sol .....	22
8.1 La fraction minérale du sol.....	22
8.2 La fraction organique.....	23
9. Les microorganismes dans le sol.....	25
9.1 Les bactéries.....	25
9.2 Champignons.....	25
9.3 Faune.....	26
10. Pollution des sols.....	26

#### **CHAPITRE IV : La biodégradation.....27**

1. Introduction.....	27
2. Microorganismes, nutrition et écologie microbienne.....	27
1.1. Nutrition et croissance microbienne.....	27
1.2. Nutrition des microorganismes.....	27
1.3. Croissance des microorganismes.....	28
1.4. Facteurs environnementaux.....	29
1.5. Métabolismes énergétiques.....	31
3. Biodégradation de la matière organique.....	33
2.1 Aspects généraux.....	33
2.2 Voies cataboliques des molécules organiques.....	34
a. Hydrolyse des polymères organiques.....	35
b. Assimilation des oligomères et des monomères.....	35

#### **CHAPITRE V : Méthode d'analyses.....36**

1. Méthodologie expérimentale.....	36
2. Analyse microbiologique.....	37

1.1 Matériel utilisé.....	37
1.2 Préparation des dilutions.....	37
1.3 Ensemencement sur boîtes de Pétri.....	37
3. Evolution du pH.....	37
4. Evolution de la perte de masse.....	37
5. Evolution de la densité.....	38
i. Pesée dans l'air.....	38
ii. Pesée dans l'eau.....	38
iii. Masse volumique et indice de densité.....	38
6. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier.....	39
6.1 Introduction.....	39
6.2 Principe.....	39
6.3 Interprétation des spectres.....	40
6.4 Préparation des films.....	42

## **CHAPITRE VI : Résultats et interprétations.....43**

1. Résultats.....	43
1.1 Analyses du sol.....	43
1.2 Analyses des échantillons de mélanges plastiques.....	44
2.3 Interprétation des spectres IR.....	45
2. Discussion.....	50
3. Conclusion.....	51

## **Conclusion générale.....52**

## **Références bibliographiques**

## **ANNEXES**

## Liste des abréviations

**PEBD** : Polyéthylène basse densité

**PEbdr** : Polyéthylène basse densité radicalaire

**PEbdl** : Polyéthylène basse densité linéaire

**g** : gramme

**cm** : centimètre

**mm** : millimètre

**min** : minute

**MPa** : méga pascal

**mm Hg** : millimètre mercure (1 atm=760 mm Hg)

**ROP** : ring opening polymerization (polymérisation par ouverture d'anneau)

**PLA** : acide polylactique (polylactic acid)

**PET** : polyéthylène téréphthalate

**IRTF** : Spectroscopie infrarouge à Transformée de Fourier

## Liste des tableaux

Tab I.1 : Différentes origines des matières plastiques.....	4
Tab. II.1 : Tableau comparatif de quelques propriétés mécaniques des polypropylènes, PE, HIPS, PLA et TPE.....	13
Tab. II.2: Comparaison des besoins énergétiques pour la fabrication de différents polymères.....	17
Tab. IV.2 : Classification physiologique des bactéries en fonction de la température.....	30
Tab. VI.1 : Dénombrement de la flore totale.....	43
Tab. VI.2 : Mesures du pH pour le 4 <sup>ème</sup> mois.....	44
Tab. VI.3 : Taux de perte de masse en fonction du pourcentage du PLA, pour les échantillons de l'étude intérieure.....	44
Tableau VI.4 : Taux de perte de masse en fonction du pourcentage du PLA, pour les échantillons de l'étude extérieure.....	44
Tableau VI.6 : Indices de densité.....	45

## Liste des figures

Fig. I.1 : polymérisation de l'éthylène.....	5
Fig. II.1 : Les deux stéréo-isomères de l'acide lactique.....	10
Fig. II.2 : Polymérisation de l'acide lactique.....	12
Fig. II.3 : Solubilité de différents PLA dans plusieurs solvants.....	13
Fig. II.4 : Biodégradation type de PLA commercial en compost à 60°C.....	15
Fig. III.1 : Devenir de la matière organique dans le sol.....	23
Fig. III.2 : Fixation des ions sur le complexe argilo-humique.....	24
Fig. III.3 : structure schématique d'un macro-agrégat.....	24
Fig. IV.1 : Courbe de croissance d'une culture bactérienne.....	28
Fig. IV.2 : Métabolisme énergétique.....	32
Fig. V.1 : Schéma d'un spectromètre à transformée de Fourier.....	39
Fig. V.2 : Interférogramme en sortie du détecteur.....	40
Fig. V.3 : Spectres de différents composés organiques.....	41
Fig. VI.1 : Spectres du PEbd témoin et PEbd intérieur.....	45
Fig. VI.2 : Spectres du PEbd témoin et PEbd extérieur.....	46
Fig. VI.3 : Spectres du PLA témoin et PLA 20% extérieur.....	47
Fig. VI.4 : Spectres du PLA 50% témoin et PLA 50% intérieur.....	47
Fig. VI.5. Spectres IR du PLA 50% témoin et extérieur.....	48
Fig. VI.6 : Spectres du PLA témoin et intérieur.....	49
Fig. VI.7 : Spectres du PLA témoin et extérieur.....	50



# INTRODUCTION GENERALE

Bien que les préoccupations dans le domaine de l'environnement remontent à de nombreuses années (1965 aux États-Unis, 1973 pour le premier programme d'action de la Communauté européenne), c'est le sommet de l'Arche à Paris, en 1989, qui a marqué le départ d'une grande croisade écologique internationale, dans laquelle l'emballage joue un rôle souvent de révélateur, parfois de bouc émissaire :

- Révélateur, car l'emballage, indicateur de niveau de vie des pays industrialisés, est considéré par certains comme le corollaire fatidique d'une civilisation de consommation de masse.
- Bouc émissaire, car l'emballage, s'il est visuellement et effectivement polluant, n'entraîne en fait que 2 % des déchets produits en Europe (entre 1,4 et 3,5 % selon les pays).

L'emballage présente, en effet, d'un point de vue environnemental, deux contraintes majeures:

— tout d'abord, il est produit à partir de ressources terrestres (matières premières et énergies) qui, pour la plupart, ne sont pas renouvelables ou le sont de plus en plus difficilement, alors que l'explosion démographique mondiale et le développement des niveaux de vie entraînent une demande de plus en plus importante d'emballage;

— de plus, l'emballage, après utilisation, encombre la nature. S'il n'était pas traité, il pourrait, à terme, nuire définitivement par son volume et par d'éventuelles pollutions qu'il pourrait lui-même générer.

Mais avant d'être néfaste, l'emballage est utile, nécessaire, indispensable. Sans minimiser ou négliger son influence sur l'environnement planétaire, il faut rappeler son caractère indispensable pour l'homme.

L'emballage optimise l'utilisation des ressources. Ainsi, les doses individualisées évitent le gaspillage des produits non consommés sur le moment, et qui peuvent se détériorer par la suite; les transformations industrialisées (telles celles des fruits, légumes, poulets) permettent l'utilisation de sous-produits (pour les nourritures ou aliments pour animaux, par exemple).

L'emballage, de par ses fonctions techniques et marketing, est devenu indispensable pour l'homme, même s'il peut entraîner des nuisances pour l'environnement.

C'est afin de réduire ces inconvénients sur l'environnement que des législations ont été mises en place. Si elles sont spécifiques à chaque pays, elles expriment cependant trois priorités :

— réduire à la source les emballages en nombre et en poids tout en conservant les minima techniques requis pour leurs utilisations;

— réutiliser les emballages, si cela est possible, et en tenant compte des critères d'hygiène, sécurité, aspect pratique, usage et économie;

— valoriser les emballages, après utilisation, en récupérant tout ou partie des matières utilisées (recyclage) ou de l'énergie consommée (incinération propre avec récupération de calories).

Ainsi en France, un marquage spécifique, dit Point vert, permet d'identifier les produits, destinés aux ménages, dont les metteurs sur le marché (fabricants ou importateurs) sont en conformité avec la réglementation [1].

Sous la barrière du développement durable, les pressions environnementales ne cessent de s'accroître. Les fabricants d'emballage n'échappent pas à la règle.

La révision de la directive 94/62/CE sur les déchets donne le ton : 22,5 % des «packagings» en plastique devront être recyclés d'ici à 2048, contre 15% aujourd'hui. Le plastique... encore une fois, est pointé du doigt.

Pollution visuelle par les sacs de caisse, appauvrissement des ressources fossiles, incinération de déchets... Les griefs ne manquent pas. Dans ce contexte, l'industrie de l'emballage, première consommatrice de plastique en Europe, recherche des alternatives.

Une opportunité pour l'emballage biodégradable, qui devrait prendre son essor. A une condition : l'amélioration des propriétés des bioplastiques, souvent moindres que celles des polymères classiques comme le polyéthylène téréphtalate (PET), le polypropylène (PP) ou le polyéthylène (PE). Et la différence se creuse encore avec les systèmes multicouches [2].

Le développement des plastiques biodégradables est devenu un objectif extrêmement important pour des plastiques qui ne polluent pas l'environnement. Les plastiques désintégrables qui contiennent de l'amidon de maïs, qui va se diviser en petites particules, sont fabriqués aux Etats Unis et au Canada, etc.

La désintégration du plastique dans ce cas semble être obtenue par la décomposition microbienne de l'amidon dans le plastique par action des microorganismes. Quand la quantité de l'amidon incorporé dans le plastique est faible, la désintégration souhaitée ne va pas avoir lieu [3].

D'un autre côté, si la quantité d'amidon est grande, la désintégration du plastique aura certainement lieu, mais l'amidon incorporé est granulaire et dépourvu de quelque plasticité et donc les produits de la résine résultante comme les plaques résineuses sont significativement inférieurs en propriétés mécaniques et requièrent une seconde transformation pour produire des récipients ou comme les produits comparés aux plastiques ordinaires ne contenant pas d'amidon [4].

Les recherches portent à la fois sur les biopolymères déjà utilisés et sur la mise au point de nouveaux matériaux ou mélanges. Preuve de cette montée en puissance, le nombre de publications scientifiques sur le sujet a triplé entre 1996 et 2000. Idem pour les brevets déposés, dont le nombre a augmenté de plus de 26% en quatre ans [5].

L'acide polylactique (PLA) est une alternative durable aux produits dérivés de la pétrochimie, comme le lactide à partir de laquelle il est finalement produit peut être obtenu par fermentation de sous-produits agricoles tels que l'amidon de maïs [1] ou d'autres substances riches en glucides comme le maïs, le sucre ou le blé.

Le PLA est plus cher que de nombreux produits en matière plastique à base de pétrole, mais il suffirait que son prix baisse pour que sa production augmente. La demande de maïs est de plus en plus importante en raison de son utilisation pour la fabrication de l'éthanol et surtout le PLA [6].

Pour empêcher l'accumulation des composés non dégradables dans la nature, il existerait deux solutions, actuellement objets de recherches : utiliser des souches microbiennes pouvant attaquer des produits jusque-là réputés non-dégradables ou développer des matériaux biodégradables par les souches communes.

Un matériau est réputé biodégradable si des microorganismes suffisent à le détruire. Des plastiques entièrement biodégradables, conçus à partir d'amidon de maïs, de seigle ou de blé sont maintenant fabriqués à l'échelle industrielle, peuvent remplacer aussi les plastiques issus du pétrole...

En modifiant la composition et le processus de plastification, on obtient des caractéristiques techniques - densité, module d'élasticité, résistance à la traction, déformation, etc. - tout à fait comparables à celles des polymères traditionnels, d'origine pétrochimique [7].

Le but de ce travail est de rechercher une nouvelle formulation pour les emballages plastiques, qui soit, à la fois, plus ou moins biodégradable et à un prix abordable.

Pour cela, des mélanges de différentes compositions à base d'acide polylactique (PLA), polymère biodégradable, et de polyéthylène basse densité (PEBD), polymère synthétique, issu de la pétrochimie, sont testées.

Ce travail a été réalisé, dans le cas d'une thèse de recherche en doctorat.


# Chapitre I : Le Polyéthylène Basse Densité

## 1. Historique

La fabrication industrielle du polyéthylène ne s'est développée qu'à partir de 1933 lorsque Fawcett et Gibson (pour la société ICI) découvrent la polymérisation haute pression radicalaire de l'éthylène. A 200°C et sous 1000 bars, le processus est initié par des traces d'oxygène, conduisant à un polyéthylène ramifié de faible densité (PE bd). Dès 1939 une usine est installée pour fournir du polyéthylène, utilisé comme isolant électrique des câbles dans les systèmes radars britanniques pendant la Seconde Guerre Mondiale [8].

Le tableau I.1 complète ce schéma en montrant que, quelle que soit l'origine des matières premières (charbon, gaz, pétrole), on passe par la phase des « grands intermédiaires » pour aboutir aux produits finis utilisés par les transformateurs : textile, mono-filament, extrusion en films et feuilles, injection-soufflage et extrusion- soufflage pour les corps creux, roto-moulage, calandrage, thermoformage, injection, co-extrusion (tuyaux, films et feuilles), mousse expansée [9].

Tab I.1 : Différentes origines des matières plastiques.

Matières premières	Produits intermédiaires	Dérivés	Matières plastiques
Pétrole Gaz naturel	Éthylène	Polymérisation Éthylbenzène – Styrène Chlorure d'éthyle Dichloroéthane – Chlorure de vinyle Tétrafluoréthylène Oxyde d'éthylène	Polyéthylène Polystyrène Silicone PVC PTFE Polyester
Pétrole Gaz naturel	Propylène	Polymérisation Chlorure allylique Phénol – Cyclohexanol Alcool Iso Acrylonitrile	Polypropylène Polyester Polyamide 6 ABS – SAN
Charbon (coke) Gaz naturel	Acétylène	Acrylonitrile Chlorure de vinyle Dérivés vinyliques	Métacrylate PVC Acétate de polyvinyle
Gaz naturel Pétrole	Butane Butylène	Butadiène	Caoutchouc Styrène Butadiène
Charbon (Gaz de houille) Pétrole	Méthane	Méthanol 	Phénol-formol Mélamine-formol Urée-formol Acétate de polyvinyle

Selon les conditions de polymérisation, on le fabrique maintenant sous différentes espèces

- polyéthylène basse densité (PE bd ou PE bdr) à nombreuses ramifications irrégulières, peu cristallin ;
- polyéthylène basse densité linéaire (PE bdl) a ramifications contrôlées en longueur (3 à 7 atomes de carbone) et en répartition [10].

On trouve ce polymère basique  $-(CH_2)_n$  ( $d = 0,880$  à  $0,965$ ) pour la fabrication des emballages souples dans de multiples applications en fonction du procédé de polymérisation, de sa densité et de son grade.

C'est le grand polymère basique pour la fabrication des emballages souples et que l'on trouve dans de multiples applications en fonction du procédé de polymérisation, de sa densité et de son grade [9].

## 2. Fabrication

Il s'obtient à partir de l'éthylène (fig. I.1)

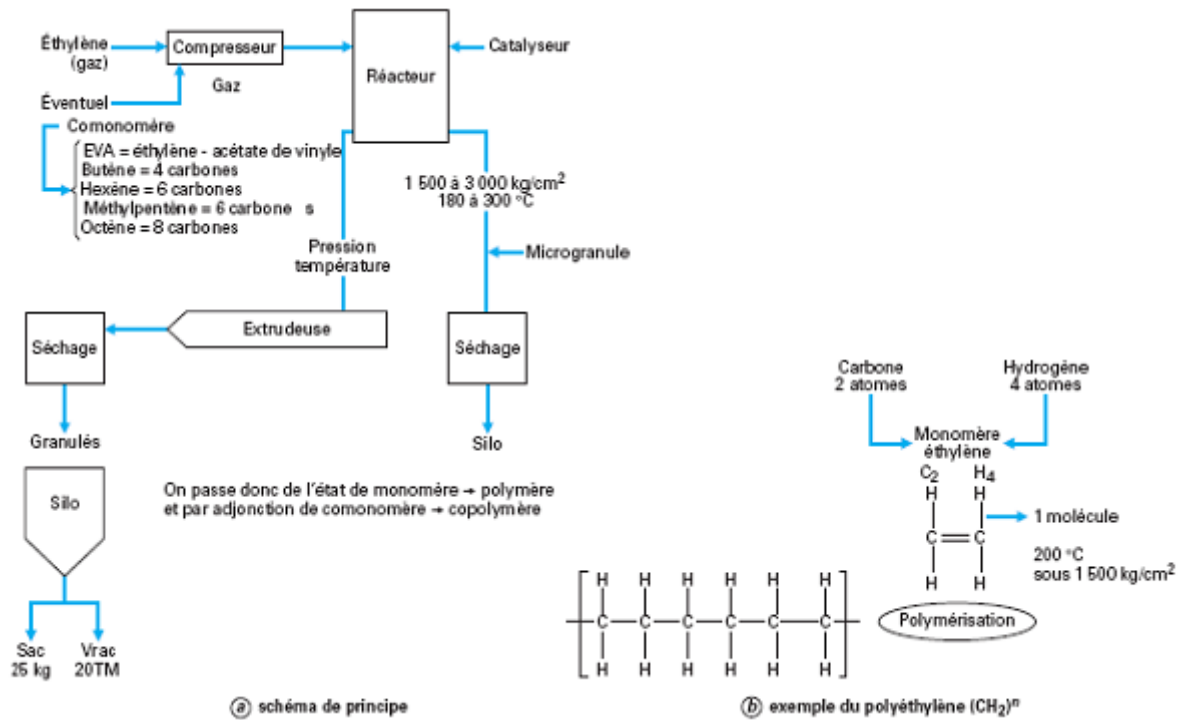


Fig. I.1 : polymérisation de l'éthylène.

Il se présente sous deux formes :

### 2.1 Le polyéthylène basse densité radicalaire (PE bdr) :

C'est le premier procédé à avoir été développé ; il représente encore la production la plus élevée. Les chaînes moléculaires sont inorganisées et la polymérisation s'effectue sous haute pression. Ses caractéristiques physiques et mécaniques – transparence, brillance, résistance des soudures – sont dans la moyenne et donnent encore largement satisfaction pour la plupart des applications [9].

Il est obtenu par polymérisation en continu de l'éthylène sous haute pression à des températures de 150° C à 300° C en présence d'un initiateur générateur de radicaux (d'où l'appellation polyéthylène basse densité radicalaire PE bdr).

Deux procédés ont été développés industriellement :

– Procédé en autoclave

Pression de 120 à 250 MPa.

Initiateur : peroxydes ou per-esters organiques.

– Procédé tubulaire

Le réacteur est constitué d'un tube haute pression de 500 à 1 500 m.

– Pression de 120 à 300 MPa.

– Initiateur : traces d'oxygène.

Les macromolécules de PE bd sont toujours ramifiées, entraînant pour les polymères

- une faible cristallinité ;
- une densité relativement basse (0,91 à 0,93) [10].

Mais au fur et à mesure que l'on recherche :

- une diminution des épaisseurs ;
- une soudabilité de plus grande résistance mécanique ;
- une plus grande transparence ;
- un hot tack (résistance à chaud de la soudure) amélioré ;
- de meilleures propriétés organoleptiques,

Le transformateur est amené à s'orienter vers les PE linéaires.

### 2.2 Le polyéthylène basse densité linéaire :

Différents co-monomères sont utilisés lors de la polymérisation :

- le butène avec quatre carbones ;
- l'hexène et le méthylpentène avec six carbones ;
- l'octène avec huit carbones.

Les chaînes moléculaires sont organisées avec des branchements sur mesure (figure 3b).

Sa transformation en films et gaines est plus délicate, demandant plus de puissance à la vis et une filière spécifique. C'est la raison pour laquelle il est souvent en mélange avec le PE radicalaire dans des proportions variant de 20/80 à 50/50.

■ Avantages : amélioration des propriétés mécaniques, allongement, résistance à la déchirure amorcée, perforation, ce qui entraîne :

- une diminution des épaisseurs de l'ordre de 15 à 20 % par rapport au PE-BD radicalaire ;
- une soudure avec un excellent hot tack spécialement recherché pour les machines FFF verticales (machines form and fill dans un plan vertical) ;
- une diminution du pourcentage de fuites en présence de légères souillures dans la zone soudée [9].

Divers procédés ont été développés afin de fabriquer des polyéthylènes de masses volumiques comprises entre 0,91 et 0,94 g/cm<sup>3</sup> de structure régulière.

Leur caractéristique commune est que l'éthylène est copolymérisé avec des  $\alpha$ -oléfines (butène, hexène, octène) à l'aide des catalyseurs stéréospécifiques du type Ziegler.

#### a. Procédé haute pression

Installations similaires à celles utilisées pour le PE bd :

- température de l'ordre de 200 à 250° C ;
- pression élevée (100 MP) ;

#### b. Procédé basse pression

- En solution
  - en milieu solvant (cyclohexane) ;
  - température élevée : 180 à 250° C ;
  - faible pression : 2,5 à 4,2 MPa.



- En lit fluidise
- température d'environ 95° C ;
- faible pression ;
- catalyseur : a base de chrome.
- En milieu solvant
- en développement (procédé Ziegler).

### 3. Propriétés physiques

- Densité : de 0,91 a 0,96 ; elle croît avec la cristallinité. A densité égale, le PE bdl est plus cristallin que le PE bdr.

Quel que soit le type de polymérisation, on note les évolutions suivantes :

- en diminuant la densité : souplesse améliorée, abaissement du point de fusion, meilleure transparence, plage de soudure plus large, moins bonne barrière à H<sub>2</sub>O, facilité de transformation, diminution de la tenue au froid négatif, excellente résistance à la perforation et à la déchirure ;
- en augmentant la densité : mise en œuvre plus difficile, propriétés optiques moins bonnes, plage de soudure réduite, température de soudure plus élevée, bonne résistance au froid négatif, possibilité de pasteuriser voire stériliser, amélioration de la barrière à H<sub>2</sub>O, augmentation de la rigidité, meilleure résistance aux agents chimiques, possibilité d'extruder des films de faible épaisseur [10].
- Perméabilité : les polyéthylènes sont perméables aux hydrocarbures, aux alcools, aux gaz, mais peu perméables a la vapeur d'eau. Cette perméabilité croît quand la cristallinité croît.
- Qualités optiques : les polyéthylènes sont opaques en fortes épaisseurs et transparents en films [9].

### 4. Propriétés mécaniques

Thermoplastiques semi-rigides, les polyéthylènes sont très souples en faible épaisseur.

Les propriétés mécaniques dépendent de la configuration des molécules et sont d'autant meilleures que le degré de polymérisation est plus élevé. Les sont très sensibles a l'orientation (comme toutes les polyoléfines).

En particulier :

La rigidité et la résistance a la rupture augmentent avec la cristallinité et la masse moléculaire ;

La résistance au choc et à la déchirure diminuent avec la cristallinité, et augmentent avec la masse moléculaire.

Le grade (ou mfi : melt flow indice) est l'indice de fluidité normalisé (ASTM D 1238) qui mesure la masse de polymère écoulé pendant un temps donné (10 min), sous une charge définie (2,160 g) au travers d'un orifice calibré (filière = 2,1 mm), à une température donnée (190 °C).

Les propriétés qui en découlent sont :

- avec un grade bas : le produit est visqueux avec des chaînes longues, une bonne rigidité, d'où son utilisation pour la production de gaines par extrusion-gonflage ;
- avec un grade élevé : le produit est fluide avec des chaînes courtes, plus souple d'où ses

applications pour la production de film en filière plate, l'extrusion-lamination et couchage et l'injection.

### 5. Propriétés électriques

Les propriétés d'isolation électrique sont exceptionnelles : permittivité relative et facteur de dissipation diélectrique faibles, rigidité diélectrique élevée.

Les propriétés, très peu influencées par les variations de température, subsistent pour des tensions et des fréquences élevées. Elles ne sont pas altérées par l'humidité.

### 6. Propriétés thermiques

Les PE bd conservent leurs propriétés dans une plage de températures relativement importante. La température de fragilité se situe à plusieurs dizaines de degrés en dessous de zéro et la tenue, à 80-85° C, reste satisfaisante, si les contraintes ne sont pas excessives.

### 7. Comportement au feu

Les polyéthylènes sont inflammables, en dégageant essentiellement du dioxyde de carbone et de l'eau.

### 8. Tenue chimique

En général, la résistance chimique est très bonne.

Les polyéthylènes résistent

- aux acides faibles et acides forts non oxydants ;
- aux bases faibles et fortes ;
- aux solvants organiques en dessous de 80° C (mais ils leurs sont perméables).

Les polyéthylènes sont sensibles au phénomène de fissuration sous tension (stress-cracking) surtout en présence de tensio-actifs.

### 9. Tenue dans le temps

La chaleur, l'oxygène de l'air, les rayons ultra-violetts altèrent les propriétés physiques, mécaniques et chimiques des polyéthylènes.

Points forts :

- excellente résistance au choc
- excellente caractéristiques diélectriques
- inertie chimie
- qualité alimentaire
- soudage thermique facile

Limites d'utilisation :

- sensibilité au phénomène de fissuration sous tension (stress-cracking)
- retrait important au moulage
- soudage haute fréquence impossible
- collage très difficile
- sensibilité aux ultraviolets [10]

### 10. Principales applications

#### ■ PE bd radicalaire

Film pour emballage basique, sacs et sachets pour petite et moyenne contenance, film de fardelage, palettisation, film agricole, film de suremballage à faible rétraction. En résumé, tout conditionnement et emploi basique où le prix de revient est privilégié : petit flaconnage, tubes...

Complexes fabriqués par extrusion-lamination : matériaux d'emballage à base de papier, de carton, ou d'aluminium enduits

Le PE bdr réticulé chimiquement est employé comme isolant des câbles moyenne et basse tension.

#### ■ PEBD linéaire

Film technique utilisé seul ou en complexage spécialement pour la qualité des soudures et la valeur du hot tack. Il est de plus en plus co-extrudé avec un PE radicalaire pour ne représenter que la partie en contact avec le produit.

Conditionnement sur machine automatique FxF verticale mais aussi en agriculture pour sa résistance à la perforation. Dans le domaine des plats cuisinés, il permet le réchauffage par immersion [9], [10].



# Chapitre II : L'acide polylactique

## 1. L'acide lactique

### 1.1 Définition

L'acide 2-hydroxypropanoïque, ou lactique, est l'acide organique le plus présent dans la nature. Il est produit par les animaux, les hommes, les plantes, les microorganismes, mais peut aussi dériver de l'acétaldéhyde, de l'éthanol, de l'acétylène, ou de l'éthylène.

C'est une des plus petites molécules optiquement actives, isolée pour la première fois par le chimiste suédois Scheele en 1780. Il existe donc deux énantiomères : L(+) et D(-). L'acide lactique L(+) est utilisé comme acidifiant dans l'industrie alimentaire à cause de ses bonnes propriétés antimicrobiennes et de son profil de saveur modérément acide. L'acide lactique est également largement utilisé dans les industries cosmétique, pharmaceutique et chimique. En raison d'une excellente réactivité, due aux groupes carboxyles et hydroxyles qu'il contient, il peut être converti en différents produits chimiques comme l'oxyde de propylène, le propylène glycol, l'acide acrylique, la 2,3-pentane-di-one, le di-lactide ou l'ester lactate de méthyle.

### 1.2 Origine

L'acide lactique peut être produit par synthèse pétrochimique ou par fermentation biotechnologique. Cependant, la synthèse chimique conduit à un mélange racémique.

C'est pourquoi la synthèse par fermentation est préférée dans l'industrie des biopolymères. En effet, effectuée principalement à partir de pyruvate par action de déshydrogénase, la réaction de production d'acide lactique peut être orientée vers l'énantiomère D(-) ou L(+) avec ou sans différents coproduits. C'est l'isomère L(+) qui est utilisé par le métabolisme humain à cause de la présence de L lactate déshydrogénase. La matière première la plus utilisée est le maïs.

Dès 1845, la solidification de l'acide lactique par auto estérification est découverte, mais sa grande instabilité à l'humidité n'est considérée comme un avantage qu'à partir de 1960 pour des applications dans le domaine médical. Depuis, l'étude de ce matériau s'est accélérée et les applications se sont multipliées [11].

L'acide lactique est donc un acide organique comportant trois atomes de carbone, dont le premier, par degré d'oxydation décroissant, fait partie d'un groupement carboxylique, le second est lié à un groupement alcool, et le troisième fait partie d'un groupe méthyle.

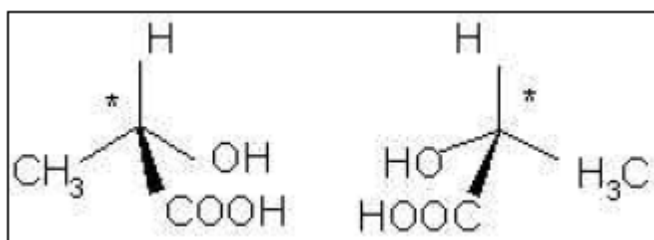


Fig. II.1 : Les deux stéréoisomères de l'acide lactique

Il existe sous deux formes isomériques optiquement actives (cf. figure II.1).

Il est soluble dans l'eau et dans les solvants organiques miscibles à l'eau, mais insoluble dans d'autres solvants organiques.

Il est :

- faiblement volatile ;
- masse molaire :  $90,08 \text{ g.mol}^{-1}$ ;
- point de fusion :  $16,8^\circ\text{C}$  à pression atmosphérique.
- point d'ébullition :  $82^\circ\text{C}$  sous  $0,5\text{mmHg}$  et  $122^\circ\text{C}$  sous  $14 \text{ mm Hg}$ .

## 2. La polymérisation de l'acide lactique

La transformation de l'acide lactique en polyacide lactique peut être accomplie de plusieurs façons, en fonction des caractéristiques du polymère attendues.

### 2.1. Polycondensation directe

La première étape incontournable est la polycondensation de l'acide lactique en oligomères de faible masse molaire. Cette condensation directe est une réaction équilibrée entre les acides libres, l'eau et les polyesters, d'où la difficulté d'élimination de l'eau « résiduelle » tout au long de la polymérisation, ce qui limite la masse molaire finale accessible.

Même si diverses méthodes de polycondensation ont été explorées pour obtenir de plus fortes masses molaires, comme l'utilisation de divers matériaux, c'est la polycondensation par ouverture des cycles lactides qui est utilisée pour la fabrication industrielle du PLA. Ceci est principalement dû au fait que les temps de polymérisation par polycondensation directe sont longs, et que la réaction nécessite souvent l'utilisation de solvants comme le diphényl-éther, ce qui complique le procédé et augmente les coûts, notamment pour l'élimination du solvant.

Cependant, l'étape de cyclisation en lactides est elle-même onéreuse, ce qui pousse les recherches dans le sens de la polycondensation.

### 2.2. Polymérisation par ouverture de cycles ou ROP

C'est par polymérisation par ouverture de cycles que procède Cargill Dow LLC, le principal fabricant de PLA. La condensation continue d'acide lactique en solution aqueuse constitue la première étape du procédé (1). Ensuite les pré-polymères de PLA de faible masse molaire obtenus sont convertis en un mélange de stéréo-isomères de lactide, par l'intermédiaire d'un catalyseur à base d'étain pour améliorer le rendement et la sélectivité de la réaction de cyclisation intramoléculaire (2).

Le mélange de lactide fondu est ensuite purifié par distillation sous vide, puis le PLA est produit par ouverture des cycles, réaction catalysée de nouveau par un catalyseur à base d'étain (3). Une fois la polymérisation complète, les monomères persistants sont éliminés sous vide et réinjectés dans le cycle (4) de la figure II.2.

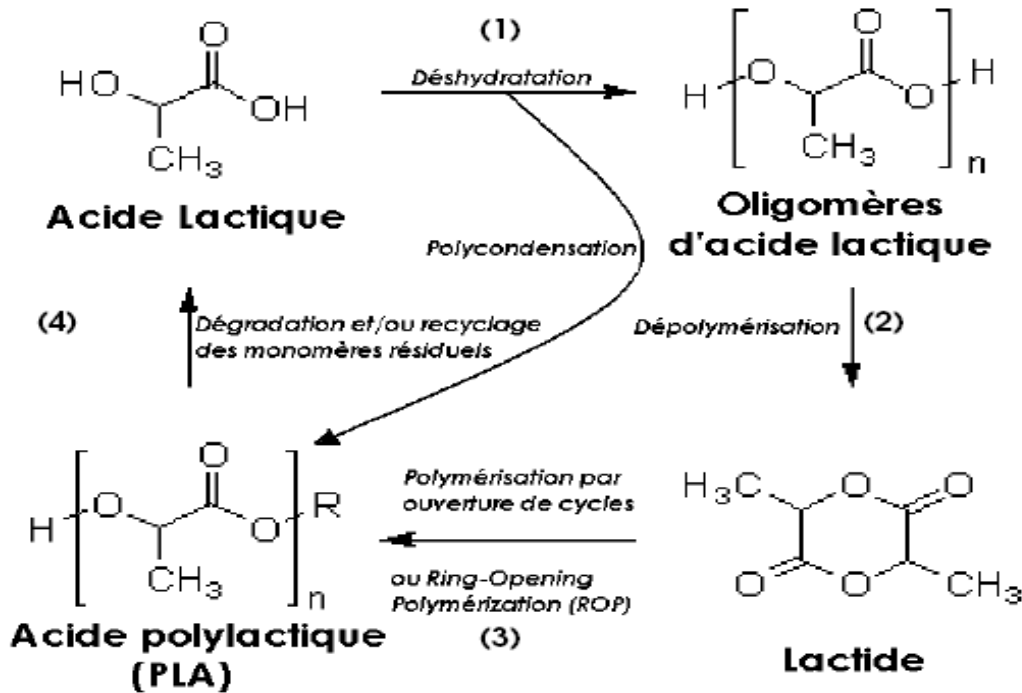


Fig. II.2 : Polymérisation de l'acide lactique [12].

### 2.3. Conditions de polymérisation

La documentation concernant la polycondensation de l'acide lactique est particulièrement fournie. Elle inclut principalement :

- les différentes voies de synthèse ;
- la problématique de la catalyse ;
- l'influence de la composition en stéréo-isomères sur les caractéristiques du polymère final ;
- la possibilité de co-polymériser l'acide lactique avec d'autres composés.

## 3. Propriétés

Nous avons vu que les caractéristiques du polymère dépendent fortement de sa constitution en isomères D (conduisant à la formation de PLDA) et L (PLLA).

Ceci constitue un gros avantage, puisque le polymère peut ainsi être synthétisé « à façon », les voies de synthèses, les mélanges en énantiomères, et les masses molaires étant des paramètres parfaitement contrôlés. Les propriétés détaillées ci-dessous sont les constantes générales du PLA commercial.

### 3.1 Propriétés thermophysiques et mécaniques

Le PLLA est un polymère semi-cristallin dont les températures de transition vitreuse et de fusion se trouvent aux alentours de 55 et 180°C respectivement. Il est transparent, brillant, et rigide. Sa solubilité dans les solvants dépend de sa masse molaire et de sa cristallinité.



La masse volumique du PLA ( $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$ ) est plus faible que celle du polyéthylène téréphthalate ou PET ( $1,34 \text{ g.cm}^{-3}$ ), mais supérieure à celle du polystyrène choc ou HIPS ( $1,05 \text{ g.cm}^{-3}$ ) et aussi plus élevée que celle de la plupart des polymères conventionnels, comprise entre 0,8 et  $1,1 \text{ g.cm}^{-3}$  [11].

La figure II.3 indique la solubilité de polymères obtenus à partir de différentes proportions d'isomères L ou D, dans quelques solvants communs :

ISOPROPYL ETHER						
CYCLOHEXANE						
XYLENE	■	■				
ACETATE D'ETHYL	■	■		■		
TETRAHYDROFURAN	■	■				
CHLOROFORME	■	■	■	■	■	■
METHYL ETHYL CETONE	■	■				
FURAN	■	■				
ACETONE		■				
1,4 - DIOXANE	■	■				
LACTATE D'ETHYL		■				
1,3 - DIOXOLANE	■	■				
PYRIDINE	■	■				
DIMETHYLSULFOXIDE	■	■				
N,N-DIMETHYLFORMAMIDE		■				
ETHANOL						

Soluble ■  
 Graduellement ■  
 Insoluble ■

P(LLA)      P(rac-LA)      P(LLA-co-GA)      P(LLA-co-CL)      P(rac-LA-co-TMC)      P(LLA-co-DXO)

Fig. II.3 : Solubilité de différents PLA dans plusieurs solvants [13]

Le PLA semi-cristallin possède de meilleures propriétés mécaniques que sa version amorphe. La masse molaire influence également les performances du polymère, mais pas la voie de synthèse.

A titre de comparaison, le tableau II.1 indique les principales propriétés du PLA, du polypropylène, du polyéthylène (PE), du polystyrène choc (HIPS) et d'un élastomère thermoplastique (TPE) [14].

Tab. II.1 : Tableau comparatif de quelques propriétés mécaniques des polypropylènes, PE, HIPS, PLA et TPE

Nom commercial	Abréviation	Producteur	Résistance à la traction	Module
			MPa	GPa
Stamylan P412MN40	Polypropylène	Sabic	26	1,55 (flexion)
Hostalen GC7260	PE	Basell	30	1,35 (traction)
Lacqrene 4240	HIPS	Atofina	26	2 (flexion)
PLA 2002D Nature Works	PLA	Cargill Dow	53	3,5 (traction)
Sconablend TPE 60x111	TPE	Ravago	4	0,02 (traction)

La résistance à l'impact du PLA est faible, comparable à celle du PVC non plastifié. La dureté, la rigidité, la résistance à l'impact et l'élasticité du PLA sont similaires à celles du PET. Les films de PLA orientés possèdent des propriétés comparables à celles de films de cellophane [12].

Le PLA constitue une bonne barrière aux odeurs et présente une bonne imperméabilité à l'huile. En revanche, il ne convient pas pour des applications en présence de liquide, bien qu'il soit une barrière à l'humidité plus efficace que les polymères à base d'amidon. En comparaison au polypropylène, les granulés de PLA sont beaucoup plus hygroscopiques.

Les feuilles de PLA ne sont toutefois pas aussi sensibles à l'eau. La résistance aux solvants, acides et bases est faible. A la différence de polymères aromatiques comme le PET, la structure aliphatique linéaire du PLA lui confère une bonne résistance aux UV. Il est plus facile à imprimer, métalliser et colorer que les PE et le PP.

### 3.2 Stabilité – dégradation

La stabilité thermique des polyesters aliphatiques est en général limitée du fait de la fragilité de la liaison carbonyle à haute température. Sördergård et Stolt [15] rapportent que les réactions impliquées dans cette dégradation thermique peuvent être la thermohydrolyse, la dépolymérisation, la dégradation thermo-oxydative, ou des réactions de trans-estérification. La dégradation thermique semble de plus corrélée à l'hygroscopie du polymère. De façon générale, un polymère chauffé à 10°C au-dessus de sa température de fusion pendant une longue durée subit une diminution significative de sa masse molaire [16].

L'hydrolyse des polymères conduit à une fragmentation des molécules, dans le processus inverse de la polymérisation. L'hydrolyse du PLA ne doit pas se produire en usage, sauf dans le cas d'un usage médical, mais est requise en fin de vie.

Cette hydrolyse débute par une phase d'absorption d'eau, suivie d'une dissociation des liaisons esters, au hasard, puisque la réactivité de toutes les liaisons est équivalente. Le degré de cristallinité influence le taux d'hydrolyse, car les portions cristallines réduisent la capacité d'absorption d'eau.

La dégradation du PLA cristallin est plus lente que celle le polymère amorphe.

Pour la dégradation en milieu biologique, Sördergård et Stolt [15] rapportent que certaines enzymes comme les pronases, protéinase K, et broméline, ont un effet significatif sur le taux d'hydrolyse, de la même façon que les ficines, estérase, et trypsine dans une moindre mesure. D'autres microorganismes sont capables d'utiliser les polymères à base d'acide lactique comme source de carbone. *Fusarium moniliforme* et *Penicillium roqueforti* dégradent des polymères hydrolysés d'acide lactique racémique.

En résumé, la dégradation du PLA dans l'environnement se produit en deux étapes :

- les chaînes de polyesters de forte masse molaire s'hydrolysent en oligomères de plus faible masse. Cette réaction peut être accélérée par des molécules acides ou basiques, ainsi que par la température et l'humidité.
- La fragilisation du plastique se poursuit jusqu'à ce que la masse molaire soit inférieure à 40000 g.mol<sup>-1</sup>. C'est à ce stade que les microorganismes commencent à convertir les oligomères en dioxyde de carbone, eau et humus [11].

La figure II.4 indique l'évolution de la masse molaire et de la biodégradation du PLA en compost en fonction du temps.

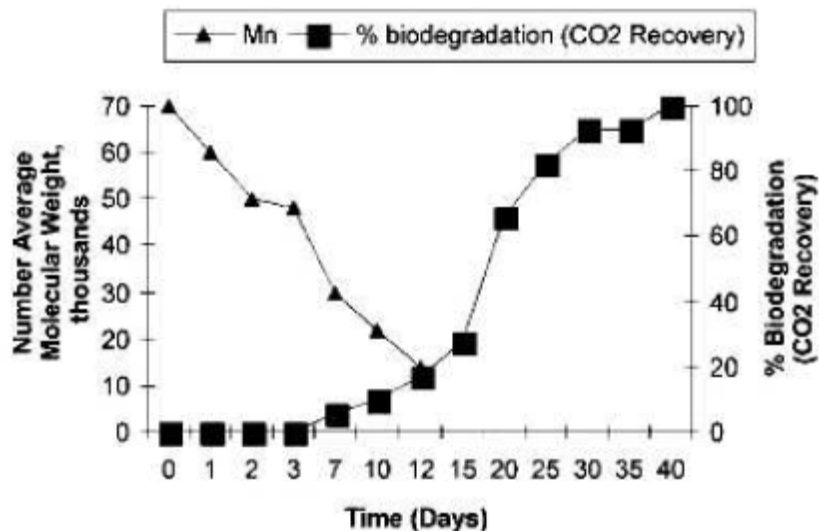


Fig. II.4 : Biodégradation type de PLA commercial en compost à 60°C [13]

Le PLA se dégrade dans l'environnement en 6 mois à 2 ans, contre 500 à 1000 ans pour des plastiques conventionnels comme le polystyrène ou le polyéthylène [16].

#### 4 Applications

Les caractéristiques rhéologiques du PLA et la possibilité d'adapter sa composition par le contrôle de certains paramètres que sont la ramification, la proportion en isomères D et la répartition de masse molaire, en font un polymère adapté à l'extrusion de feuilles, au soufflage de feuilles minces, au filage de fibres, mais aussi au thermoformage, et à la formation de films, entre autres.

Du mécanisme de dégradation, le PLA convient idéalement pour des applications dans l'environnement où la récupération du produit n'est pas désirée, comme des films agricoles, et les sacs. On peut citer comme principales applications : l'emballage, le revêtement papier, les fibres, les films et une grande variété d'articles moulés [11].

Sur le marché de l'emballage, sa bonne transparence, sa résistance à l'huile et ses bonnes propriétés mécaniques font du PLA un polymère adapté à l'emballage alimentaire. Hors du marché alimentaire, le PLA est utilisé comme emballage rigide des batteries de téléphone Panasonic par exemple, ou comme fenêtre d'enveloppes au Japon. Sa résistance aux alcools permettrait d'autre part son utilisation dans l'industrie de la parfumerie [12].

Dans le secteur du transport, Toyota, par exemple, développe des applications pour le PLA sous forme de fibres de garnissage d'intérieur d'automobiles, ou de matrice de composites / fibres naturelles pour objets moulés [11].

Dans le secteur électronique, Fujitsu et Sony produisent respectivement des touches de claviers d'ordinateurs, et des corps de walkman. De la même façon, Yamagushi et al. [15] rapportent qu'un disque compact en PLA appelé « mild disc » a été développé par Sanyo, en remplacement du polycarbonate à très longue durée de vie utilisé actuellement. Seul le coût, trois fois plus élevé, de ces produits, peut ralentir leur développement.

Le procédé de NEC Corporation, pourrait élargir les domaines d'application du PLA en lui conférant une bonne ininflammabilité sans utiliser d'halogènes ou de composés phosphorés [15].

Sous forme de fibres, le PLA peut prendre part à la fabrication d'articles ménagers, comme les tapis par exemple. D'autres applications prometteuses incluant des fibres ou des non-tissés, où les tissus sont à base de PLA seul ou en mélange avec de la laine ou du coton, sont comparables ou supérieures aux mélanges à base de PET.

## 5 Marché – Potentiel

Malgré de bonnes propriétés et une large gamme d'applications possibles, la viabilité commerciale du PLA a longtemps été limitée du fait de coûts de production élevés. Jusqu'à récemment, le succès du PLA en tant qu'alternative aux polymères d'origine fossile est resté timide, et la plupart des applications se limitaient au domaine biomédical. La coentreprise entre Cargill et Dow Chemicals en 1997 a mis l'accent sur la production et le marketing du PLA dans l'intention de diminuer de façon significative les coûts de production et d'en faire un polymère de grande consommation [11].

Une étude datant de 2004 de l'Université d'Utrecht, aux Pays-Bas, pour l'Institut de la Commission Européenne pour les Etudes Technologiques Prospectives de Séville, en Espagne [8], montre le potentiel de substitution des polymères d'origine fossile par le PLA. LDPE, HDPE et polypropylène sont ainsi les polymères dont le PLA paraît le plus grand concurrent en termes d'efficacité.

Narayan et al. [16] rapportent les différents partenariats établis entre industriels pour le développement de la fabrication de PLA à grande échelle. Les plus gros producteurs sont Dow Chemicals et Cargill, sous la coentreprise Cargill Dow (EcoPLA, Nature Works TM) aux Etats-Unis.

Leur PLA est produit par ROP et les principales applications sont les fibres et les matériaux d'emballage. Ils sont également en coentreprise avec Purac (Purasorb), aux Pays-Bas, pour la production d'acide lactique à partir de maïs. Une collaboration est également entretenue avec Mitsubishi Polymers.

Apack, en Allemagne, est une entreprise d'emballage alimentaire qui utilise la technologie de Nestlé Chemicals en collaboration avec Fortum Oyj, en Finlande. Galactic, en Belgique, est producteur d'acide lactique provenant de sucre de betterave. Leur filiale Brussels Biotech travaille sur le développement de produits à base d'acide lactique.

Hycail, aux Pays-Bas, coentreprise entre Dairy Farmers, aux Etats-Unis et l'Université de Groningen, travaille sur une installation pilote de production d'acide lactique et de PLA. Mitsui Chemicals, au Japon, produit du PLA par polycondensation directe.

Shimadzu Corporation, au Japon, produit du PLA par ROP. Alkermers, Birmingham Polymers, Boehringer Ingelheim, Chronopol, Biomer, Inventa Fischer GmbH, sont d'autres acteurs du développement du PLA.

Malgré le nombre d'études menées au sujet des propriétés du matériau, des procédés de fabrication et de transformation, et le développement industriel important, l'implantation définitive du PLA sur le marché des polymères est ralentie par deux inconvénients principaux :

- le prix de vente, car les coûts de fabrication et le prix des matières premières restent élevés.

L'explication principale de ce surcoût réside dans le prix de l'acide L-lactique pur, en comparaison au prix de l'éthylène par exemple.

- l'impact environnemental ne doit pas amener à considérer seulement la dégradabilité du produit final.

En effet, la fabrication industrielle du PLA implique des besoins totaux en énergie fossile en dessous de ce que les polymères pétrochimiques requièrent, mais les besoins en énergie lors du procédé sont plus élevés, comme le montre le tableau 5.

Tab. II.2 : Comparaison des besoins énergétiques pour la fabrication de différents polymères [15]

	Energie fossile - Procédé	Energie fossile - Matières premières	Energie fossile totale	Emission de gaz à effet de serre – énergie et procédé	Absorption de CO <sub>2</sub> , croissance de la plante	Emissions nettes de gaz à effet de serre
	GJ/t <sub>plastique</sub>	GJ/t <sub>plastique</sub>	GJ/t <sub>plastique</sub>	kg <sub>CO<sub>2</sub>,eq</sub> / t <sub>plastique</sub>	kg <sub>CO<sub>2</sub></sub> / t <sub>plastique</sub>	kg <sub>CO<sub>2</sub>,eq</sub> / t <sub>plastique</sub>
<b>PLA</b>	29,2 à 54,1	0	29,2 à 54,1	1890 à 3990	-2190	-300 à 1800
<b>HDPE</b>	31	49	80	1700	0	1700
<b>PET</b>	38	39	77	4300	0	4300
<b>Nylon</b>	81	39	120	5500	0	5500

Nous avons vu que la dégradation du matériau ne peut être accomplie qu'après une période de chauffage, ce qui nécessite des infrastructures particulières. Ainsi, la dégradabilité du PLA, qui constitue son principal avantage, n'est pas actuellement exploitée.

# Chapitre III :

## Le sol

## 1. Introduction :

Un sol est une pellicule d'altération recouvrant une roche; il est formé d'une fraction minérale et de matière organique (humus). Un sol prend naissance à partir de la roche puis il évolue sous l'action des facteurs du milieu, essentiellement le climat et la végétation.

## 2. Pédogénèse

Le sol apparaît, s'approfondit et se différencie en strates superposées, les horizons pédologiques, qui forment le profil pédologique. Il atteint finalement un état d'équilibre avec la végétation et le climat. Classiquement, les principaux horizons sont les suivants:

- \* Horizon A: horizon de surface à matière organique (débris de végétaux)
- \* Horizon C: roche peu altérée
- \* Horizons B: horizons intermédiaires apparaissant dans les sols évolués.

Les sols peu évolués ont un profil AC, les sols évolués ont un profil ABC. Les horizons B sont formés par l'altération de la roche ou par les mouvements de matière depuis A [17].

## 3. Texture :

La texture du sol se définit par les proportions relatives de particules de dimensions différentes. Elle peut s'apprécier sur le terrain ou être déduite de l'analyse granulométrique qui permet, précisément, de déterminer les proportions des diverses particules, réparties en classes de démentions.

La connaissance de la texture permet d'indiquer les tendances du sol quant à ses qualités physiques :

- les sols riches en sables sont perméables, filtrants, ce d'autant plus que le sable est grossier.
- si aux éléments grossiers, s'adjoignent beaucoup de sable fin et de limon, ceux-ci tendent à colmater les interstices entre les éléments grossiers, rendant le sol plus ou moins imperméable.
- si des proportions suffisantes d'argile s'ajoutent aux limons et aux sables, surtout en présence d'humus, une structure fragmentaire peut prendre naissance, garantissant, à la fois, une perméabilité tout en retenant assez d'eau pour la végétation.

Il existe 3 grandes catégories de sols:

- les sols sablonneux (grattent sous les doigts à partir de 0.1mm.)
- les sols limoneux (donnent, entre les doigts, des sensations d'onctuosité.)
- les sols argileux (peuvent se pétrir en pâtons qui ne s'effritent pas dans la main.)

## 4. Structure:

La structure du sol se définit par le mode d'assemblage des constituants solides. Elle est due à la cimentation des grains grossiers (limon, sable) par éléments colloïdaux, argile et humus associées en complexes argilo-humiques.

C'est un indice fidele de l'état de fertilité du sol.

#### 4.1. Facteurs de structuration:

Facteurs favorables:

- Teneurs équilibrées en argile et en humus, riche en acides humiques présence de calcium
- Teneurs suffisantes en oxydes de fer et d'aluminium
- Présence de vers de terre (surtout les espèces fouisseuses) jouant un rôle primordial dans la formation des complexes argilo-humiques.

Facteurs défavorables:

- Tassement et compaction par passage des engins lourds
- Actions mécaniques des pluies battantes
- Altération des ciments colloïdaux.

#### 4.2. Caractérisation morphologique de la structure:

Trois critères sont pris en considération:

- le type de structure, relatif à la forme générale des agrégats structures;
- la taille (ou classe), relative aux dimensions des agrégats;
- la netteté (ou degré de développement), relative aux proportions d'agrégats structures dans la masse du sol.

#### 4.3. Effet de la structure:

- *porosité du sol* : représente le volume non occupé par les constituants solides du sol. On distingue les pores capillaires des pores non capillaires. Elle est d'importance primordiale pour la circulation de l'eau et de l'air, influençant les possibilités d'activités biologiques (racines, microflore, faune).

L'expérience semble montrer que l'optimum correspond à des proportions égales des deux types de pores.

- *résistance de l'érosion*: la structure facilite l'infiltration des eaux de pluie et réduit le ruissellement en surface.
- *contacts sol-racines*.
- *échanges thermiques entre le sol et l'atmosphère*.
- *quelques moyens de conservation de la structure* :
  - maintien sous couverture végétale
  - maintien des réserves humiques et calciques
  - éviter le travail du sol ou le passage d'engins lourds en conditions hydriques inadéquates.

#### 5. Quelques éléments d'un bilan hydrique :

L'alimentation en eau des végétaux dépend de plusieurs facteurs:

- 1) la quantité d'eau météorique infiltrée dans le sol.



Celle-ci varie en fonction notamment:

- du climat ( quantité, nature et répartition des précipitations )
- des pertes par évaporation directe d'eau n'atteignant pas le sol ( 10-40% en forêt )
- du ruissèlement en surface, dépendant, lui-même, de la pente, de la porosité, de la texture, ...

2) la quantité d'eau emmagasinée sur l'épaisseur correspondant au développement du système racinaire. Cette quantité d'eau dépend :

- de la texture
- du taux de matière organique
- de la perméabilité (galeries diverses)
- de l'évaporation...

3) l'importance de la fraction effectivement utilisable par les végétaux.

Cette fraction correspond à l'eau contenue dans les pores de "diamètre" supérieur à  $2\mu$ . L'eau remplissant les pores les plus larges (eau de gravitation) est très facilement absorbable par les végétaux mais, normalement, elle ne séjourne que peu de temps dans le sol.

L'eau contenue dans les pores fins (eau capillaire) est de moins en moins facilement absorbable, au fur et à mesure de l'augmentation de la finesse des pores; la plante doit fournir un effort de plus en plus grand pour se procurer l'eau dont elle a besoin. Cet effort peut s'apprécier par la mesure du potentiel capillaire.

## 6. Potentiel capillaire:

Le potentiel capillaire se mesure par l'énergie nécessaire pour déplacer les diverses formes d'eau du sol (eau de gravitation, eau capillaire).

Cette énergie correspond à la hauteur d'une colonne d'eau, exprimée en cm.

Le potentiel capillaire, ou pf, exprime le logarithme de cette hauteur.

## 7. Éléments nutritifs.

### a. Sources d'éléments nutritifs dans le sol:

Les principales sources d'éléments nutritifs dans le sol sont:

- les éléments en solution
- les réserves minéralogiques, libérées au fur et à mesure de l'altération des roches et des minéraux
- les éléments retenus par le complexe sortant
- les éléments immobilisés sous forme organique.

### b. Le complexe sortant - phénomènes de sorption et d'échange:

Les colloïdes du sol (argile, humus) possèdent la propriété de retenir, plus ou moins énergiquement, diverses substances. Ils forment le complexe sortant.

En ce qui concerne les argiles, la sorption peut se faire en surface des cristallites (adsorption) ou dans les espaces inter lamellaires (absorption), du moins pour les argiles de type 2/1.

Les ions adsorbés peuvent être déplacés par les ions des exsudats radiculaires (ou les ions d'une solution mise en contact avec le sol). Ils sont dits échangeables. Les ions absorbés sont plus ou moins énergiquement liés aux colloïdes. Ils sont peu échangeables ou fixes (non échangeables), comme, par exemple, K dans les espaces inter lamellaires des argiles du type illite.

*c. Immobilisation sous forme organique:*

Azote, phosphore, soufre font, dans des proportions diverses, partie intégrante de la matière organique, sous forme de protéides, acides aminés, etc. Le plus souvent, ces réserves ne sont utilisables par les plantes qu'après décomposition et minéralisation de la matière organique. Il y a donc intérêt à ce que celles-ci soient suffisamment rapides.

*d. Équilibre ionique - rétrogradation:*

Dans le sol, les éléments nutritifs existent sous différentes formes: soluble, facilement échangeable, difficilement échangeable et non échangeable, ou fixée, non utilisable.

Les plantes se nourrissent, principalement, aux dépens des formes soluble et facilement échangeable.

Au fur et à mesure des prélèvements, un nouvel équilibre tend à s'établir, plus ou moins rapidement, entre les diverses formes, des ions difficilement échangeables passant dans la phase échangeable ou, même, dans la phase soluble.

Inversement, en cas d'apport d'engrais, par exemple, un déplacement d'équilibre se produit dans le sens soluble => facilement échangeable => difficilement échangeable => fixe. C'est la rétrogradation (potassium, phosphore).

*e. Acidité du sol.*

Ecologiquement, l'acidité revêt une grande importance car, au fur et à mesure des prélèvements d'éléments nutritifs par les plantes, le sol tend à s'acidifier.

*i. Sources d'ions hydrogène dans le sol:*

La source peut être de deux types :

1) organiques: dissociation des acides organiques ( $\text{COOH} \Rightarrow \text{COO} + \text{H}$ ), des phénols (OH), des alcools, etc.

2) minérales:  
- dissociation de radicaux OH, surtout aux faces de rupture des cristallites argileux,  
- dissociation de molécules d'eau ( $\text{H} - \text{OH}$ )

On distinguera, ainsi, deux formes d'acidité: une acidité organique et une acidité minérale, celle-ci devenant, proportionnellement, de plus en plus importante dans les horizons minéraux du profil.

*ii. Expressions de l'acidité:*

- acidité actuelle quantité d'ions H présents dans la solution du sol.

- acidité d'échange somme des ions H présents dans la solution et dans la phase échangeable du sol.
- acidité totale quantité totale d'ions H dissociables et titrables par une base forte.
- acidité potentielle qualité d'ions H dissociables au delà du ph naturel du sol, au fur et à mesure de la neutralisation.

L'expression la plus couramment utilisée est le pH (eau) qui peut donner une idée très générale des conditions dans lesquelles le sol "fonctionne" et des conséquences qui peuvent en découler. Idéalement, le pH se mesure au moyen d'un potentiomètre mais l'utilisation des méthodes colorimétriques de terrain peut donner des résultats suffisants, pour autant que l'on se contente de les interpréter en fonction de classes, assez larges, de valeurs (0.5 à 1).

### *iii. Facteurs de variation de l'acidité:*

Les facteurs de variation sont multiples :

- les conditions climatiques générales et locales (ces dernières en relation avec l'orientation et le degré de la pente), influençant les conditions d'humidification;
- la nature de la roche-mère (roche calcaires, roches chimiquement pauvres de l'Ardenne);
- les prélèvements d'éléments nutritifs par les plantes, éléments remplacés sur le complexe sortant par des ions H ;
- les processus d'humidification, provoquant l'apparition de composés acides, plus ou moins neutralisés, ensuite, par les bases échangeables;
- les pratiques culturales, notamment les apports d'engrais, ceux-ci pouvant être à action acidifiante ou alcalinisant.

### *iv. Effets de l'acidité:*

- modification des équilibres entre cations et anions;
- influence sur l'assimilabilité des éléments nutritifs et sur les phénomènes de carence;
- apparition d'éléments toxiques pour les plantes;
- influence sur la nature et les activités des organismes vivants;
- en corollaire du point précédent, influence sur les conditions d'humidification et, par la, sur les propriétés physiques des sols [18] ;

## *8. Composés du sol :*

### *8.3 La fraction minérale du sol*

La destruction des roches se fait :

- par désagrégation mécanique qui donne des fragments
- par altération chimique qui produit des ions solubles (cations, acide silicique...), des gels colloïdaux par hydratation et polymérisation des cations comme le fer et l'aluminium avec la matière organique (complexolyse) et des argiles, constituants fondamentaux du sol.

L'ensemble constitue le complexe d'altération, qui comprend la fraction argileuse héritée, transformée ou néoformée et d'autres constituants, cryptocristallins ou amorphes, comme les oxyhydroxydes de Fe, Al, Mn, Si, associés aux argiles et complexés avec l'humus.

#### 8.4 La fraction organique

La matière organique peut être définie comme une matière carbonée provenant d'êtres vivants végétaux et animaux. Elle est composée d'éléments principaux (C, H, O, N) et d'éléments secondaires (S, P, K, Ca, Mg).

La fraction organique se répartit en 4 groupes: la matière organique vivante (animale et végétale), les débris d'origine végétale (résidus végétaux, exsudats) et animale (déjections, cadavres), des composés organiques intermédiaires et des composés organiques stabilisés.

La végétation fournit des débris végétaux qui constituent la litière de l'horizon A0 ou 0. Sa décomposition se fait sous l'action des microorganismes et produit l'humus et les composés minéraux de l'horizon A.

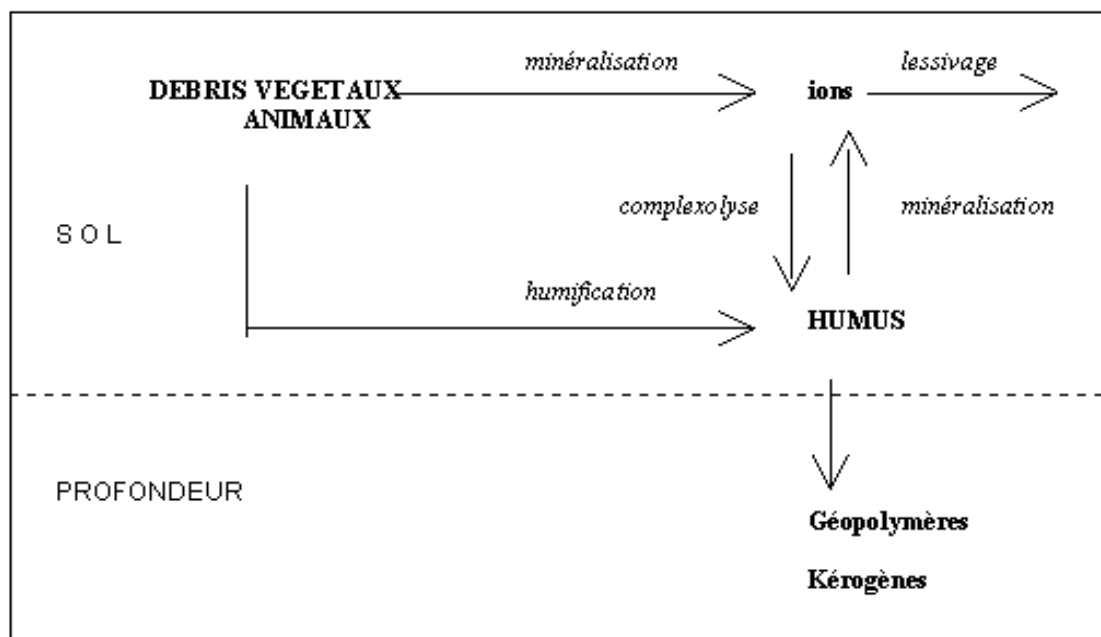


Fig. III.1 : devenir de la matière organique dans le sol

L'humus peut être défini comme étant le composé final de la dégradation de la matière organique. C'est un composé organique stable, à noyaux aromatiques, riches en radicaux libres.

L'humus est généralement associé aux minéraux argileux et forme le complexe argilo-humique qui joue un rôle essentiel dans la structure du sol, ses propriétés mécaniques, physiques, hydriques et chimiques.

L'humus joue un rôle important sur la valeur agronomique des sols cultivés et la physiologie des végétaux (rétention de l'eau, fixation d'oligo-éléments, action stimulante sur la formation et la croissance des racines...). Mais chaque année, le sol perd de son humus par minéralisation. L'importance de cette perte dépend du type de sol (teneur en argile et calcaire notamment) et du climat (humide ou sec, chaud ou froid).

La structure est conditionnée par les colloïdes : argiles, substances humiques hydroxydes. Les argiles favorisent la fragmentation du sol en produisant des fentes de retrait à la dessiccation. Elles peuvent enrober les autres particules et colmater les pores. Elles peuvent fixer des composés organiques par adsorption sur leurs feuillets par l'intermédiaire des oxyhydroxydes d'Al et de Fer qui forment un revêtement pelliculaire.

Ces complexes organo-minéraux (ou argilo-humiques) sont agglomérés en agrégats incorporant des filaments mycéliens et des bactéries à polysaccharides.

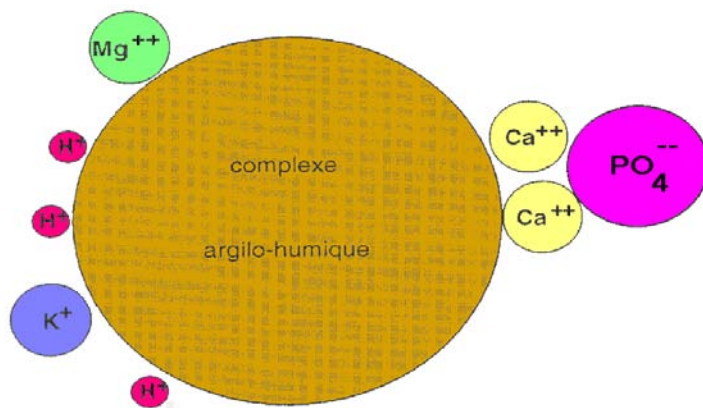


Fig. III.2 : Fixation des ions sur le complexe argilo-humique.

On distingue 3 grands types de structures :

- particulaire : sol très meuble
- massives : éléments liés par un ciment
- fragmentaire : en agrégat (mn), grumeaux (cm) ou polyédrique, très favorable aux cultures.

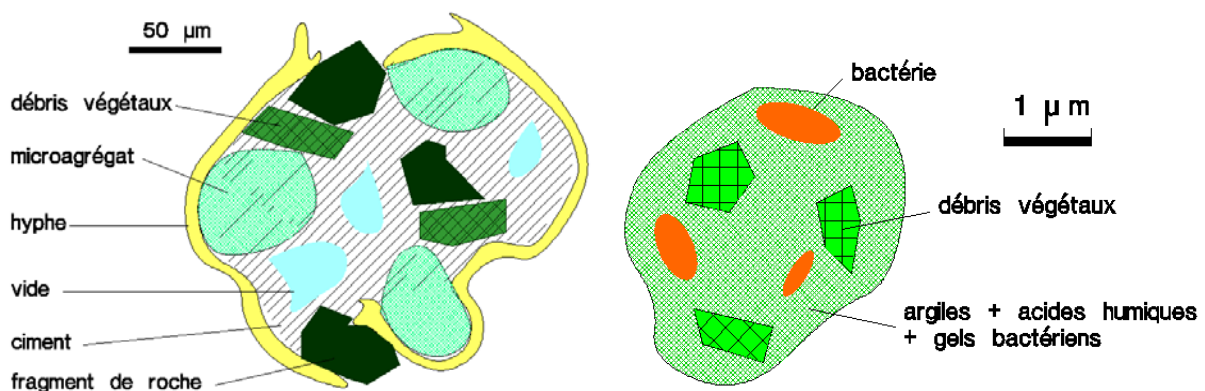


Fig. III.3 : structure schématique d'un macro-agrégat [19].

## 9. Les microorganismes dans les sols :

L'eau, même dans les sols apparemment secs, y est toujours présente en quantité importante, au moins pour les microorganismes. En effet, une partie de l'eau, généralement non disponible pour les plantes, est adsorbée en un film fortement adhérent à la surface des particules du sol.

Ces films sont assez épais pour les bactéries et beaucoup de mycètes ou de protozoaires. Inclus dans des micropores du sol, ces films ménagent, en outre, des zones d'anaérobiose favorables aux bactéries anaérobies strictes, même dans les couches les plus superficielles du sol où l'oxygène est présent, toutefois en proportion plus faible que dans l'atmosphère.

Par leurs actions saprophytiques, minéralisantes ou humifiantes, les microorganismes jouent un rôle fondamental sur la formation des sols (pédogenèse). Le climat, les précipitations, la nature de la roche mère, le pH et de très nombreux autres facteurs, déterminent la composition qualitative des sols en microorganismes. Les sols acides abritent moins de bactéries et davantage de mycètes, par exemple, que les sols neutres.

Beaucoup de microorganismes entretiennent avec les plantes des relations particulières. Certains s'établissent au voisinage immédiat des racines des plantes. Ils forment alors une communauté complexe appelée la rhizosphère.

D'autres espèces établissent des relations symbiotiques intra-racinaires avec certaines espèces végétales. C'est le cas des *Rhizobium* symbiotiques des légumineuses, des relations des actinomycètes du genre *Frankia* avec l'aulne ou des mycorhizes formés par des basidiomycètes, des ascomycètes ou des zygomycètes avec le chêne, le hêtre, le bouleau, les pins et autres conifères.

### 9.1 Bactéries

Beaucoup de bactéries sont hétérotrophes: elles décomposent la matière organique qui leur fournit l'énergie nécessaire au métabolisme. D'autres sont autotrophes: elles oxydent ou réduisent certains composés minéraux selon le pH et l'Eh du milieu. Les principales réactions sont les suivantes:

- nitrification: oxydation de  $\text{NH}_4$  en  $\text{NO}_2$
- dénitrification: réduction des nitrates en Azote gazeux ( $\text{NO}_3^- \rightarrow \text{N}_2$ )
- fixation d'Azote atmosphérique
- réduction sulfates-sulfures
- oxydation sulfures-sulfates
- réduction fer ferrique-ferreux
- oxydation fer ferreux-ferrique

### 9.2 Champignons

Ils sont toujours hétérotrophes et aérobies et appartiennent à de nombreux groupes (Ascomycètes, Basidiomycètes). Ils agissent surtout dans les premières phases de la décomposition des litières. Certains sont associés aux racines des plantes supérieures en formant des mycorhizes.

### 9.3 Faune :

- Microfaune : Protozoaires (Ciliés), Nématodes; se nourrissent de bactéries et d'Actinomycètes.
- Arthropodes inférieurs (Acaréens, Tardigrades, Collembolés); taille < 1cm; produisent les pelottes fécales.
- Lombrics: forment les agrégats argilo-humiques pendant le transit digestif et remontent les argiles et les ions de la profondeur.
- Larves d'Insectes
- Termites dans les régions tropicales (rôle voisin de celui des lombrics) [20].

### 10. Pollution des sols :

La pollution du sol correspond à l'accumulation de composés toxiques : produits chimiques, sels, matières radioactives ou agents pathogènes qui, tous, ont des effets nocifs sur la croissance des plantes et la santé des animaux. Les sols sont souvent utilisés comme décharge pour les déchets ménagers et industriels. L'utilisation accrue d'engrais et de nombreux produits insecticides et fongicides après la fin de la Seconde Guerre mondiale est, depuis les années 1960, source d'inquiétude sur l'état des sols.

Certes, l'application d'engrais contenant les principaux éléments nutritifs, à savoir azote, phosphore et potassium, n'a pas, globalement, contribué à la pollution des sols ; cependant, les apports excessifs d'engrais azotés et de phosphore contribuent à la pollution des eaux ; de même, l'utilisation excessive d'oligoéléments peut nuire à l'état des sols [21].

Certains sols ont la capacité de filtrer, d'absorber et de recycler des quantités importantes de déchets; dans d'autres sols, certains constituants toxiques ne sont pas retenus et se retrouvent dans les fleuves et dans les nappes phréatiques. Les sols sableux sont favorables au lessivage, alors que les sols argileux épais retiennent mieux les déchets. Partout dans le monde, la pollution des sols et des eaux constitue un thème majeur de recherches et d'actions. Dans la plupart des sols, corriger les pollutions graves oblige à des traitements coûteux [20].

# Chapitre IV :

# La biodégradation



## 1. Introduction

Généralement, les termes liés à la notion de biodégradation sont définis à l'échelle moléculaire et non à l'échelle du matériau et concernent dans la plupart des cas des substrats organiques.

Le terme biodégradation généralement retenu dans la littérature scientifique correspond à une action de dégradation d'un composé organique par des agents biologiques (généralement microbiens) avec comme seuls rejets, des produits simples tels que  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $Cl^-$ ..., mais encore des produits organiques simples (métabolites) tels que des acides organiques etc.

Si la biodégradation du substrat organique est totale, c'est à dire formation uniquement de produits inorganiques tels  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2$ , on parle de minéralisation [22], [23].

Le terme biotransformation implique la notion de transformation incomplète d'un substrat organique métabolisé qui n'aboutit donc pas forcément à son assimilation totale [22]. Il peut s'agir par exemple d'une oxydation partielle du substrat qui se traduit par un rejet de produits intermédiaires (métabolites) dans le milieu.

Le terme biodégradabilité regroupe les qualités nécessaires à une substance pour subir un processus d'altération microbienne.

L'altération microbienne ou bioaltération concerne non seulement les substances organiques mais aussi les substances inorganiques et résulte soit d'attaques enzymatiques (action directe des microorganismes), soit de modifications chimiques de l'environnement tels que le pH, sous-produit du métabolisme... qui ont pour conséquence l'altération physique et/ou chimique (action directe) [24].

## 2. Micro-organismes, nutrition et écologie microbienne

### 2.1. Nutrition et croissance microbienne

Les micro-organismes se développent et se divisent pour donner naissance à des bactéries filles qui héritent de la cellule-mère du même potentiel d'activité.

La croissance microbienne n'est possible que dans le cas où les micro-organismes peuvent satisfaire leur besoins nutritifs dans leur environnement.

### 2.2. Nutrition des micro-organismes :

Leurs exigences nutritives aussi variées que la nature des habitats où ils vivent : sol, eau... Les substances élémentaires sont les matériaux constitutifs de la cellule. Les substances énergétiques permettent à la cellule de réaliser la synthèse de ses propres constituants. Il existe donc un certain nombre de contraintes nutritionnelles pour permettre un optimum de croissance des microorganismes :

- Les aliments constitutifs pour leurs constituants cellulaires : eau, C, H, N, O, S, P, etc....,
- Les sources d'énergies : lumière ou substances chimiques (organiques et/ou inorganiques),

- Les nutriments spécifiques, appelés facteurs de croissance car ce sont des substances indispensables, les micro-organismes étant incapables de les synthétiser eux-mêmes. Ainsi, grâce aux aliments qu'on lui fournit et qu'elle dégrade, la bactérie synthétise ses propres constituants organiques. L'ensemble des échanges chimiques qui se produisent alors au niveau cellulaire constitue le métabolisme. Les multiples réactions assurant la dégradation d'un substrat libèrent simultanément de l'énergie qui servira à la biosynthèse, à la croissance et à la reproduction.

### 2.3. Croissance des micro-organismes

La croissance est définie comme l'accroissement ordonné de tous les composants d'un organisme. Dans le cas de micro-organismes unicellulaires tels que les bactéries et les levures, le phénomène de croissance se caractérise par une augmentation du nombre d'individus, entraînant progressivement une modification des caractéristiques du milieu de culture (appauvrissement en nutriments, enrichissement en métabolites, variation du pH, du potentiel d'oxydoréduction ou de la conductivité...).

Sans renouvellement du milieu, on assiste à un appauvrissement du substrat consommable et à un enrichissement en métabolites (produits intermédiaires ou finals du métabolisme).

Dans un milieu liquide homogène, agité et non renouvelé, la courbe de croissance microbienne présente cinq phases successives (fig. IV.1) :

- La phase 1 correspond à une phase de latence durant laquelle les micro-organismes s'adaptent au milieu de culture en synthétisant les enzymes dont ils auront besoin pour coloniser ce substrat. La durée de cette phase dépend de la nature du substrat et de la "qualité" de l'ensemencement.
- Durant la phase 2, le nombre d'organismes et la vitesse spécifique de croissance (ou taux de croissance) augmentent.
- phase 3 : Au-delà d'une certaine concentration en substrat (Loi de Monod, 1942), le taux de croissance  $\mu$  demeure constant tandis que le nombre d'individus continue d'augmenter.
- Au cours de la phase 4, on assiste à un épuisement du substrat et à une accumulation de métabolites pouvant être toxiques.
- La phase 5 est une phase stationnaire durant laquelle le nombre d'organismes nouveaux équilibre parfaitement le nombre de "morts".

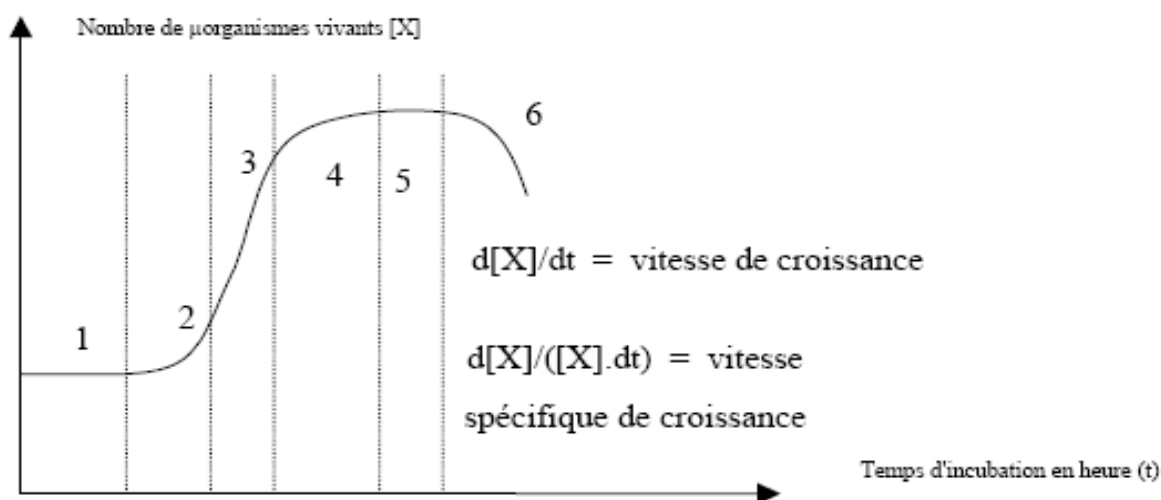


Fig. IV.1 : Courbe de croissance d'une culture bactérienne

## 2.4. Facteurs environnementaux :

Les conditions physico-chimiques de croissance des micro-organismes dépendent de l'environnement (température, pression...).

- Le pH est un facteur physico-chimique important pour la croissance des microorganismes :  
Le pH optimal est compris entre 3 et 6 pour les champignons. Il est neutre pour la plupart des bactéries. Cependant certaines bactéries sont acidophiles (comme la *Thiobacillus thiooxidans* avec un optimum de croissance pour pH = 2) ou basophiles (certaines *Vibrio*)
- On divise les bactéries selon leur besoin en oxygène : aérobie, anaérobie (stricte ou facultative)

Le caractère biodégradable d'un matériau solide organique ou d'une molécule organique dépend d'un certain nombre de facteurs externes et de paramètres, caractéristiques intrinsèques au matériau.

Ainsi, en 1992, un rapport de l'association Record [25] proposait une série de quatre grandes causes pour expliquer le caractère récalcitrant de certaines molécules à la biodégradation. Globalement les deux premières causes rejoignent ce qu'on a désigné précédemment par "paramètre intrinsèque", les deux dernières par le terme "facteur externe".

### ◆ Causes chimiques :

- Poids moléculaire, structure, charge : les composés à faible masse moléculaire et/ou à structure chimique linéaire sont plus facilement biodégradables. De même l'adhésion des micro-organismes peut être favorisée par l'existence de forces de type Van der Waals et les interactions électrostatiques.
- Nature, nombre et position des substituants : par exemple : le OH, COOH, NH<sub>2</sub> et OCH<sub>3</sub> favorisent la dégradation contrairement au F, Cl, NO<sub>2</sub>, CF<sub>3</sub> et SO<sub>3</sub>H qui la gênent.

### ◆ Causes physico-chimiques :

- Solubilité,
- Aptitude à former ou non des émulsions,
- Etat physique inadapte (solide, liquide, gazeux),
- Aptitude à s'adsorber sur des surfaces,
- Aptitude à former des liaisons ioniques ou covalentes avec les supports.

D'une manière générale, toutes les caractéristiques physico-chimiques qui tendent à augmenter la disponibilité et la surface de contact entre le substrat et les micro-organismes facilitent la biodégradation dudit substrat. Par exemple, un corps soluble sera plus facilement mis à disposition de micro-organismes présents dans l'environnement aqueux.

◆ Causes environnementales :

- Concentration trop faible, trop grande ou trop variable. Par exemple : si le substrat à dégrader n'est présent qu'en très petite quantité, sa disponibilité auprès des micro-organismes sera limitée.
- pH : le pH optimal pour les champignons est compris entre 3 et 6. En revanche la plupart des bactéries se développent à un pH proche de la neutralité. Ainsi, par exemple, l'activité acétogène est optimale pour des valeurs de pH 7 à 7,4. Seules les bactéries acidogènes supportent des pH inférieurs à 6 et s'adaptent facilement à des pH de l'ordre de 4 [26].
- Température : on peut distinguer quatre classes d'organisme selon leur tolérance à une certaine plage de température (tableau 5). Selon Hartz et al. (1982), la température mésophile optimale pour la dégradation des ordures ménagères est comprise entre 35 et 41°C. La méthanogenèse et plus généralement la croissance anaérobie est relativement lente à une température inférieure à 20°C [27].

Tab. IV.2 : Classification physiologique des bactéries en fonction de la température.

Type physiologique	Température de croissance (°C)	
	Minimale	Maximale
Psychrophile	0	20
Mésophile	>20	<40
Thermophile modéré facultatif	>41	>55
Thermophile modéré obligatoire	>55	75
Thermophile extrême (hyper thermophiles)	>60	>80* (* optimum >80)

- $A_w$  (disponibilité de l'eau ou quantité d'eau qui est disponible pour les réactions) : c'est un facteur important de la croissance bactérienne. Par définition, l'eau distillée pure a une activité en eau ( $A_w$ ) de 1,0. Ce facteur est équivalent à la notion d'humidité relative dans l'atmosphère. Un développement microbien n'est possible que dans des milieux ayant des activités en eau comprises entre 0,6 et 0,99 environ [28].
- Potentiel rédox : selon le potentiel oxydant ou réducteur du milieu étudié, certaines réactions pourront se réaliser ou, au contraire, seront impossibles. Par exemple : une croissance extensive de bactéries hétérotrophes utilisant l'oxygène disponible fait baisser le potentiel rédox du milieu de manière significative [23].
- Nutriments : certains composés comme le calcium, le magnésium, le sodium ou le potassium stimulent la méthanogenèse [29]. D'autres, comme le fer, le cobalt, le molybdène, le sélénium ou le tungstène stimulent la méthanogenèse. En 1990, Graindorge montrait que le nickel était indispensable à la croissance des bactéries méthanogènes [30].

- Présence d'inhibiteurs : certaines molécules étrangères aux réactions étudiées mais présentes dans le milieu peuvent limiter la capacité métabolique de la microfaune. Il convient alors de distinguer les substances interdisant totalement ces réactions de celles qui ne font que les ralentir. Un même composé peut être toxique ou non (voire même bénéfique et indispensable à l'état de trace) en fonction de sa concentration et de sa disponibilité dans le milieu.

♦ *Causes biologiques :*

- Absence de la microflore appropriée,
- Absence d'enzymes exocellulaires ou d'agents émulsifiants,
- Incapacité des micro-organismes à métaboliser le produit par impossibilité d'induire les enzymes, les systèmes transporteurs nécessaires ou par production d'intermédiaires métaboliques terminaux toxiques.

Enfin le facteur temps est largement à prendre en compte dans ces phénomènes de biodégradation. Beaucoup de molécules peuvent subir une dégradation par des micro-organismes, mais parfois à très long terme.

La notion de biodégradabilité sera donc à nuancer en la confrontant à la durée d'incubation nécessaire à la dégradation de la molécule ou du déchet envisagé. Notons toutefois ici que le caractère "acceptable" d'un délai de dégradation est largement déterminé par les contraintes économiques ou environnementales du scénario considéré.

### 2.5. Métabolismes énergétiques :

Les microorganismes se développent et se multiplient grâce à leur métabolisme énergétique basé sur des réactions d'oxydoréduction. On appelle métabolisme énergétique l'ensemble des réactions et échanges chimiques qui se produisent au niveau cellulaire pour permettre à la cellule de retirer et transformer l'énergie nécessaire à sa vie. On parle de catabolisme pour les réactions de dégradation qui fournissent à la cellule énergie et matière, et d'anabolisme pour les réactions de biosynthèse [31].

Les réactions d'oxydoréduction, c'est à dire de transfert d'électrons et de protons, entre un substrat donneur (oxydé) et un ou des accepteurs (réduits) libèrent en effet de l'énergie en quantité proportionnelle à la différence de potentiel des couples redox mis en jeu.

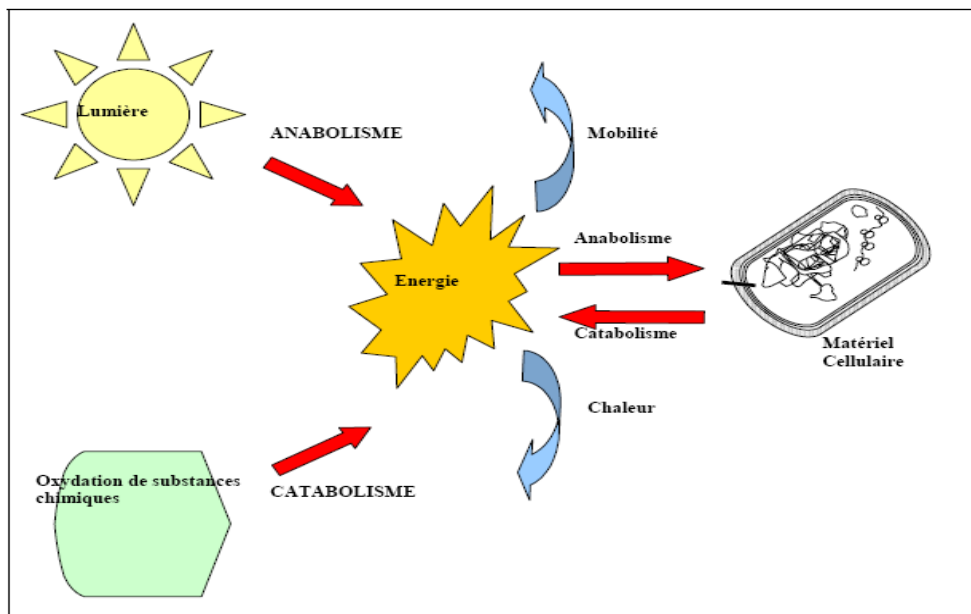


Fig. IV.2 : Métabolisme énergétique.

Les besoins énergétiques peuvent être satisfaits soit par la photosynthèse où la lumière est la source d'énergie (cas des algues et des bactéries photosynthétiques), soit par l'oxydation des substances chimiques (voir Fig. IV.2).

Les différents types de métabolisme permettent de classer les micro-organismes en trois catégories trophiques :

- *Autotrophe / hétérotrophe* : contrairement à un autotrophe, un micro-organisme hétérotrophe ne peut pas utiliser le CO<sub>2</sub> comme source de carbone. Il doit donc oxyder des composés organiques afin de récupérer le carbone qui les compose.
- *Phototrophe / chimiotrophe* : les organismes phototrophes utilisent la lumière comme source d'énergie, tandis que les chimiotrophes la tirent de l'oxydation des composés chimiques.
- *Organotrophe / lithotrophe* : les organotrophes utilisent, comme substrat énergétique, des composés organiques. Les micro-organismes lithotrophes utilisent des composés minéraux (inorganiques).

Les micro-organismes impliqués dans la biodégradation sont dépourvus d'outils métaboliques leur permettant d'utiliser la lumière comme source d'énergie (photosynthèse possible seulement avec des pigments photosynthétiques). Ils utilisent donc a fortiori l'énergie libérée à partir des réactions d'oxydation de substrats organiques et inorganiques appelés alors donneurs d'électrons.

Les réactions se produisent dans le sens qui permet une libération d'énergie ( $\Delta G < 0$ ), c'est à dire si le transfert d'électrons s'effectue en remontant les potentiels, des valeurs négatives vers les valeurs positives.

Elles nécessitent cependant l'intervention des enzymes, catalyseur chimiques de nature hétéroprotéique, synthétisés par les microorganismes

### 3. Biodégradation de la matière organique :

#### 3.1. Aspects généraux :

Les processus métaboliques de l'ensemble des êtres vivants reposent sur la biodégradation de la matière organique. Par exemple, la respiration (dégradation oxydative) produit de l'énergie à partir de matière organique selon l'équation suivante :



La circulation de la matière organique le long de chaînes trophiques (ou chaîne alimentaire) est liée à ces phénomènes alimentaires et énergétiques. Le dernier maillon de ces chaînes est constitué par les *décomposeurs* qui dégradent la matière organique (déjection, tissus morts...) non-consommée par les autres organismes, empêchant ainsi son accumulation : c'est ce mécanisme de dégradation biologique par l'action de micro-organismes que l'on nomme *biodégradation*.

Les voies cataboliques suivies au cours de la dégradation de la matière organique dépendent principalement de la concentration en oxygène, c'est-à-dire des conditions d'aérobiose, d'anaérobiose ou d'anoxie du milieu :

##### - *Catabolisme aérobie :*

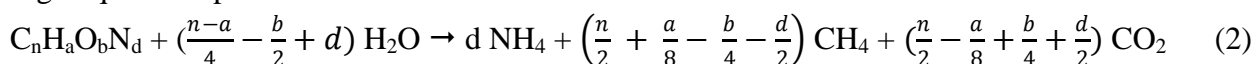
Les réactions de dégradation oxydatives consomment l'oxygène du milieu. Ces réactions étant fortement exothermiques. Elles peuvent s'accompagner d'une élévation de la température.

Le métabolisme aérobie peut se poursuivre jusqu'à minéralisation complète des substrats biodégradables et conduit alors à des métabolites finaux correspondant aux formes oxydées des différents éléments constitutifs de la matière organique (C, H, N, P, S) : dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ), carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ), nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), phosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) [32].

##### - *Catabolisme anaérobie :*

L'évolution anaérobie de la matière organique est relativement complexe et dépend beaucoup de sa nature, de l'humidité, de la température ambiante et du pH du milieu. Les produits terminaux sont essentiellement le méthane ( $\text{CH}_4$ ), le dioxyde de carbone, l'eau et l'ammoniac.

En 1983, Ehrig [33] proposait une formule générale pour la dégradation anaérobie des molécules organiques complexes :



La dégradation anaérobie de la matière organique comporte quatre phases distinctes :

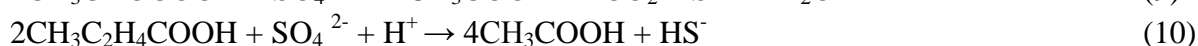
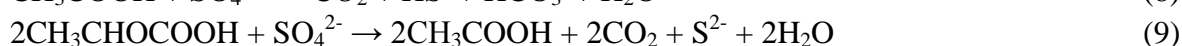
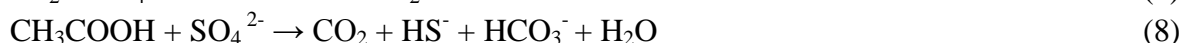
- Phase d'hydrolyse : hydrolyse des biopolymères en oligomères et monomères
- Phase d'acidogénèse : dégradation des acides gras, acides aminés et sucres pour donner des acides gras volatils (AGV)
- Phase d'acétogénèse : les AGV et alcools formés précédemment sont transformés en acétate, dioxyde de carbone et dihydrogène par un groupe hétérogène de trois populations bactériennes : les bactéries fermentatives (genres *Selenomonas*, *Clostridium*, *Ruminococcus*), les bactéries productrices obligées d'hydrogène (OHPA en anglais) (genres *Syntrophomonas*, *Syntrophobacter*).

- Phase de méthanogenèse : phase strictement anaérobie durant laquelle l'acide acétique et les autres composés simples produits sont transformés en dioxyde de carbone et en méthane.

Deux voies simultanées de production de méthane sont possibles, l'une directement à partir d'acétate ou de méthanol (acétoclastie), l'autre par réduction de l'ion bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) par l'hydrogène produit lors des étapes précédentes. Selon le substrat, on observe alors les réactions suivantes [34]:



Dans un milieu riche en sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), la méthanogenèse peut être concurrencée par un phénomène de sulfatoréduction, processus biochimique de respiration anaérobie correspondant à un transfert d'électrons et de protons à partir d'un corps réducteur, substrat organique ou hydrogène moléculaire, vers un accepteur minéral, l'ion sulfate  $\text{SO}_4^{2-}$  [34].



Les bactéries responsables de cette dégradation sont appelées d'une manière générale sulfatoréductrices (genres *Desulfovibrio*, *Desulfotomaculum* notamment) [34].

### 3.2. Voies cataboliques des molécules organiques

Quel que soit le type respiratoire, les micro-organismes chimio-organotrophes ont pour priorité de cataboliser des substances organiques leur permettant de se procurer l'énergie nécessaire à leur croissance et leur multiplication. Les micro-organismes ont également besoin de carbone pour synthétiser leur structure telles que la paroi, la membrane, le noyau, etc.

Pour cela, les microorganismes disposent de deux sources possibles de carbone :

- *Carbone minéral* tel que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et les carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) (uniquement le cas des bactéries autotrophes),

- *Carbone organique* sous toutes ses formes possibles (cas des bactéries hétérotrophes et des moisissures). Le catabolisme des substances organiques donne naissance à de nombreux produits intermédiaires destinés à fournir les « pièces » élémentaires pour la (bio) synthèse (anabolisme) des molécules et macromolécules constituants des cellules. La biodégradation de la matière organique permet non seulement de fournir le carbone mais aussi l'énergie nécessaire à leur développement.

Ces réactions métaboliques de biodégradation nécessitent l'intervention de catalyseurs biologiques qui sont présents à l'intérieur des cellules. Elles impliquent les enzymes qui sont des structures protéiques (hétéroprotéines) spécifiques catalysant une réaction biochimique donnée. L'oxydation aérobie d'un substrat organique en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et en eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ) fournit à la cellule bien plus d'énergie que sa dégradation anaérobie.



### *a) Hydrolyse des polymères organiques :*

La plupart des substrats organiques naturel étant des macromolécules de type polymères et hétéro-polymères complexes, la biodégradation passe nécessairement par une phase d'hydrolyse partielle des polymères à l'extérieur des cellules.

En effet, la membrane cytoplasmique des micro-organismes étant imperméable aux polymères, les micro-organismes doivent obligatoirement les hydrolyser par intervention d'exoenzymes, enzymes hydrolytiques exocellulaires excrétés par les micro-organismes, en monomères (ou oligomères) qui, eux, pourront diffuser ou être transportés à l'intérieur de la cellule pour être assimilés.

Du point de vue biochimique, la matière organique d'origine naturelle peut être classée en trois grandes familles de substances : les glucides, les lipides et les protéines.

### *b) Assimilation des oligomères et des monomères*

L'hydrolyse des polymères organiques conduit donc à la formation de monomères ou de produits de faible poids moléculaire.

L'assimilation est facilitée par une pénétration active (consommation d'énergie) qui fait intervenir des enzymes membranaires appelées perméases (transporteurs membranaires). Le catabolisme permet de fournir l'énergie sous forme chimique (ATP) et les éléments de base nécessaires pour la biosynthèse (anabolisme) des composés constitutifs de la cellule.

Le métabolisme suit des voies en partie communes pour les différents substrats énergétiques avec pour métabolite commun, l'acétyl-CoA.

# Chapitre V :

# Méthodes d'analyses

## 1. Méthodologie expérimentale :

Protéger l'environnement c'est réduire la quantité énorme de déchets générée par la consommation importante de thermoplastiques dans l'emballage. A cet effet un nouveau matériau a été réalisé et fera l'objet de notre étude.

Le matériau est un mélange à base de deux polymères. Le PE bd (polyéthylène basse densité) et le PLA polymère biodégradable (acide poly lactique).

Le présent travail portera sur l'évolution de la biodégradation des éprouvettes des mélanges (PE bd/PLA) à différentes compositions (100/0,80/20,50/50,20/80,0/100) dans le sol en fonction du temps et du milieu ou nous avons placé nos différents échantillons.

Nous avons choisi :

- l'environnement naturel : les échantillons subissent l'action du climat naturel de la zone de Fort de l'Eau (température, humidité, ensoleillement...)
- environnement contrôlé (laboratoire) : avec un taux d'humidité du sol (30%) et une température allant de (20-25°C), avec une aération quotidienne du sol (un retournement de terre chaque semaine)

### Préparation des échantillons :

Les différentes formulations des plastiques étudiés, ont été réalisées par injection.

Les échantillons ont pour dimensions : (20 x 10 x 5) mm<sup>3</sup> (trois échantillons par prélèvement) avec une masse variante de 0,6 à 1g. Elles sont enfouies dans des récipients contenant 3kg de terre.

On laissera un échantillon de chaque formulation à l'air libre. Ils ne subiront pas de vieillissement et seront considérés comme référence « témoins ».

### Préparation du sol :

Le sol choisi est pris de la zone agricole de Aïn Taya. Il a été laissé à l'air libre pendant une semaine, broyé et passé au tamis de 2 mm [35].

Le vieillissement a débuté fin Avril 2010 pour une durée de cinq mois. Trois prélèvements de chaque formulation, chaque milieu et par mois sont effectués.

## 2. Analyse microbiologique :

L'analyse microbiologique s'est résumée au dénombrement de la flore totale de la terre, avant et après le vieillissement des plastiques.

### 2.1 Matériel utilisé (pour un échantillon):

- Verre de montre + spatule
- Bécher 100mL
- 3 pipettes de 1mL + 1 pipette de 10mL
- 4 tubes à essai + portoir
- 12 boîtes de pétri

### 2.2 Préparation des dilutions :

Un échantillon de 1g de sol est mis dans un bécher contenant 10ml d'eau physiologique, après agitation pendant 5mn, on obtient la solution mère. On prend 3 tubes à essai contenant chacun 9 ml d'eau physiologique stérile. On prélève 1 ml de la solution mère qu'on transfère dans un tube contenant 9ml d'eau physiologique pour obtenir la dilution  $10^{-1}$ .

Un millilitre est ensuite prélevé de ce premier tube pour être transféré dans un deuxième tube pour obtenir  $10^{-2}$  et de même pour la dilution  $10^{-3}$ .

### 2.3 Ensemencement sur boîtes de pétri :

On prélève 1 ml de chacune des 3 dilutions que l'on introduit dans 3 boîtes de Pétri. On verse ensuite de la gélose nutritive. Après incubation de 24h à  $37^{\circ}\text{C}$ , les colonies développées sont dénombrées.

## 3 Evolution du pH :

Généralement, les phénomènes de pollution se traduisent par des modifications des caractéristiques physicochimiques et/ou microbiologiques du milieu. C'est pour cela, qu'il faut suivre l'évolution du pH.

Pour déterminer le pH, on prélève un échantillon de 10g du sol qu'on introduit dans un bécher contenant 50mL d'eau distillée bouillante, sous agitation pendant une heure. On laisse décanter la terre pendant 5mn, et on introduit la sonde du pH-mètre à l'interface sol-eau [35].

## 4 Evolution de la perte de masse :

Les échantillons sont pesés avant d'être enfouis dans le sol ( $m_0$ ). Après le prélèvement, on les nettoie avec de l'eau distillée. On les met à l'étuve à  $80^{\circ}\text{C}$  pendant 30mn puis on pèse de nouveau ( $m_1$ ). Le résultat sera présenté sous forme de taux de perte de masse  $\xi$  :

$$\xi = \frac{(m_0 - m_1)}{m_0} \times 100 (\%)$$

## 5 Evolution de l'indice de densité :

On compare l'indice de densité des échantillons témoins avec les indices de densité des échantillons après prélèvement.

Le densimètre comporte :

- deux échelles graduées de 0 à 5g pour l'air et pour l'eau
- une aiguille en nickel accrochée à un crochet lui-même relié à un pointeur sur les deux échelles
- une plateforme réglable au sens de la hauteur

Avant de commencer la mesure, on vérifie le niveau général du densimètre grâce au système de la bulle d'air. On vérifie aussi que le pointeur indique le zéro sur les deux graduations.

### *i. Pesée dans l'air :*

On pique l'échantillon sur l'aiguille en nickel, et on lit le poids sur la graduation « air », on aura  $M_a$ .

### *ii. Pesée dans l'eau :*

On dépose d'abord un bécher de 300mL rempli avec de l'eau distillée sur la plateforme. On pique, ensuite, l'échantillon sur l'aiguille en nickel, et on fait remonter la plateforme de façon à immerger l'échantillon dans l'eau. La pointe reliée à l'aiguille en nickel doit effleurer la surface de l'eau.

On lit le poids sur la graduation « eau », on aura  $M_e$ .

Dans le cas où la masse volumique du plastique est inférieure à  $1\text{g.cm}^{-3}$  (ceci peut se remarquer par le fait que la pointe reliée à l'aiguille en nickel ne touche pas la surface de l'eau peu importe la hauteur de la plateforme portant le bécher), on ajoute un cavalier  $M_c=2\text{g}$  (une masse en plus) sur le crochet.

La masse lue sur la graduation « eau » est notée  $M_g$ .

### *iii. Masse volumique et densité :*

- Si la masse volumique du plastique est supérieure à  $1\text{g.cm}^{-3}$  :

Le volume de l'échantillon est calculé à partir de la formule :

$$V_1 (\text{cm}^3) = (M_a - M_e) (\text{g}) / 1 (\text{g.cm}^{-3}) = (M_a - M_e) (\text{cm}^3)$$

La masse volumique de l'échantillon serait :

$$\rho_1 = \frac{M_a}{V_1} = \frac{M_a}{(M_a - M_e)} (\text{g.cm}^{-3})$$

La densité par rapport à l'eau :

$$d_1 = \frac{\rho_1}{\rho(\text{eau distillée})}$$

- Si la masse volumique du plastique est inférieure à  $1\text{g.cm}^{-3}$  :

$$M_b = M_g - M_c$$

Le volume de l'échantillon sera obtenu par la formule :

$$V_2 (\text{cm}^3) = (M_a - M_b) (\text{g}) / 1 (\text{g.cm}^{-3}) = (M_a - M_b) (\text{cm}^3)$$

$$\rho_2 = \frac{M_a}{V_2} = \frac{M_a}{(M_a - M_b)} = \frac{M_a}{M_a + M_c - M_g} (\text{g.cm}^{-3})$$

La densité est donnée par :

$$d_2 = \frac{\rho_2}{\rho(\text{eau distillée})}$$

## 6 Spectroscopie infrarouge :

### 6.1 Introduction

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR : Fourier Transformed InfraRed spectroscopy) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau.

### 6.2 Principe

Lorsque la longueur d'onde (l'énergie) apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et on enregistrera une diminution de l'intensité réfléchi ou transmise. Le domaine infrarouge entre  $4000\text{cm}^{-1}$  et  $400\text{cm}^{-1}$  ( $2,5 - 25\mu\text{m}$ ) correspond au domaine d'énergie de vibration des molécules.

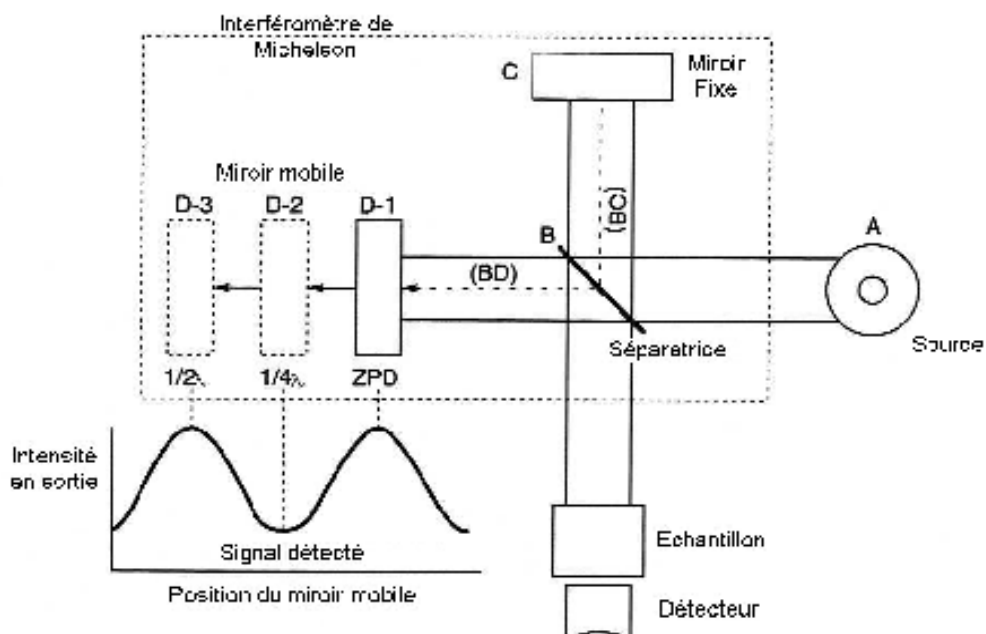


Figure V.1 : Schéma d'un spectromètre à transformée de Fourier

Toutes les vibrations ne donnent pas lieu à une absorption, cela va dépendre aussi de la géométrie de la molécule et en particulier de sa symétrie. Pour une géométrie donnée on peut déterminer les modes de vibration actifs en infrarouge grâce à la Théorie des Groupes.

La position de ces bandes d'absorption va dépendre en particulier de la différence d'électronégativité des atomes et de leur masse.

Par conséquent à un matériau de composition chimique et de structure donnée va correspondre un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant d'identifier le matériau.

L'analyse s'effectue à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier qui envoie sur l'échantillon un rayonnement infrarouge et mesure les longueurs d'onde auxquelles le matériau absorbe et les intensités de l'absorption.

Le faisceau infrarouge provenant de la source A est dirigé vers l'interféromètre de Michelson qui va moduler chaque longueur d'onde du faisceau à une fréquence différente. Dans l'interféromètre le faisceau lumineux arrive sur la Séparatrice. La moitié du faisceau est alors dirigée sur le miroir fixe, le reste passe à travers la séparatrice et est dirigé sur le miroir mobile.

Quand les deux faisceaux se recombinent, des interférences destructives ou constructives apparaissent en fonction de la position du miroir mobile. Le faisceau modulé est alors réfléchi des deux miroirs vers l'échantillon, où des absorptions interviennent. Le faisceau arrive ensuite sur le détecteur pour être transformé en signal électrique.

Le signal du détecteur apparaît comme un interférogramme (Figure V.2), c'est à dire une signature de l'intensité en fonction de la position du miroir. L'interférogramme est la somme de toutes les fréquences du faisceau.

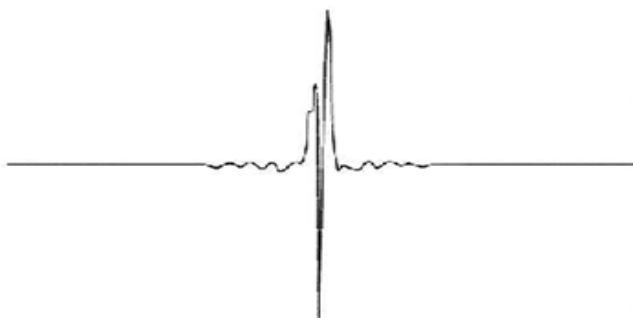


Figure V.2 : Interférogramme en sortie du détecteur

Cet interférogramme est ensuite converti en un spectre infrarouge par une opération mathématique appelée transformée de Fourier.

### 6.3 Interprétation des spectres :

Les informations tirées des spectres sont de deux sortes :

- **Informations qualitatives** : Les longueurs d'onde auxquelles l'échantillon absorbe, sont caractéristiques des groupes chimiques présents dans le matériau analysé. Des tables permettent d'attribuer les absorptions aux différents groupes chimiques présents.

Les spectres de quelques composés organiques sont montrés sur la figure V.3.

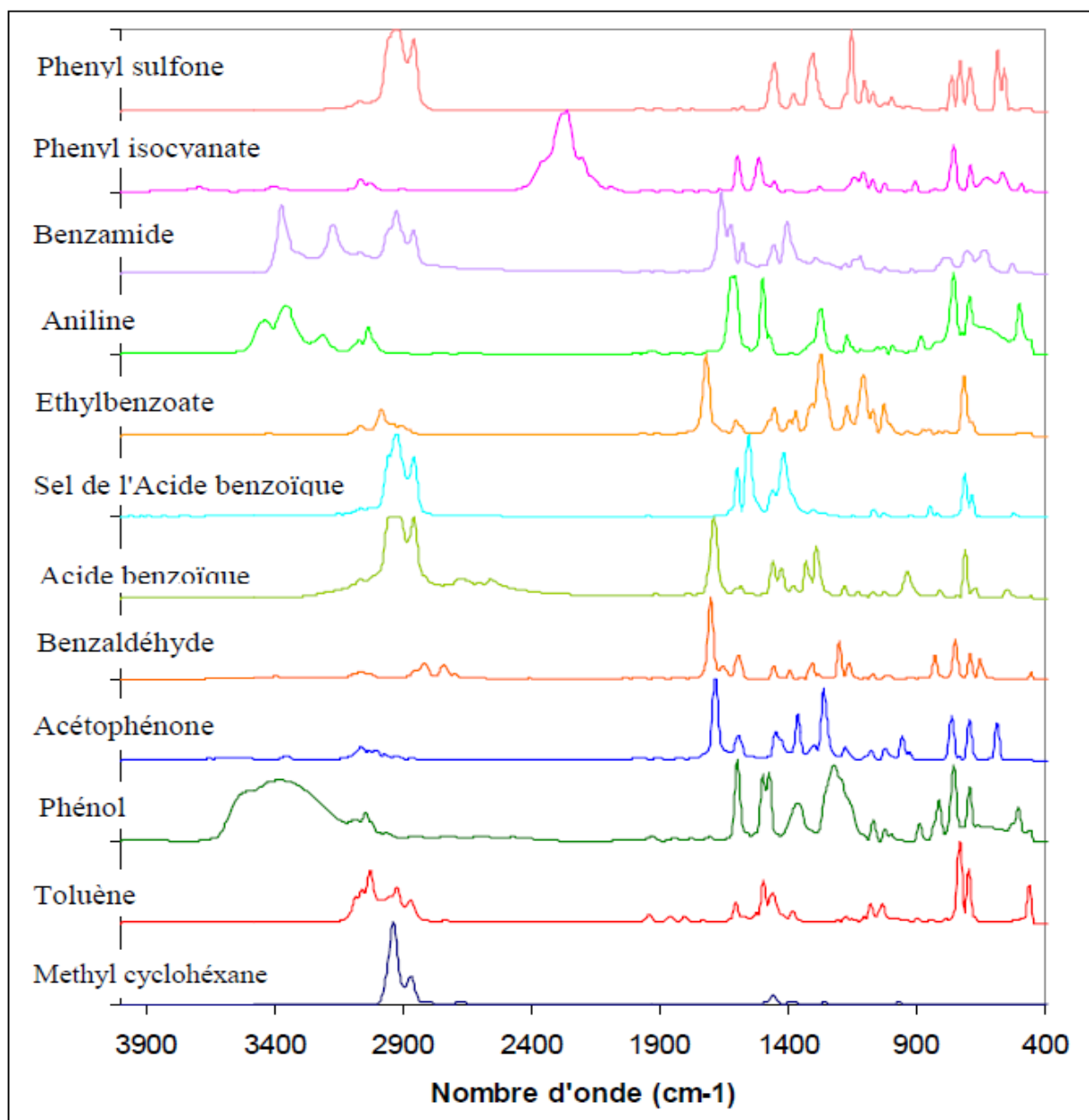


Figure V. 3 : Spectres de différents composés organiques [36].

- **Informations quantitatives** : L'intensité de l'absorption à la longueur d'onde caractéristique est reliée à la concentration du groupe chimique responsable de l'absorption. En mesurant l'aire du signal caractéristique on peut, si on connaît l'épaisseur de la couche, comparer la proportion d'un groupement chimique donné dans plusieurs échantillons ou si on a une composition constante avoir une idée de l'épaisseur des films les uns par rapport aux autres. Pour avoir une mesure absolue il convient d'étalonner auparavant les couches par une autre technique pour pouvoir établir une relation expérimentale entre intensité du signal et proportion ou épaisseur [36].



#### 6.4 Préparation des films :

Pour effectuer l'analyse par spectroscopie infrarouge, nous avons préparé des films de plastiques pour les cinq formulations suivant la méthode :

- i. Pour le PEBD vierge : on fait fondre un échantillon dans un solvant « le p-xylène » à 40°C sous agitation pendant 2h, puis on fait couler le mélange obtenu sur des verres de montre en essayant de réaliser des surfaces plus ou moins homogènes. On dépose, ensuite, les verres de montre dans l'étuve à 40°C, pendant 24h.
- ii. Pour le PLA vierge : on utilise le même procédé que pour le PEBD, le solvant utilisé étant le tetrahydrofurane (THF).
- iii. Pour le PEBD/PLA (20/80), on fait fondre, d'abord, l'échantillon dans du THF pendant près de 2h, puis on ajoute le p-xylène.
- iv. PEBD/PLA (50/50), on fait fondre d'abord l'échantillon dans du p-xylène sous agitation pendant 2h, puis on ajoute le THF. On étale le mélange obtenu sur des verres de montre qu'on laissera quelques minutes à l'air libre puis à l'étuve à 40°C pendant 24h.
- v. PEBD/PLA (80/20), on fait fondre d'abord l'échantillon dans du p-xylène sous agitation pendant 2h, puis on ajoute le THF. On étale le mélange obtenu sur des verres de montre qu'on laissera quelques minutes à l'air libre puis à l'étuve à 40°C pendant 24h.

On obtient une surface plus ou moins lisse qu'on essayera de décoller depuis les côtés pour la déposer entre deux feuilles de papier blanc.

Pour certains mélanges, la préparation des films n'étant pas aisée, nous avons opté pour la méthode formation de pastilles de KBr.

Au lieu d'obtenir des films, on obtient une poudre de pâte séchée qu'on grattera légèrement pour la déposer entre deux feuilles de papier blanc.



# Chapitre VI : Résultats et interprétation

### 3. Résultats :

#### 1.1 Analyses du sol :

Le sol a subi différentes analyses. Ils sont présentés ci-dessous :

##### a. Analyses microbiologiques :

Tableau VI.1. : Dénombrement de la flore totale

Echantillon	Solution mère		Dilution 10 <sup>-1</sup>		Dilution 10 <sup>-2</sup>		Dilution 10 <sup>-3</sup>		UFC/g
Témoin	Ind	ind	230	190	146	150	38	48	43 000
Int 0%	Ind	ind	ind	286	157	162	94	100	97 000
Int 20%	Ind	ind	240	191	149	154	74	78	76 000
Int 50 %	Ind	ind	280	200	160	146	102	86	94 000
Int 80%	Ind	ind	250	196	150	155	78	68	73 000
Int 100%	Ind	ind	239	190	152	160	84	96	90 000
Ex 0%	Ind	ind	ind	293	163	143	82	78	80 000
Ex 20%	Ind	ind	Ind	279	148	156	54	63	58 500
Ex 50 %	Ind	ind	287	203	150	163	72	59	65 500
Ex 80%	Ind	ind	190	130	152	163	86	84	85 000
Ex 100%	Ind	ind	210	148	136	140	76	73	74 500

Le nombre de microorganismes du sol varie entre 13 000 et 97 000 par gramme de sol.

##### b. Analyses physico-chimiques :

###### Matière organique :

- C : 1,440 %
- N : 0,161 %
- C/N = 8,944
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> assimilable : 1090,65 ppm = 1,0907 %
- C/N/P = 144/16/109 = 0,082

D'où un rapport : C/N/P = 144/16/109 = 0,082

- pH = 7,56

###### Granulométrie :

- Argile : 21%
- Limon fin : 15%
- Limon grossier : 07%
- Sable fin : 29%
- Sable grossier : 24 %

### Evolution du pH :

Le pH, d'une manière globale, est resté pratiquement constant, variant de 7,90 à 8,20

Tableau VI.2 : mesures du pH pour le 4<sup>ème</sup> mois

Formulation	Intérieur	Extérieur
0%	8,16	8,02
20%	7,89	7,83
50%	7,96	7,91
80%	8,01	7,89
100%	8,05	7,96

### 1.2 Analyses des échantillons de mélanges plastiques :

#### a. Perte de masse :

L'évolution de la perte de masses des mélanges PEBD/PLA à différentes compositions ont permis de déterminer le taux de variations de masse. Les résultats sont illustrés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.3 : Taux de perte de masse en fonction du pourcentage du PLA, pour les échantillons de l'étude extérieure

Temps (mois)	PLA 0%	PLA 20%	PLA 50%	PLA 80%	PLA 100%
<b>0,5</b>	0	0,26 ± 0,08	0,22±0,02	0,24±0,06	0,42±0,03
<b>1</b>	0	0,17±0,03	0,25±0,03	0,42±0,09	0,37±0,05
<b>2</b>	0	0,17±0,08	0,21±0,12	0,16±0,09	0,36±0,1
<b>3</b>	0	0,16±0,07	0,18±0,11	0,17±0,01	0,33±0,06
<b>4</b>	0	0,17±0,08	0,15±0,09	0,19±0,01	0,3±0,04

On remarque que pour des échantillons variants de 0,6 à 1g, la perte de masse est assez négligeable.

Tableau VI.4 : Taux de perte de masse en fonction du pourcentage du PLA, pour les échantillons de l'étude intérieure :

Temps (mois)	PLA 0%	PLA 20%	PLA 50%	PLA 80%	PLA 100%
<b>0,5</b>	0	0,13± 0,06	0,2±0,01	0,31±0,09	0,25±0,07
<b>1</b>	0	0,15±0,09	0,18±0,08	0,41±0,1	0,24±0,06
<b>2</b>	0	0,16±0,08	0,16±0,07	0,36±0,06	0,28±0,02
<b>3</b>	0	0,15±0,07	0,2±0,06	0,41±0,08	0,29±0,03
<b>4</b>	0	0,15±0,1	0,19±0,1	0,39±0,13	0,28±0,01

Le taux de perte de masse pour des échantillons aussi petits n'est pas très remarquable.

*b. Indice de densité :*

Les indices de densités ont été calculés pour chaque échantillon et sont présentés sous forme de moyennes

Tableau VI.6 : Indices de densité

Formulation	Témoin	Intérieur	Extérieur
0%	0,926	0,847	0,892
20%	0,974	0,915	0,887
50%	1,057	0,988	0,944
80%	1,140	1,125	1,115
100%	1,253	1,175	1,165

Pour des échantillons de cette taille, avec la précision du densimètre (0,1g), la variation des indices de densité n'est pas très précise.

*1.3 Interprétation des spectres infrarouges :*

On a effectué une analyse des échantillons témoins, des échantillons prélevés à quatre mois de vieillissement, de l'environnement intérieur (int) et de l'environnement extérieur (ex).

On fait la comparaison de chaque formulation avec l'échantillon témoin en superposant les graphes des spectres IR :

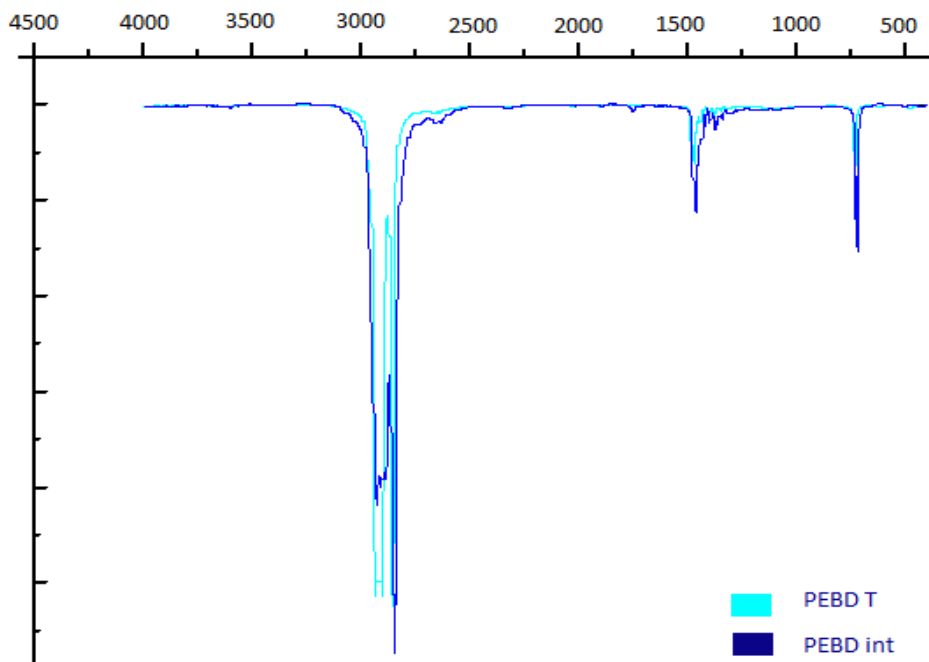


Fig. VI.1 : Spectres du PEbd témoin et PEbd intérieur

Pour le spectre du PEBD étudié au laboratoire, on remarque que :

- Les deux spectres se confondent aux deux pics forts à 2932 et 2848  $\text{cm}^{-1}$  ce qui se traduit par la vibration élongation de la liaison « -C-H » pour  $-\text{CH}_2$  et/ou  $-\text{CH}_3$ .
- Se confondent également au pic moyen à 1464  $\text{cm}^{-1}$  qui indique la déformation dans le plan de la liaison C-H du  $-\text{CH}_2$
- Et aussi au pic à 750  $\text{cm}^{-1}$  preuve de la présence d'une chaîne  $-(\text{CH}_2)_n$  où  $n > 4$ .

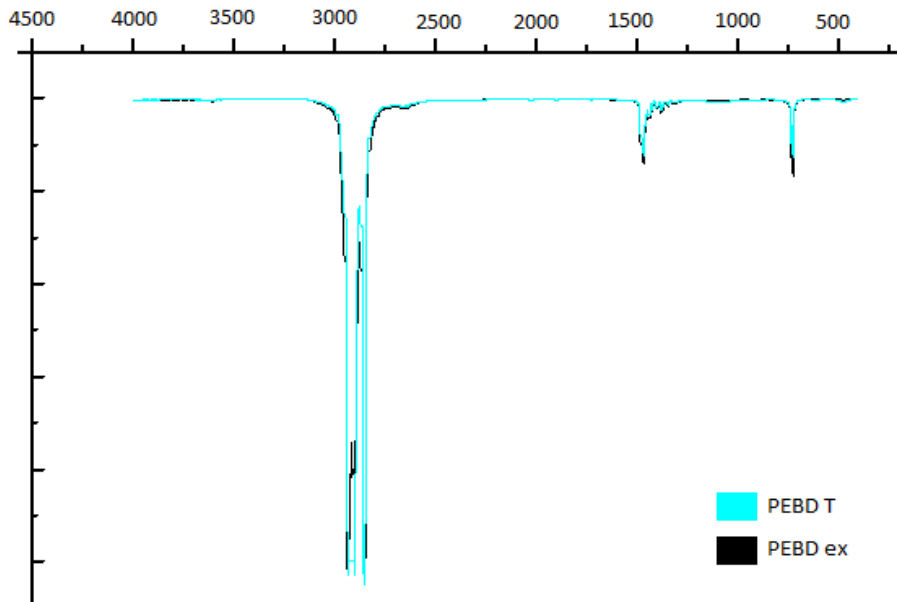


Fig. VI.2 : Spectres du PEBd témoin et PEBd extérieur

Pour le PEBD étudié à l'extérieur, il n'y a pas de changement notable :

- deux pics forts à 2932 et 2848  $\text{cm}^{-1}$  ce qui se traduit par la vibration élongation de la liaison « -C-H » pour  $-\text{CH}_2$  et/ou  $-\text{CH}_3$ .
- Les deux spectres se confondent notamment au pic moyen à 1464  $\text{cm}^{-1}$  qui indique la déformation dans le plan de la liaison C-H du  $-\text{CH}_2$ .
- Se confondent aussi au pic à 750  $\text{cm}^{-1}$  preuve de la présence d'une chaîne  $-(\text{CH}_2)_n$  où  $n > 4$ .

Pour le mélange à 20% en PLA étudié à l'extérieur, on remarque :

- Une augmentation de l'intensité des pics de PLA 20ex par rapport au PLA 20T au deux pics forts à 2919 et 2854  $\text{cm}^{-1}$  indiquant une élongation de la liaison -C-H du  $-\text{CH}$ ,  $-\text{CH}_2$  ou  $-\text{CH}_3$
- On remarque également une augmentation de l'intensité au pic moyen vers 1765  $\text{cm}^{-1}$  indiquant une fonction cétone  $-\text{C}=\text{O}$ .
- Une augmentation deux pics faibles à 1463 et 1363  $\text{cm}^{-1}$ , qui confirment la présence du  $-\text{CH}_2$  et  $-\text{CH}_3$ , respectivement.
- et aux pics moyens à 1212, 1134 et 1091  $\text{cm}^{-1}$  qui confirment la présence la fonction cétone  $-\text{C}-\text{CO}-\text{C}$ .

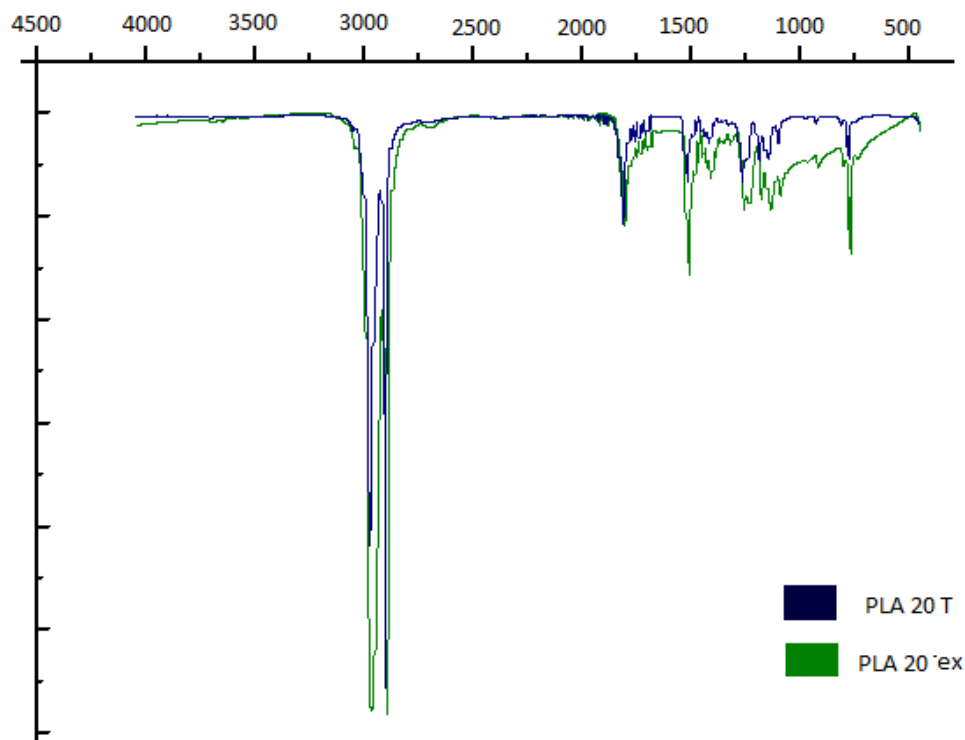


Fig. VI.3 : Spectres du PLA 20% témoin et PLA 20% extérieur

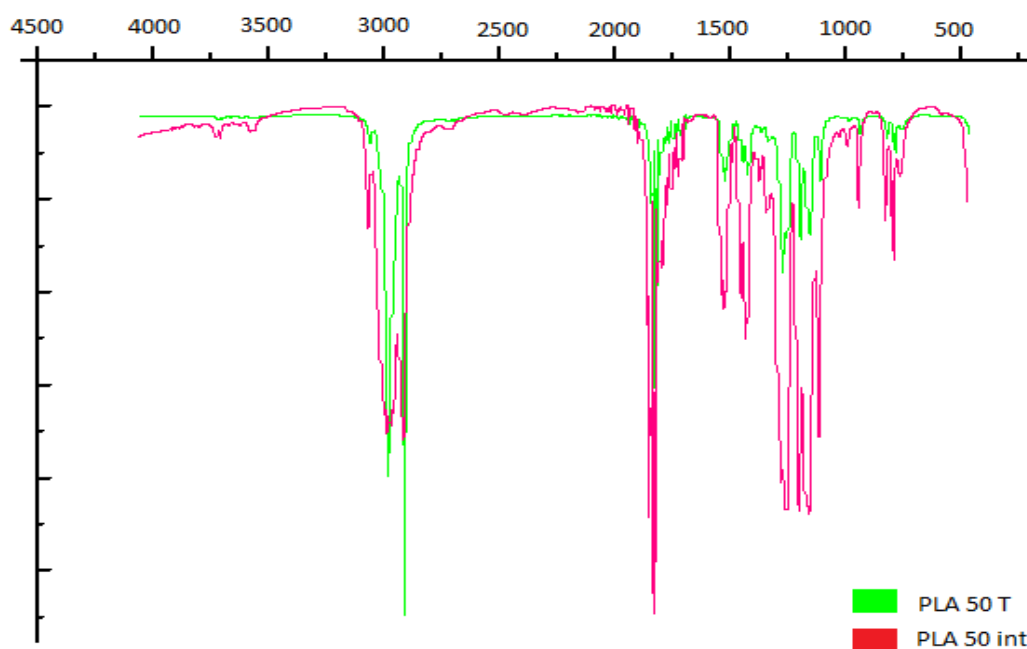


Fig. VI.4 : Spectres du PLA 50% témoin et PLA 50% intérieur

Pour le mélange à 50/50 étudié au laboratoire, on remarque :

- une diminution dans l'intensité des pics de PLA 50% (int) par rapport aux mêmes pics dans le spectre du PLA 50T à  $2919$  et  $2854\text{ cm}^{-1}$ , qui indiquent une élongation de la liaison  $\text{-C-H}$  du groupement  $\text{-CH}$ ,  $\text{-CH}_2$  et/ou  $\text{-CH}_3$
- une augmentation dans l'intensité des pics vers  $1765\text{ cm}^{-1}$ , de la fonction  $\text{-C=O}$
- augmentation aussi des pics vers  $1463$  et  $1363\text{ cm}^{-1}$ , qui prouvent la présence des deux radicaux  $\text{-CH}_2$  et  $\text{-CH}_3$



- augmentation de l'intensité des pics vers 1212, 1134 et 1091  $\text{cm}^{-1}$  qui confirment la présence la fonction cétone  $\text{-C-CO-C}$ .
- apparition du pic vers 920  $\text{cm}^{-1}$ , indique une vibration de la liaison  $\text{-C-H}$  d'un cycle aromatique (probablement dû au solvant)

Dans les spectres du PLA 50% témoin et PLA 50% extérieur, on remarque :

- Une augmentation de l'intensité des pics de PLA 50ex par rapport au PLA 50T au deux pics forts à 2919 et 2854  $\text{cm}^{-1}$  indiquant une élongation de la liaison  $\text{-C-H}$  du  $\text{-CH}$ ,  $\text{-CH}_2$  ou  $\text{-CH}_3$
- On remarque également une augmentation de l'intensité au pic moyen vers 1765  $\text{cm}^{-1}$  indiquant une fonction cétone  $\text{-C=O}$ .
- Aux deux pics faibles aussi à 1463 et 1363  $\text{cm}^{-1}$ , qui confirment la présence du  $\text{-CH}_2$  et  $\text{-CH}_3$ , respectivement.
- aux pics moyens à 1212, 1134 et 1091  $\text{cm}^{-1}$  qui confirment la présence la fonction cétone  $\text{-C-CO-C}$ .

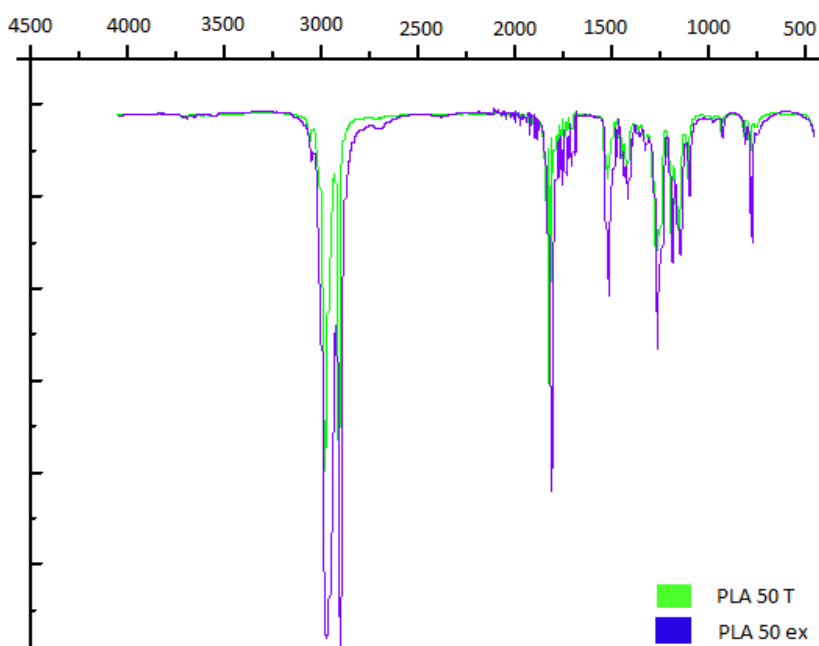


Fig. VI.5. Spectres IR du PLA 50% témoin et extérieur

Dans le spectre du PLA témoin et PLA intérieur, on remarque que :

- Une augmentation de l'intensité des pics de PLA int par rapport au PLA T aux pics faibles vers 3642 et 3508  $\text{cm}^{-1}$ , présents dans les aldéhydes et les cétones.
- On remarque également une augmentation de l'intensité aux 3 pics moyens vers 2992, 2946 et 2880  $\text{cm}^{-1}$  qui montrent une élongation de la liaison  $\text{-C-H}$  des groupements  $\text{-CH}$ ,  $\text{-CH}_2$  et/ou  $\text{-CH}_3$
- Par contre on remarque une diminution au triple pic à 1786, 1765 et 1756  $\text{cm}^{-1}$ , qui indiquent l'apparition d'une fonction ester
- Une augmentation de l'intensité des 3 pics à 1187, 1087 et 1079  $\text{cm}^{-1}$ , qui prouvent la présence d'une fonction cétone
- une augmentation également au pic faible vers 920  $\text{cm}^{-1}$  qui indique une déformation dans le plan de la liaison  $\text{-C-H}$

- une augmentation considérable au pic moyen à  $755\text{ cm}^{-1}$  qui montre la présence de la liaison -C-H du noyau benzénique (probablement du au solvant utilisé pour la préparation des films).



Fig. VI.6 : Spectres du PLA témoin et PLA intérieur

Dans le spectre du PLA T et PLA ex, on remarque :

- Une augmentation de l'intensité des pics de PLA ex par rapport au PLA T aux pics faibles vers  $3642$  et  $3508\text{ cm}^{-1}$ , présents dans les aldéhydes et les cétones.
- On remarque également une augmentation de l'intensité aux 3 pics moyens vers  $2992$ ,  $2946$  et  $2880\text{ cm}^{-1}$  qui montrent une élongation de la liaison -C-H des groupements -CH, -CH<sub>2</sub> et/ou -CH<sub>3</sub>
- Par contre on remarque une diminution au triple pic à  $1786$ ,  $1765$  et  $1756\text{ cm}^{-1}$ , qui indiquent une fonction ester
- Une augmentation de l'intensité des 3 pics à  $1187$ ,  $1087$  et  $1079\text{ cm}^{-1}$ , qui prouvent la présence d'une fonction cétone
- une augmentation également au pic faible vers  $920\text{ cm}^{-1}$  qui indique une déformation dans le plan de la liaison -C-H
- une augmentation considérable au pic moyen à  $755\text{ cm}^{-1}$  qui montre la présence de la liaison -C-H du noyau benzénique.

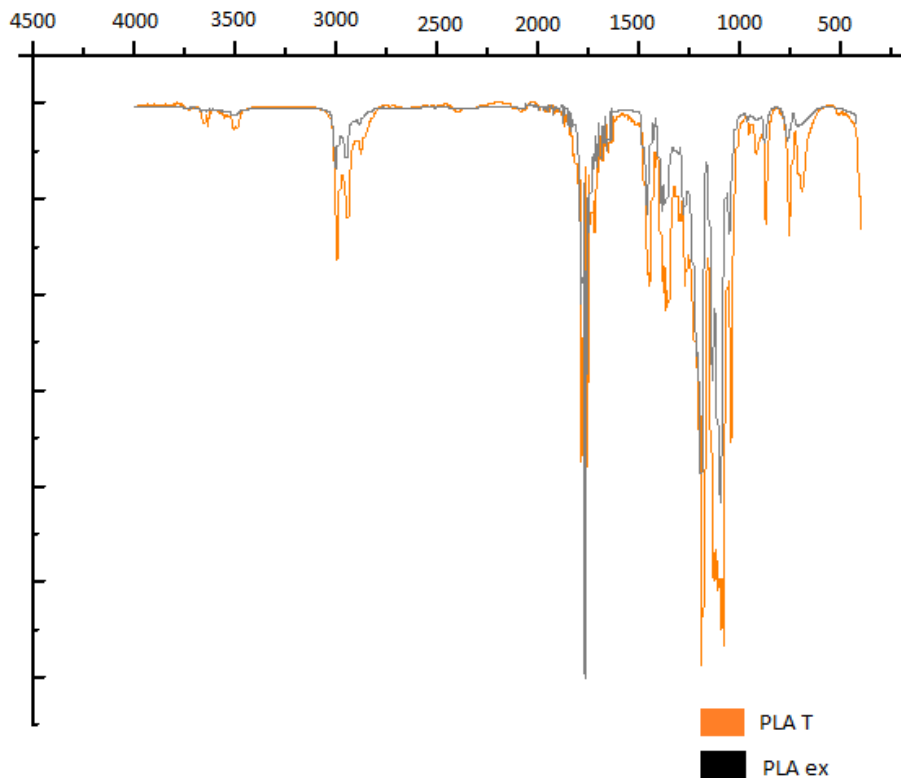


Fig. VI.7 : Spectres du PLA témoin et PLA extérieur

#### 4. *Discussions :*

En premier lieu, il faut que le rapport C/N soit proche de compris entre 15 et 30, or nous avons remarqué qu'il était à 9. Il y a dans ce cas là un certain ralentissement de l'activité microbienne.

En second lieu, l'analyse du sol a montre une forte concentration en phosphore menant à un rapport de C/N/P=0,08 ; ce qui est très loin du rapport C/N/P idéal pour le développement des microorganismes qui est de l'ordre de 100/10/1.

Le sol étant léger par manque d'argile ne retient pas assez d'eau pour permettre d'atteindre un taux d'humidité de plus de 50%, favorables aux développements de microorganismes.

Le changement du pH pour l'étude au laboratoire peut s'expliquer que les ions sont apportés de l'eau de l'arrosage, vu que l'eau desservie dans la ville d'Alger à un pH entre 7,6 et 8,6.

Ce sol est assez pauvre en microorganismes (entre 43 000 et 97 000 UFC/g contre 100 millions/g habituellement mesurés)

La variation des taux de masse, ainsi que les indices de densité, pour les différents échantillons est assez négligeable, mais en gardant en vue la concentration du phosphore et le nombre de microorganismes, on ne peut attribuer ces variations qu'à des interactions chimiques et/ou physico-chimiques

Les spectres infrarouges indiquent pour chaque formulation un léger changement dans la composition des échantillons.

Le changement noté pour le PLA, est dû à la présence de l'eau ce qui prouve qu'il y a une certaine attaque du sol contre les éléments externes, confirmant ainsi la théorie sur les interactions chimiques et/ou physico-chimiques.

### 5. Conclusion :

Au cours de cette étude des formulations à différentes concentrations (0/100, 20/80, 50/50, 80/20, 100/0) à base de PEBD/PLA ont été enfouies dans deux milieux différents : laboratoire et milieu naturel.

Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le sol est un milieu légèrement basique riche en phosphore mais faible en carbone. C'est un sol léger car il contient peu d'argile par rapport au sable. Ceci influence sur la capacité de rétention d'eau et ainsi sur le taux d'humidité
- Le taux de variation de masse des éprouvettes en fonction du temps n'est pas linéaire et dépend du % du PLA.
- La formulation faible en PLA présente une légère diminution de masse en comparaison avec les autres formulations. Les résultats montrent que des éléments migrent dans le matériau, il s'agit de l'eau car le PLA est reconnu par son caractère hygroscopique pH.

Il serait intéressant, en vue d'approfondir cette étude, de :

- Doser le sol agricole afin d'augmenter, par des carbonates et des nitrates, le rapport C/N, tout en augmentant le pH vers une valeur plus basique.
- Choisir un sol absorbant et qui emmagasine l'eau pour augmenter l'humidité à 50%
- Compléter par une caractérisation au microscope électronique à balayage (MEB) des échantillons enfouis dans le sol.



# Conclusion Générale

## Conclusion :

Au cours de cette étude,

- Une analyse physico-chimique et microbiologique du sol a été réalisée,
- L'évolution de la biodégradation en fonction du temps du nouveau matériau PEbd/PLA avec différentes composition en PLA (l'acide polylactique), thermoplastique biodégradable dans deux milieux différents.

Les résultats obtenus permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Le sol agricole choisit de la région de Ain Taya est légèrement basique avec un pH qui est au alentour de 8. Il présente une humidité limitée à 30% du fait de sa pauvreté en argile, avec un nombre faible en micro-organisme mais riche en phosphore.
- L'évolution de taux de variation de masse des échantillons dans les milieux sont très faible. Les résultats sont confirmés par l'analyse Spectroscopique IR dont les spectres sont identiques à quelques exceptions.

Enfin cette étude nous permet de conclure que la biodégradation des matériaux est influencée par un certain nombre de facteurs :

- Les paramètres physico chimiques du milieu de dégradation, la température qui favorise l'activité microbienne, la teneur en eau du milieu qui doit être suffisante et le pH.
- Les paramètres microbiologiques du milieu de dégradation c'est la présence des microorganismes capables de dégrader le matériau.

Malgré les résultats peu concluants obtenu, il serait intéressant en vue d'approfondir notre étude et réaliser notre objectif, obtenir un taux de variation de masse important d'ou un emballage biodégradable à prix raisonnable de prendre un sol avec

- un rapport C/N/P au voisinage de 100/10/1,
- un taux d'humidité supérieure à 50%
- une température supérieure à 40°C.





## Références bibliographiques

- [1] **Pothet J.** Emballage et environnement. 10/04/1998. Techniques de l'ingénieur. A 9730.
- [2] Tendances technologiques. L'USINE NOUVELLE. N°2915. 29 AVRIL 2004. p.56.
- [3] **CHOMON P.** Emballages plastiques souples et semi-rigides Polymères de grande diffusion. Techniques de l'ingénieur. Ag 6131. p.2-5.
- [4] **Akira Iwamoto.** « Enzymatic degradation of plastics ». Ibaraki Japan. 1994.
- [5] **Polito T.** « Éco-conception des emballages », (1998). Techniques de l'ingénieur. AG 6280. p2-5.
- [6] **Royte, E.** "Plastique de maïs à la délivrance". *Magasin Smithsonian*. (Août. 2006).
- [7] Chimie de casserole [on line] [[www.ac-nancy-metz.fr/enseign/physique/nouvprog/prem\\_l/docs/chim\\_cuisine/chim\\_casserole2-RP.doc](http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/physique/nouvprog/prem_l/docs/chim_cuisine/chim_casserole2-RP.doc)], (2007)
- [8] **FREUND C.** Approche de systèmes géométriquement contraints à motif phosphazène. Thèse de doctorat : Université Paul Sabatier Toulouse III.
- [9] **CHOMON P.** Emballages plastiques souples et semi-rigides : Polymères de grande diffusion. Technique de l'ingénieur. AG6131. P.2-4.
- [10] **Hatat D., Chrétien G.** Initiation aux plastiques et aux composites. Technique et Documentation Lavoisier (Paris). P.47-51
- [11] **Södergård A., Stolt M.** « Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition », *Progress in Polymer Science*. 27 1123-1163.2002.
- [12] **Drumright R. E., Gruber P. R., Henton D. E.** «Polylactic acid technology », *Advanced Materials* 12 23 1841-1846. 2000.
- [13] **Crank M., Patel M.** « Techno-economic feasibility of large scale production of bio-based polymers in Europe (PRO-BIP) », Final report prepared for the European commission's Institute for Prospective Technological Studies (IPTS),Sevilla, Spain, 2004.
- [14] **Fink H. P., Ganster J.** « Novel thermoplastic composites from commodity polymers and manmade cellulose fibers », *Macromolecular Symposia* 244 107-118. 2006.
- [15] **Södergård A., Stolt M.** « Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition », *Progress in Polymer Science* 27 1123-1163 (2002)
- [16] **Yamagushi A., Kodama Y., Matsuo H., et al.** « Compact Disc Recordable with substrate of biomass plastic material », *Japanese Journal of Applied Physics* 45 n°8A 6326-6327 Abstract. 2006.
- [17] **Narayan N., Roychoudhury P. K., Srivastava A.** « L (+) lactic acid fermentation and its product polymerization », *Electronic Journal of Biotechnology* 7 n°2 .2004

- [18] Propriétés du sol [on line] [<http://users.skynet.be/the.fly/htm/p%e9dologie/proprietes.htm>], 2008.
- [19] **Beauchamp J.** Université de Picardie Jules Verne. 18 octobre 2008 [on line] [<http://www.u-picardie.fr/~beaucham/mst/sol.htm>]
- [20] Ecologie microbienne, [on line] [[http://www.ecosociosystemes.fr/ecologie\\_microbienne.html](http://www.ecosociosystemes.fr/ecologie_microbienne.html)], (2008)
- [21] « sols, travail des » Microsoft® Encarta® 2009 [DVD]. Microsoft Corporation. 2008.
- [22] **Pelmont, J.** Bactéries et environnement, Adaptations physiologiques. Presses Universitaire de Grenoble. 1993. 899 p.
- [23] Atlas, R.M. (1988) in Principles of microbiology, Ed. Mosby, 1994.
- [24] **Bayard R.** Evaluation de la biodétérioration des déchets solidifié. Mémoire de DEA : institut national des sciences appliquées de Lyon. 1993. 86 p.
- [25] Association RECORD (1992) Les biotechnologies appliquées au traitement des déchets : Etat de l'art, Etat des connaissances Rapport final et complément du contrat n°91-401/EUR, 1992. 163 p.
- [26] **Gourdon, R.** Traitement Biologique des Déchets. Techniques de l'Ingénieur, traité Environnement G2. 2001. 16 p.
- [27] **Hartz S.R., Klink R.E., Ham R.K.** Temperature Effects : Methane Generation from Landfill Samples. Journal of the Environment Engineering Division. 1982. Vol. 108. p. 629-638.
- [28] **Gourdon R., Bayard R., Valla G.** Biodétérioration microbienne des déchets : définitions, principes et méthodes d'évaluation. Déchets, Sciences et Techniques n° 1. 1er trimestre 1996. p. 13-21.
- [29] **Gendebien A.** (1992). Landfill Gas : from Environment to Energy. State of the Art in the European Community Context. In Proceedings of Sardinia 91. The Third International Landfill Symposium, 1991. Cagliari, Sardinia, Italy. Vol. 1. p. 69-75.
- [30] **Graindorge, P.** Contribution à l'étude du traitement des déchets urbains par fermentation méthanique : a) cinétiques de la fermentation et application au contrôle d'un réacteur ouvert ; b) modélisation de l'étape acétaste du processus biologique. Thèse Doctorat : Montpellier II, Université des Sciences et Techniques du Languedoc. 1998. 156 p.
- [31] **Gourdon R., Bayard R.** Traitements biologiques des déchets, Cours de DEA "Science et Technique des Déchets" Version 1.1. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1998.
- [32] **Vincent F.** Contribution à l'étude du fonctionnement d'une Décharge. Modélisation d'un déchet-type. Thèse Doctorat : Ecole Nationale Supérieure des Mines. 1991. 210 p.

[33] **Ehrig H.J.** Quality and Quantity of Sanitary Landfill Leachate. *Waste Management and Research*. Vol. 1. 1083.1993. p. 53-68.

[34] **Dumont,** (1993). Biochemical Methane Potential of Municipal Solid Waste (MSW) Components. *Wat. Sci. Technol.* Vol. 27, p. 1-14

[35] **Djedouani D.** « Etude des impacts environnementaux de l'huile de tournesol époxydée », Thèse de magister, Ecole Nationale Polytechnique (Alger), (2007), p. 40 – 41

[36] Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, [on line]  
[[www.biophyresearch.com/pdf/ftir.pdf](http://www.biophyresearch.com/pdf/ftir.pdf)], Mai 2007.

## ANNEXES

### pH du sol :

Le pH a été déterminé selon la norme (ISO 10390). On ajoute à l'échantillon du sol qui est équivalent à 5 mL, cinq fois ce volume en eau. Après une agitation pendant 5min et 2h de repos on effectue la lecture à l'aide d'un pH-mètre.

### Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique du sol est déterminée au laboratoire de pédologie de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH, Bir Mourad Rais) suivant une méthode internationale (Guy, 1978). L'analyse s'effectue sur une prise d'essai de sol fin (éléments < 2mm). La présente méthode a pour but de déterminer le pourcentage des différentes fractions de particules minérales. Le principe de la méthode est basé sur la mise en suspension de particules minérales, des prélèvements seront faits à l'aide de la pipette de Robinson, dans des flacons à sédimentation à des profondeurs et à des moments déterminés.

### Azote total :

La teneur en azote total est déterminée par la méthode Kjeldhal selon la norme (NF ISO 11261). Cette méthode a pour principe de minéraliser l'azote organique par l'acide sulfurique en présence d'un activateur de minéralisation, distillation de l'azote ammoniacal forme et titrage dans une solution d'acide borique.

### Phosphore :

Le dosage du phosphore est déterminé selon la norme (ISO11263). Cette méthode repose sur l'extraction des formes de phosphore solubles par une solution d'hydrogénocarbonate de sodium. La teneur en phosphore de l'extrait limpide est mesurée par une méthode spectrométrique comportant la formation d'un complexe phosphate-molybdate, ce complexe étant réduit au moyen d'acide ascorbique pour former un complexe bleu.

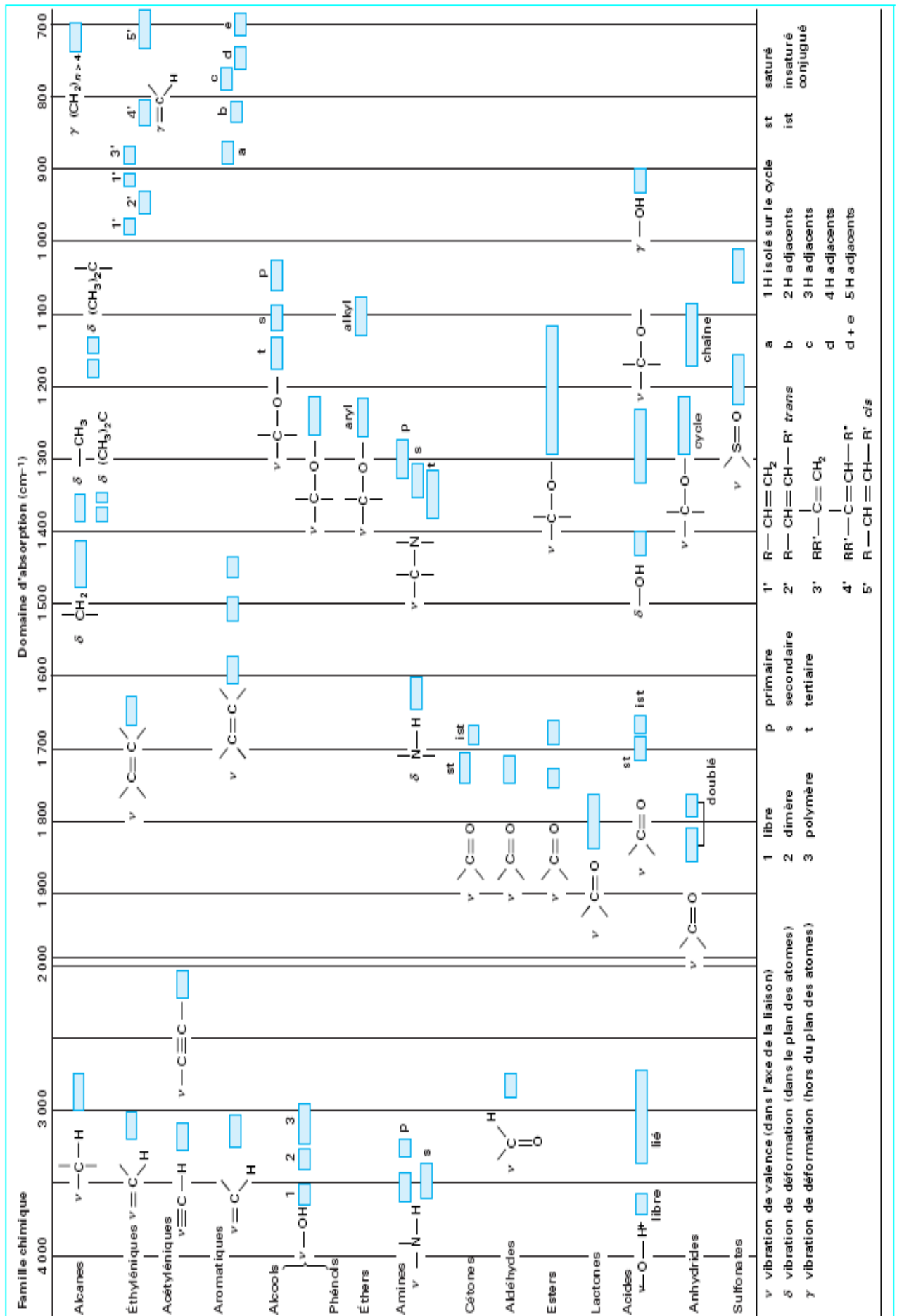


Figure 6 - Corrélations vibrations-fréquences de groupe en infrarouge

Fréquences de vibrations des principales fonctions rencontrées dans les composés organiques

Composé	Vibrations caractéristiques	Fréquence de vibration (cm <sup>-1</sup> )
Alcane	CH <sub>x</sub> <i>stretching</i>	2950-2850
	CH <sub>x</sub> <i>déformation</i>	1500-1400
Insaturé	CH <sub>x</sub> <i>stretching</i>	3050-3000
	C=C <i>stretching</i>	1600-1500
	Aromatique substitué (CH)	1900-1700
	Aromatique <i>bending</i>	800-750
Alcool	OH <i>stretching</i>	3400 (large)
	C-O <i>stretching</i>	1050-1250
	OH <i>déformation</i>	(1 <sup>aire</sup> <2 <sup>aire</sup> <3 <sup>aire</sup> <Phénol)
Cétone	C=O <i>stretching</i>	1690-1680
Aldéhyde	H-C=O	2800-2650
	C=O <i>stretching</i>	1710-1700
Acide	OH (avec liaison hydrogène)	3200-2500 (large)
	C=O <i>stretching</i>	1725-1700
	C-O	1440-1395, 1320-1210
	OH <i>déformation</i>	950-900
Sel de l'acide	COO <sup>-</sup> <i>stretching antisymétrique</i>	1615-1650
	COO <sup>-</sup> <i>stretching symétrique</i>	1400-1300
Ester	C=O	1775-1720
	Aromatique	1250-1100
Amine	NH <i>stretching</i>	3400-3300 (1 <sup>aire</sup> >2 <sup>aire</sup> )
	NH <i>déformation</i>	1650-1550 (1 <sup>aire</sup> >2 <sup>aire</sup> >Arom.)
	C-N <i>stretching</i>	1350-1250 (1 <sup>aire</sup> <2 <sup>aire</sup> <Arom.)
Amide	NH <i>stretching</i>	3350-3070 (1 <sup>aire</sup> >2 <sup>aire</sup> )
	C=O	1680-1630
	NH <i>déformation</i>	1650-1515 (1 <sup>aire</sup> >2 <sup>aire</sup> )
	C-N <i>stretching</i>	1180-1040 (1 <sup>aire</sup> <2 <sup>aire</sup> )
Nitrile	C≡N	2250
Isocyanate	N=C=O	2275
Sulfone	S=O	1100-1000
	C-S <i>stretching</i>	740-690
	SO <sub>2</sub>	1380-1300
Halogénure	C-F	1400-1000
	C-Cl	1175-650
	C-Br	590-510
	C-I	525-485

## ملخص:

لقد غمرت المواد البلاستيكية السوق. من أي وقت مضى منذ الحرب العالمية الثانية ، حيث استبدلت معظم المواد بما في ذلك الحديد والزجاج. يمثل التغليف البلاستيكي أكثر من 50 ٪ من استخدام البلاستيك. بسبب إنتاجه تلوث شديد للهواء في حين أن النفايات المتولدة عن استخدامه راکدة في الطبيعة. من ناحية أخرى، البلاستيك المحلل طبيعياً (المعتمدة على النبات) غالي جداً، وتصل إلى 10 مرات أكثر من البلاستيك المعتمدة على النفط.

لذلك يجب علينا أن نجد كيس من البلاستيك على حد سواء وبأسعار معقولة قابلة للتحلل. غرض هذه الدراسة هو "التحلل الحيوي من خليط من البلاستيك تحتوي على متعدد الإيثيلان منخفض الكثافة و حمض متعدد اللبني". نسعى إلى أفضل نسبة لصياغة جديدة للأكياس البلاستيكية.

الكلمات الرئيسية : متعدد الإيثيلان منخفض الكثافة ، حمض متعدد اللبني، التحلل الحيوي، التغليف البلاستيكي.

## Résumé:

Le plastique a envahi le marché et ce depuis la seconde guerre mondiale, où il a remplacé la plupart des matériaux notamment le fer et le verre.

L'emballage plastique représente plus de 50% de l'utilisation du plastique. Sa production cause une forte pollution atmosphérique alors que les déchets générés par son utilisation stagnent dans la nature. D'un autre côté, les bioplastiques ou plastiques biodégradables (à base végétale) coûtent très cher, jusqu'à 10 fois plus qu'un plastique à base de pétrole.

Il faut, donc, trouver un emballage plastique qui soit à la fois à un prix abordable et biodégradable.

La présente étude a pour objet « la biodégradation d'un mélange plastique à base de PEBD/PLA ». On cherche la meilleure proportion pour une nouvelle formulation pour un emballage plastique.

Mots clés : Polyéthylène basse densité (PEBD), acide polylactique (PLA), biodégradation, emballage plastique.

## Abstract:

Plastic has flooded the market ever since the Second World War, where he replaced most materials including iron and glass. Plastics packaging represents for more than 50% of the use of plastic. Its production causes severe air pollution while the waste generated by its use stagnated in nature.

On the other hand, biodegradable plastics or bio-plastics (plant-based) are very expensive, up to 10 times more than petroleum-based plastic. We must therefore find a plastic bag that is both affordable and biodegradable.

This study's purpose is "the biodegradation of a plastic mixture containing LDPE / PLA." We look for the best proportion for a new formulation of plastic bags.

Keywords: low density polyethylene LDPE, poly(lactic acid) PLA, biodegradation, plastic packaging.