

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie de l'environnement

Laboratoire des Science et Techniques de l'Environnement

Mémoire de Master

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie de l'Environnement

# **Bioplastique, biodégradable, compostable, biosourcé**

## **Pour les emballages alimentaires**

**Ryma LAIFA**

**Sous la direction de Mme N.BELHANECHÉ, Professeur**

**Et de Mme N.LARDJANE, MCA**

**Présenté et soutenu publiquement le 20 juin 2016.**

### **Composition du Jury :**

<b>Président :</b>	Mr R. KERBACHI	Professeur, ENP Alger.
<b>Promoteur :</b>	Mme N.BELHANECHÉ	Professeur, ENP Alger.
<b>Co- Promoteur :</b>	Mme N.LARDJANE	MCA, Univ. Tizi-Ouzou.
<b>Examineur :</b>	Mme B.BOUBEKEUR	MCB, Univ. Boumerdes.

**ENP 2016.**

## ملخص

البلاستيك التقليدي الصادر من الوقود الاحفوري انتقدت كثيرا ، و خاصة تلك ذات الاستعمال قصير المدى مثل تغليف المواد الغذائية. هذا ما جعل البلاستيك الحيوي يعرض كالبديل الاكثر ملاءة للبيئة. انها غالبا ما تكون قابلة للتحلل و مصنوعة من موارد متجددة ،الخاصيتين المستخدمتين كوسائط ترويجية. من اجل دمج افضل لاستخدام البلاستيك الحيوي في السوق ،ادارة جيدة للنفايات امر بالغ الاهمية. الهدف من هذا العمل هو تحليل الوضع الراهن فيما يتعلق باستخدام البلاستيك الحيوي لتغليف المواد الغذائية.

**الكلمات المفتاحية :** البلاستيك الحيوي ، قابل للتحلل ، مصدر حيوي ، سماد ، اغلفة المواد الغذائية.

## ABSTRACT

Traditional plastics from fossil fuels are often criticized, especially those for short life's applications such as food packaging. This is why bioplastics are presented as alternatives to more environmentally friendly. They are often biodegradable and made from renewable resources, two characteristics used as promotional arguments. To better integrate the use of bioplastics on the market, better waste's management is paramount. Analyze the current situation regarding the use of bioplastics for food packaging is the main objective of this work.

**Keywords :** bioplastic , biodegradable, Biobased, compostable food packaging

## RESUME

Les plastiques traditionnels d'origine fossile sont souvent critiqués, surtout pour des applications à courte durée de vie comme les emballages alimentaires. C'est pourquoi les bioplastiques sont présentés comme des solutions de rechange plus respectueuses de l'environnement. Ils sont souvent biodégradables et issus de ressources renouvelables, deux caractéristiques utilisées comme arguments promotionnels. Afin de mieux intégrer l'usage des bioplastiques sur le marché, une meilleure gestion des matières résiduelles est primordiale. Analyser la situation actuelle quant à l'usage des bioplastiques pour l'emballage alimentaire est l'objectif principal de ce travail.

**Mots clés :** bioplastique, biodégradable, biosourcé, compostable, emballage alimentaire.

# *Dédicaces*

*A la mémoire de mes grands parents Puisse Dieu les accueillir dans son vaste paradis.*

*A mes chers parents,*

*Que nulle dédicace ne puisse exprimer ce que je leurs dois, pour leur bienveillance, leur affection et leur soutien Trésors de bonté, de générosité et de tendresse, en témoignage de mon profond amour et ma grande reconnaissance  
« Que Dieu vous garde »*

*A mon cher frère pour son effort et son encouragement pour l'accomplissement de mes études.*

*A Toute ma famille pour la tendresse, le soutien et l'amour qu'ils m'ont toujours accordé.*

*A toute personne,*

*Qui m'a aidé à franchir un horizon dans ma vie*

***Ryma LAIFA***

# *Remerciement*

*Je remercie tout d'abord ALLAH tout puissant de nous avoir donné la force, le courage et la volonté pour arriver au bout de ce travail.*

*Ainsi que nos parents à qui nous vouons une reconnaissance infinie pour leur soutien et leur patience.*

*je remercie en premier lieu Mme N.BELHANECHÉ professeur à L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE d'avoir accepté d'être notre promotrice et de nous proposer ce sujet de projet de fin d'étude très intéressant, ainsi que pour son aide, sa patience, sa rigueur dans le travail et ses conseils.*

*Je tiens à remercier profondément Mme N.LARDJANE pour son encadrement, ses conseils éclairés et toute la confiance qu'elle nous a témoignée tout au long de notre projet.*

*Je voudrais adresser mes vifs remerciements aux membres du jury :*

- ❖ Monsieur R. KERBACHI, pour l'honneur qu'Il nous a fait en acceptant de présider le jury de notre soutenance.*
- ❖ Madame B. BOUBEKER d'être parmi les membres du jury et de nous faire l'honneur d'examiner ce travail.*

# TABLE DE MATIERE

RESUME	
DEDICACES	
REMERCIEMENT	
TABLE DE MATIERE	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	
ABREVIATIONS ET NOTATIONS	
INTRODUCTION GENERALE .....	11
<b>CHAPITRE 1: DE QUOI PARLE-T-ON ? DEFINITIONS USUELLES</b>	
1.1. BIOPLASTIQUE .....	14
1.2. BIOPLASTIQUE BIODEGRADABLE .....	16
1.4. BIOPLASTIQUE COMPOSTABLE .....	19
1.2. BIOPLASTIQUE BIOSOURCE .....	20
<b>CHAPITRE 2: LES BIOPLASTIQUES POUR EMBALLAGES ALIMENTAIRE</b>	
2.1. CLASSIFICATION DES BIOPLASTIQUES .....	23
2.2. EXEMPLES D'EMBALLAGES ALIMENTAIRES FABRIQUES AVEC DES BIOPLASTIQUES .....	24
2.2.1. Bioplastiques naturels issus directement de la biomasse .....	25
2.2.2. Bioplastiques issus des microorganismes par fermentation microbienne .....	28
2.2.3. Bioplastiques obtenus par synthèse à partir de monomères renouvelables.....	30
2.2.4. Bioplastiques pétrochimiques .....	33
2.3. INNOVATION .....	34
<b>CHAPITRE 3: LES POLYMERES, BIOPOLYMERES ET LEURS IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT</b>	
3.1. AVANTAGES ET INCONVENIENTS RELIES A L'UTILISATION DES POLYMERES FRAGMENTABLES .....	38
3.2.PROBLEMATIQUES ENVIRONNEMENTALES RELIEES AUX BIOPOLYMERES.....	39

3.3.PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE DES EMBALLAGES ALIMENTAIRES EN BIOPLASTIQUE. ....	42
3.3.1.La performance environnementale par l’analyse du cycle de vie.....	42
3.3.2.Exemples d’ACV traitant des emballages alimentaires à base de bioplastique.....	44
3.3.2.1. PLA Ingeo de NatureWorks comparé au PET pour des contenants alimentaires.....	44
3.3.2.2. Comparaison de différentes barquettes fabriqué par cascades.....	46
3.3.3. Analyse et interprétation des résultats.....	48
 <b>CHAPITRE 4: ANALYSE CRITIQUE SUR L’AVENIR DES BIOPLASTIQUES</b>	
4.1. CONTRAINTES QUI LIMITENT L’ESSOR DES BIOPLASTIQUES .....	51
4.2. FACTEURS FAVORISANT LA CROISSANCE DU MARCHE OCCUPE PAR LES BIOPLASTIQUES.....	53
 <b>CHAPITRE 5: QUELQUES RECOMMANDATIONS</b>	
5.1. SENSIBILISATION ET EDUCATION .....	57
5.2. RECOMMANDATION POUR L’INDUSTRIE AGRICOLE.....	58
5.3. RECOMMANDATIONS POUR LES INSTANCES GOUVERNEMENTALES.....	59
5.4. REDUCTION A LA SOURCE .....	59
5.2. MATIERES PREMIERES QUI N’ENTRENT PAS EN CONCURRENCE AVEC LES PRODUITS ALIMENTAIRES. ....	60
 CONCLUSION GENERALE .....	61
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	63

## Liste des figures

<b>Figure 1.1</b> – Matrice des bioplastiques .....	16
<b>Figure 1.2</b> – Schéma simplifié du processus de biodégradation d'un bioplastique. ....	18
<b>Figure 2.1</b> – classification des biopolymères biodégradables.....	24
<b>Figure 2.2</b> – Exemple des sacs de Mater-Bag.....	26
<b>Figure 2.3</b> – Exemples d'application de NatureFlex.....	27
<b>Figure 2.4</b> – Exemple d'application du LACTINOV dans le domaine d'emballage alimentaire .....	28
<b>Figure 2.5</b> – Applications pour des emballages alimentaires thermoformés avec les bioplastiques de Metabolix. ....	29
<b>Figure 2.6</b> – Exemple d'application du PLA dans le domaine d'emballage alimentaire par NatureWorks .....	31
<b>Figure 2.7</b> – Exemple de bioplastique GREEN PE de Braskem.....	33
<b>Figure 2.8</b> – Emballages de fruits et légumes avec l'Écoflex de BASF. ....	34
<b>Figure 3.1</b> – Portée de l'analyse du cycle de vie. ....	42
<b>Figure 3.2</b> – Emballage étudié lors de l'ACV comparant le PLA de NatureWorks.. ....	45
<b>Figure 3.3</b> – Barquettes étudiées lors de l'ACV des produits de Cascades. ....	47

***Liste des tableaux***

***Tableau 3.1 – Améliorations durables des biopolymères comparativement aux polymères issus de la pétrochimie ..... 40***

***Tableau 3.2 – Risques environnementaux reliés aux biopolymères.. ..... 41***

***Tableau 3.3 – Applications de l'analyse du cycle de vie..... 43***

***Tableau 3.4 – Comparaison de la performance environnementale du PLA versus le PET..... 46***

**LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES**

**ACV:** *Analyse environnementale du cycle de vie*

**ASTM:** *American Society for Testing and Materials*

**BioPE:** *Biopolyéthylène*

**BioPET:** *Biopolyéthylène téréphtalate*

**BioPP:** *Biopolypropylène*

**BNQ:** *Bureau de normalisation du Québec*

**BPI:** *Biodegradable Products Institute*

**CIRAIG:** *Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services*

**CO<sub>2</sub>:** *Dioxyde de carbone*

**ÉEQ:** *Éco Entreprises Québec É.-U. États-Unis*

**HDPE:** *Polyéthylène à haute densité (High Density Polyethylene)*

**HR:** *Humidité relative*

**IFEU:** *Institute for Energy and Environmental Research*

**ISO:** *Organisation internationale de normalisation*

**LDPE:** *Polyéthylène à basse densité (Low Density Polyethylene)*

**LET:** *Lieu d'enfouissement technique*

**MDDEP:** *Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs*

**PA:** *Polyamide*

**PBAT:** *Polybutylène adipate téréphtalate*

**PBS:** *Polybutylène succinate*

**PCL:** *Polycaprolactone*

**PE:** *Polyéthylène*

**PET:** *Polyéthylène téréphtalate*

**PHA:** *Polyhydroxyalcanoate*

**PHB:** *Polyhydroxybutyrate*

**PHBV:** *Polyhydroxybutyrate-valerate*

**PLA:** *Acide polylactique*

**PP:** *Polypropylène*

**PS:** *Polystyrène*

**PTT:** *Polytriméthylène téréphtalate*

**TPS:** *ThermoPlastic Starch*

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'un des phénomènes ayant permis les progrès remarquables de notre planète a été l'extraordinaire progression des matières plastiques. Grâce à leur faible cout et leurs multiples qualités, les plastiques ont envahi notre univers quotidien dans des domaines aussi diversifiés que l'emballage, le bâtiment, le transport, les équipements électriques et électroniques, l'ameublement et le loisir (Bewa, 2006).

La hausse des prix du pétrole, la demande croissante de produits responsables et écologiques, l'explosion démographique et la déplétion des matières premières non renouvelables créent une conjoncture favorable pour les produits biosourcés et les biopolymères.

Les emballages des produits alimentaires ont des fonctions essentielles en stockant, en protégeant et en préservant les aliments qu'ils renferment de la fabrication jusqu'à leur utilisation finale par les consommateurs.

Dans un contexte où la gestion des matières résiduelles est un enjeu majeur, les consommateurs ont par contre des préoccupations environnementales grandissantes envers certaines pratiques actuelles. Une des pratiques ainsi questionnées est l'usage du plastique qui est très répandu dans la conception des emballages. Les consommateurs sont notamment concernés par sa persistance dans l'environnement dû à son temps de décomposition de 100 à 400 ans (Zins Beuchesne et associés, 2008), ses ressources d'origine fossile non renouvelables ainsi que la quantité de déchets qui lui est attribuée.

En réponse à ces nombreuses préoccupations environnementales et dans un souci d'image, l'industrie des plastiques présente de nombreuses solutions, dont la substitution des ressources fossiles par des ressources renouvelables. En effet, de nombreux fabricants proposent depuis quelques années des emballages qu'ils présentent comme étant plus respectueux de l'environnement. L'essai portera sur les emballages fabriqués avec des bioplastiques biodégradables, compostables et biosourcés qui sont des exemples de matériaux sont en forte croissance depuis ces dernières années. Les bioplastiques proviennent en grande majorité de ressources renouvelables et plusieurs d'entre eux se biodégradent, deux caractéristiques utilisées comme arguments promotionnels d'un point de vue environnemental. Pour les bioplastiques qui utilisent des ressources renouvelables, par exemple le maïs ou la canne à sucre, une moins grande dépendance au pétrole

comparativement aux plastiques traditionnels est un avantage important pour les fabricants en termes d'approvisionnement et de stabilité des coûts de la matière première.

Les termes bioplastique, biodégradable, compostable et biosourcé amènent une confusion auprès des consommateurs qui ont souvent de la difficulté à les différencier et à cerner leurs significations et leurs bénéfices environnementaux réels. L'objectif principal de cette recherche bibliographique est d'analyser l'usage actuel de ces bioplastiques biodégradables, compostables et biosourcés pour les emballages alimentaires.

Le présent travail comporte cinq chapitres : la terminologie relative aux trois matériaux que sont les bioplastiques biodégradables, compostables et biosourcés est expliquée au premier chapitre. Le chapitre deux complète le portrait des pratiques actuelles en présentant l'utilisation des bioplastiques dans le domaine précis de l'emballage alimentaire.

Les trois derniers chapitres portent sur l'analyse des performances environnementales des bioplastiques à l'aide d'analyses du cycle de vie (ACV). Un jugement critique sur l'avenir des bioplastiques est traité en incluant des recommandations pour une meilleure intégration de ces matériaux sur le marché de l'emballage alimentaire. Des critères tels que les coûts, la gestion en fin de vie des produits, les performances physiques et barrières, les procédés de fabrication, la compréhension de la terminologie par la population et les marchés potentiels sont pris en considération lors de l'analyse critique sur l'avenir des bioplastiques.

# *CHAPITRE 1*

*“DE QUOI PARLE- T- ON ?  
DEFINITIONS USUELLES”*

## 1. DEFINITIONS USUELLES

### 1.1. Bioplastique (biopolymères)

Le terme « bioplastique » est défini selon la revue Sciences et Avenir, comme étant *“ un néologisme formé de toutes pièces par les industriels et qui recouvre des plastiques à la composition et à l'intérêt écologique très variables”*. Les bioplastiques sont des plastiques issus exclusivement de la polymérisation des biopolymères.

La chambre régionale du commerce et de l'industrie de Champagne-Ardenne indique le néologisme « bioplastique » ne correspond pas à une définition précise. Le même constat a été fait par la revue Sciences et Avenir, l'emploi du terme dans des ouvrages scientifiques réfère aux biopolymères qui sont souvent biodégradable ou du moins aptes à subir un processus de décomposition et qu'ils sont issus soit de la pétrochimie (polymères de synthèse ou associés à des composés naturels comme extrait de végétaux traités) (Yu, 2009), soit totalement dérivés de ressources renouvelables qui sont naturellement présents dans les organismes vivants (Smith, 2005).

Lorsqu'ils sont issus des ressources renouvelables, présentent l'avantage de ne pas contribuer à l'augmentation de l'effet de serre dans leur fin de vie, pour autant que les ressources soient renouvelées (cycle de carbone). Pour leur fin de vie, c'est le recyclage qui présenterait le plus intérêt dans l'état actuel des connaissances car il y a récupération de la matière (leur compostage ne présenterait pas d'avantage par rapport à leur enfouissement, au sens de la perte de matière et/ ou énergie.

Un des principaux inconvénients des biopolymères est leur hydrophilie, leur rapide dégradation et, dans certains cas, leurs propriétés mécaniques non satisfaisantes dans des environnements humides (Yu et autres, 2006). Les biopolymères, bien qu'ils soient issus de ressources renouvelables, demeurent dépendants de la pétrochimie, puisqu'ils proviennent souvent d'une culture agricole : les produits utilisés pour fertiliser les terres et les traitements phytosanitaires sont principalement issus de la pétrochimie, les équipements requis pour le labourage, les semis, l'irrigation ainsi que les récoltes et finalement, la conversion de la biomasse en biopolymères représentent des étapes requérant du pétrole ou ses dérivés, sans compter le transport requis entre chaque étape.

Les biopolymères d'origine biologique peuvent être classés en trois groupes (Yu et autres, 2006; Bewa, 2006) :

- Les polymères naturels, qui sont divisibles en deux familles : polysaccharides (amidon, cellulose) et protéines (animales ou plantes);
- Les polymères synthétisés par des bactéries (fermentation), tels que le polyhydroxyalcanoate (PHA) et le polyhydroxybutyrate (PHB);
- Les polymères synthétiques issus de biotechnologie de monomères naturels, tels que l'acide polylactique (PLA).

Le terme « bioplastique » nomme des matériaux différents selon l'origine et le pourcentage de matière d'origine végétale contenu qui est parfois minoritaire, en effet le Sustainable Biomaterials Collaborative (SBC) qui est une organisation américaine qui promeut l'utilisation des produits biosourcés, définit par ailleurs les bioplastiques comme étant des plastiques dérivés à 100 % de carbone provenant de l'agriculture, des forêts ou d'autres sources renouvelables (SBC, 2012a).

Souvent employé aujourd'hui, ce terme porte à confusion car il désigne deux réalités très différentes : l'origine du matériau (ressource renouvelable « biosourcé ») et la gestion de sa fin de vie (« biodégradable » ou « compostable »), il englobe ainsi trois catégories représentées dans la figure I-1 :

1. Biodégradables et issus de ressources renouvelables;
2. Biodégradables et issus de ressources non renouvelables (origine fossile);
3. Non biodégradables et issus de ressources renouvelables.

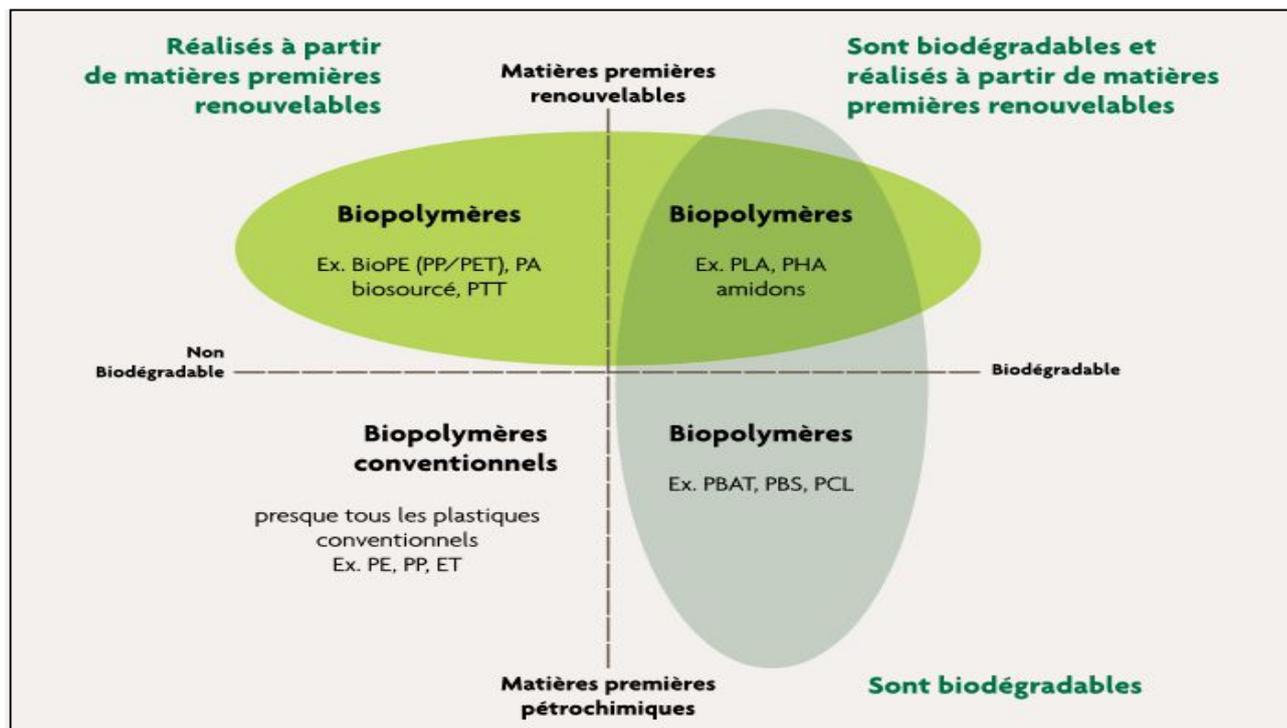


Figure 1-1: Matrice des bioplastiques (Preventpack 2012)

## 1.2. Bioplastique biodégradable

Les bioplastiques ont la propriété d'être biodégradables, c'est-à-dire que des micro-organismes peuvent les décomposer naturellement en matière organique, dans des conditions de température, d'humidité et d'oxygénation adéquates, le résultat de cette dégradation est la formation d'eau, de CO<sub>2</sub>, et/ou CH<sub>4</sub> et éventuellement, des sous-produits (résidus, nouvelle biomasse) non toxique pour l'environnement (Luckachan et Pillai, 2011; Castelan, 2010; Jarroux, 2010). Sans micro-organismes, un bioplastique ne sera donc pas dégradé ; un matériau biodégradable n'est donc pas un matériau à durée de vie limitée ; un point important à retenir est que le terme biodégradable est en lien avec la gestion de fin de vie du bioplastique.

Pour être qualifié de biodégradable, un plastique doit satisfaire aux normes de biodégradabilité, par exemple la norme ASTM D6400, de l'American Society for Testing and Materials (ASTM), aux États-Unis et au Canada et la norme EN13432 en Europe (Lunt, 2010).

- **Biodégradabilité normé**

La biodégradabilité des plastiques est définie par des standards et l'utilisation du terme est donc bien encadrée. Selon la norme ASTM D6400, un plastique biodégradable :

*‘‘Se dit d’un plastique dégradé dont la dégradation résulte de l’action de microorganismes naturellement présents dans le milieu tels que les bactéries, les mycètes ou les algues’’* (ASTM, 2012).

La norme NF EN 13432 (2000) définit les conditions des tests à réaliser et les critères d’évaluation (temps de dégradation, taux de matière dégradée, composition et toxicité des produits obtenus...) pour l’utilisation du terme ‘‘biodégradable’’. La masse de départ du matériau doit être dégradée à 90% ; les résidus doivent donc représenter au maximum 10% de la masse de départ du matériau testé. Le résultat de la biodégradation ne doit pas présenter d’effets écotoxiques sur le milieu.

Par ailleurs, selon la norme NFU 52-001, un matériau dit « biodégradable » doit être assimilable à au moins 90% par les micro-organismes en un temps donnée, le résultat ultime de cette assimilation étant la production de CO<sub>2</sub> d’eau et d’humus. Or au regard de cette définition, il apparaît que certains bioplastiques ne sont pas forcément biodégradables. Inversement, certains matériaux biodégradables ne sont pas forcément fabriqués à partir de ressources renouvelables, en effet Les conditions de tests pour évaluer la biodégradabilité d’un emballage sont différentes.

A noter que les matériaux d’emballage d’origine naturelle qui n’ont pas été modifiés par des méthodes chimiques, tels que le bois, l’amidon ou la pâte à papier sont considérés comme biodégradables sans être soumis à essai.

La biodégradation des bioplastique biodégradable se fait généralement en deux étapes soit, la détérioration du polymère (biofragmentation) puis la bioassimilation (minéralisation) (Krzan et autres, 2006),

- **Première étape : Dégradation primaire**

Cette étape correspond soit à une détérioration physicochimique du produit (mécanique, chimique ou thermique, telle que stress, lumière ou chaleur) ou à une biofragmentation du produit par des êtres vivants (vers de terre, bactéries, champignons, insectes). Le résultat de cette biofragmentation, soit le morcèlement, permet d’augmenter la surface qui sera en contact avec les microorganismes lors de la seconde étape (Luckachan et Pillai, 2011; Castelan, 2010; Krzan et autres, 2006).

- **seconde étape : bioassimilation minéralisation**

La bioassimilation, soit la digestion du matériau par les microorganismes et les enzymes, permet de transformer le polymère en métabolites qui sont assimilés par les microorganismes et enzymes, pour finalement être minéralisés. Le processus de minéralisation, nécessaire pour que soit complet le processus de biodégradation, résultera en molécules simples comme le  $\text{CO}_2$ , le  $\text{CH}_4$ , l' $\text{H}_2\text{O}$  et une nouvelle biomasse (Luckachan et Pillai, 2011; Castelan, 2010; Krzan et autres, 2006). Les tests de biodégradation utilisent la quantification des émissions produites pour confirmer le taux de dégradation, prouvant que le matériel entre dans un cycle du carbone et ne s'est pas tout simplement détérioré en particules microscopiques persistant dans l'environnement (Krzan et autres, 2006).

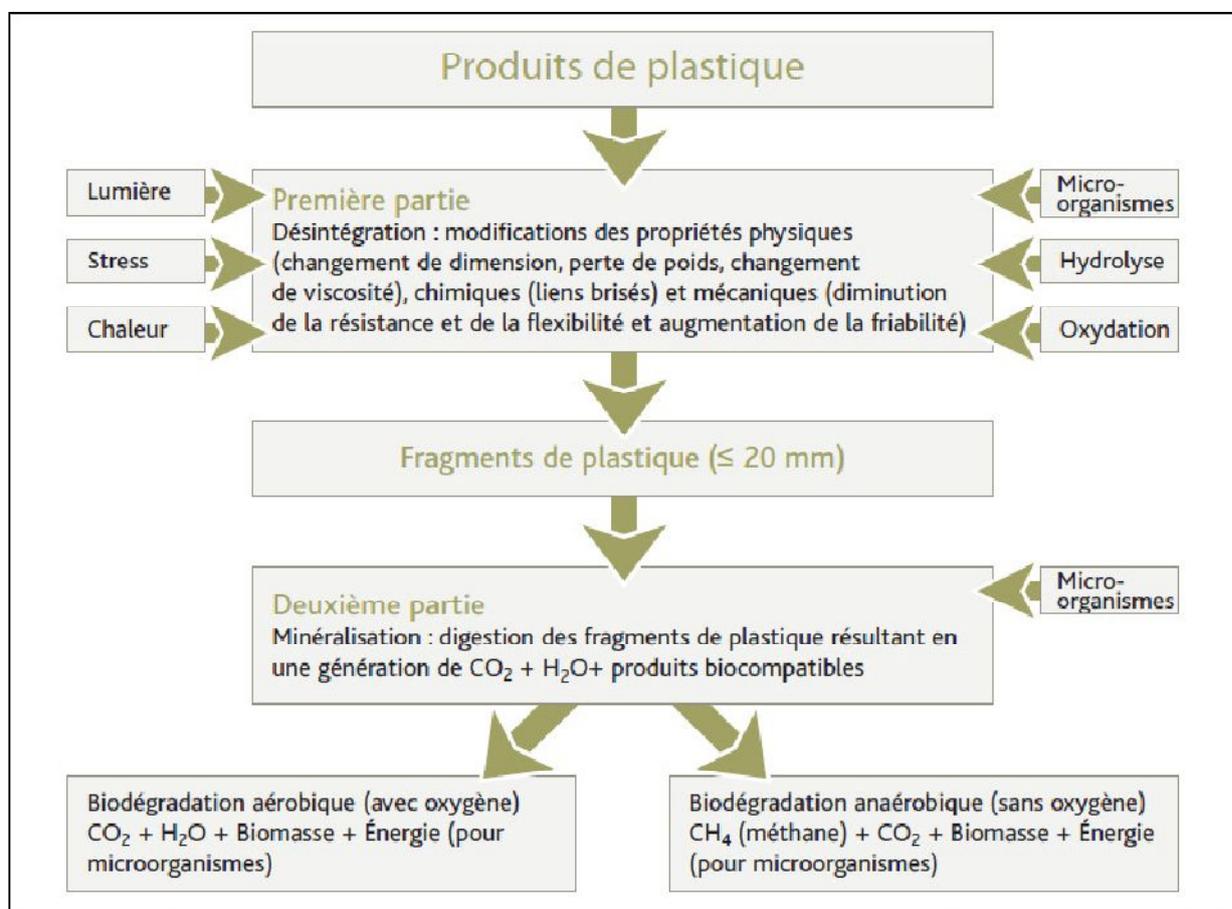


Figure 1-2 : Schéma simplifié du processus de biodégradation d'un bioplastique (Krzan et autres, 2006).

La biodégradation d'un bioplastique dépend de facteurs environnementaux spécifiques (température, humidité, oxygène, ph) et de la structure chimique même du polymère (Kale et autres, 2007). Sa dégradation biologique peut donc être excessivement lente si les conditions du milieu ne sont pas optimales. Les variables temps et environnement sont d'une importance

majeure et sont prises en considération lorsqu'on fait référence à la compostabilité qui est définie par la suite.

Cette dégradation des bioplastiques biodégradables est différente de celle qui s'applique aux plastiques de type « oxo-dégradables » ou « oxo-biodégradables » traité dans notre thème d'ingénierat. Ces produits sont des plastiques traditionnels auxquels on a ajouté des additifs qui contiennent des métaux de transition tel le cobalt, le manganèse ou le fer. Ces additifs provoquent la fragmentation des plastiques par oxydation chimique générant des résidus invisibles à l'œil nu (European Bioplastics, 2009). Mais Contrairement à ce phénomène d'« oxo-dégradation », la biodégradation ne laisse quant à elle aucun résidu et conduit à la disparation complète des fragments du matériau qui sont digérés par les microorganismes.

### 1.3. Bioplastiques compostables

Etant biodégradables, les bioplastiques sont aussi compostables, un emballage dit "compostable" s'il est susceptible d'être biodégradé en compost, dans certaines conditions (température, eau, oxygène...). Dans les installations industrielles afin de qualifier un matériau d'emballage compostable industriellement, la norme NF EN 13432 prévoit la réalisation de certains tests par comparaison avec un compost témoin. Cette norme permet d'évaluer la compostabilité d'un produit (et pas seulement d'un matériau) dans un procédé de compost selon 4 critères : biodégradabilité, caractérisation, tailles des particules, qualité (toxicité) (CNE, 2009).

Pour autant, il n'y a pas assez de normes encadrant la compostabilité. Or la ASTM D6400 a défini un « bioplastique compostable » comme suit :

*“Se dit d'un plastique qui subit une dégradation par un processus biologique pendant le compostage, produisant du CO<sub>2</sub>, inorganiques et de la biomasse à un rythme comparable à celui d'autres matières compostables connues, et ne générant aucun résidu toxique, visible ou reconnaissable”* (Recyc-Québec, 2005).

A ce jour, il n'existe pas de logos officiels pour informer le consommateur sur les emballages compostables. Les logos proposés émanent d'organismes certificateurs privés comme AIB-Vinçotte (Belgique) ou Din Certco (Allemagne). Pour pouvoir utiliser leurs logos, les fabricants d'emballages doivent être certifiés et répondre à un cahier des charges qui correspond à la norme NF EN 13432.

- ❖ La marque de conformité « OK Compost » est apposé sur des produits qui sont biodégradables dans des installations industrielles de compostage, Mais elle n'offre pas de garantie que ces emballages soient compostables à domicile.



- ❖ La version du label « OK Compost Home » a pour objet de signaler la biodégradabilité d'un matériau dans un procédé de compost domestique. Si le processus de compostage se déroule correctement, le matériau se décompose dans les 12 semaines.



Il faut rappeler que les termes “biodégradable” et “compostable” sont souvent confondus mais n'ont en réalité pas la même signification. Un produit biodégradable pourra être décomposé par des micro-organismes mais ne produira pas nécessairement un compost utilisable comme fertilisant agricole. Un produit biodégradable n'est donc pas forcément compostable. Par contre, un produit compostable est forcément biodégradable, où le facteur temps est pris en considération.

Finalement, tout comme le terme biodégradable, le terme compostable est en lien avec la gestion de fin de vie du bioplastique.

#### 1.4. les bioplastiques biosourcés

Contrairement aux termes biodégradable et compostable qui font référence à la gestion de fin de vie, le terme biosourcé est plutôt en lien avec l'origine de la ressource du bioplastique.

Les bioplastiques sont des matériaux biosourcés. Ils sont fabriqués, en partie ou en totalité, à partir de matières végétales telles que le blé, le maïs ou la pomme de terre. Autrement dit, un plastique biosourcé est un plastique dont la source de carbone nécessaire à sa fabrication est en grande partie ou en totalité renouvelable (Huneault, 2011).

La définition de « bioplastique biosourcé » qui englobe la majorité des emplois actuels du terme et qui est utilisée dans ce travail est : bioplastique issu entièrement ou en grande partie de ressources renouvelables.

Cette définition est similaire à celle de l'European Bioplastics qui associe le terme biosourcé à une proportion significative de carbone dans le bioplastique qui provient de ressources

renouvelables (European Bioplastics, s. d.). En d'autre terme, la norme ASTM définit un matériau biosourcé comme étant un matériau qui contient des composés carbonés dont le carbone provient de sources biologiques contemporaines (non-fossiles) (ASTM, 2004). Le US Department of Agriculture définit quant à lui les plastiques biosourcés comme des biens commerciaux ou industriels (autres que les denrées alimentaires et les aliments pour animaux) composés en tout ou en grande partie de produits biologiques, de produits forestiers ou de ressources agricoles intérieures et renouvelables, incluant les plantes, les animaux ou les produits marins (Álvarez-Chávez et autres., 2012).

Un plastique peut être biodégradable et non biosourcé, comme le polycaprolactone (PCL) ou, au contraire, peut être biosourcé, mais non biodégradable, tel le PE biosourcé (Vuillaume, 2011). Les deux notions ne sont pas mutuellement exclusives, un plastique peut être à la fois biodégradable et biosourcé, comme c'est le cas pour l'acide polylactique (PLA) ou les polyhydroxyalcanoate (PHA).

Un des arguments promotionnels reliés aux bioplastiques biosourcés est la maîtrise des émissions de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Contrairement au carbone fossile, le cycle du carbone « jeune » ou « contemporain » présent dans les bioplastiques biosourcés est court. Ce cycle est représenté par la figure 2.3. Le  $\text{CO}_2$  qui est libéré en fin de vie du bioplastique par incinération ou en se biodégradant correspond au  $\text{CO}_2$  qui a été absorbé par les végétaux dont ce biomatériau est issu (AIB Vinçotte, 2012d).

# *CHAPITRE 2*

*“LES BIOPLASTIQUES POUR  
LES EMBALLAGES  
ALIMENTAIRES”*

## 2. LES BIOPLASTIQUES POUR LES EMBALLAGES ALIMENTAIRES

Les ressources utilisées par les bioplastiques ont aussi pour objectif de répondre à la demande alimentaire. Les produits alimentaires proposés dans des emballages faciles à ouvrir et refermables sont extrêmement appréciés avec la récente hausse de la consommation et des prix des produits alimentaires, ce qui est un autre élément à mettre en perspective. En effet le bioplastique devient un nouvel actif stratégique, et les terres agricoles une source de grande valeur. Cette section du travail présente ce segment bien précis des bioplastiques qui fera par la suite l'objet de l'analyse critique.

### 2.1. Classification des bioplastiques

D'un point de vue technique, pratiquement tous les matériaux industriels fabriqués de ressources fossiles pourraient être remplacés par leurs contreparties biosourcées (Raschka et Carus, 2012).

Les biopolymères d'origine biologique peuvent être classés selon leurs compositions chimiques, leurs méthodes de synthèse, leurs procédés de fabrication, leurs importances économiques ou leurs applications (Smith, 2005). Une classification selon l'origine des ressources (renouvelables ou non renouvelables) et la gestion en fin de vie (biodégradable ou non biodégradable) est également proposée.

La classification par procédé de fabrication a plutôt été privilégiée dans ce travail afin de présenter et expliquer les différents types de bioplastiques. La figure ci-dessous représente les quatre groupes ainsi classifiés qui seront définis plus en détail par la suite :

- **Groupe 1** : Les bioplastiques naturels issus directement de la biomasse;
- **Groupe 2** : Les bioplastiques issus des microorganismes par fermentation microbienne;
- **Groupe 3** : Les bioplastiques obtenus par synthèse à partir de monomères renouvelables;
- **Groupe 4** : Les bioplastiques pétrochimiques biodégradables.

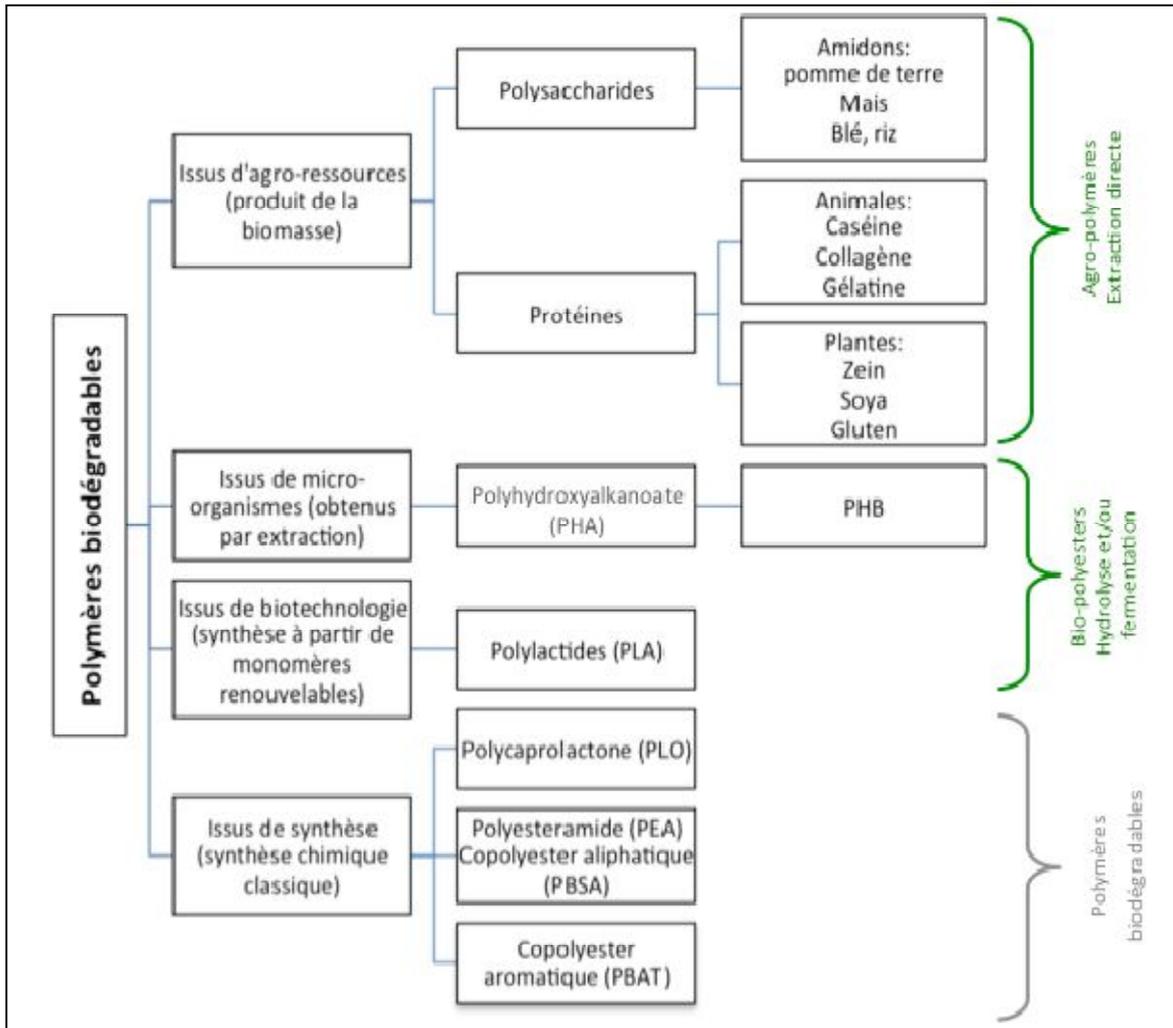


Figure 2-1 : classification des biopolymères biodégradables (de Jarroux, 2010, p.2; Avérous, 2004, p.235)

## 2.2. Exemples d’emballages alimentaires fabriqués avec des bioplastiques.

Les bioplastiques sont utilisés souvent au quotidien dans plusieurs applications notamment la fabrication des emballages alimentaires. Dans ce secteur les produits biodégradables sont utilisés comme matériaux afin de produire une gamme très diversifiée d’emballage, l’offre de ces bioplastiques est réellement aboutie pour de nombreuses applications : des bouteilles, des sacs, des boîtes, des contenants rigides et des plateaux...

Afin de répertorier des exemples représentatifs du marché actuel, certains des plus gros fournisseurs de bioplastiques sont présentés dans cette partie ainsi que des applications de leurs produits dans le domaine de l'emballage alimentaire.

Cette partie est rédigée dans le but de donner un aperçu des principaux groupes de bioplastiques et des nombreuses possibilités reliées à leurs utilisations pour l'emballage alimentaire.

### **2.2.1. Bioplastiques naturels issus directement de la biomasse**

Les bioplastiques de cette catégorie sont directement extraits de la matière organique d'origine végétale ou animale. La nature procure une très grande gamme de polymères (dont les polysaccharides (amidon, cellulose), le caoutchouc naturel, les polypeptides et les protéines, les alginates) qui peuvent être utilisés pour plusieurs applications. Ils peuvent par exemple être employés comme fibres, adhésifs, couchages, gels, mousses, films ou comme résines thermoplastiques et thermodurcissables (Yu, 2009).

#### **a) Polysaccharides**

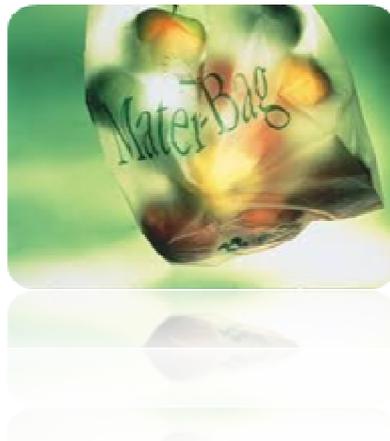
Les polysaccharides sont issus de trois sources principales, soit l'amidon, la cellulose et la chitine et une quatrième source qui reste peu exploitée, les alginates. Leurs caractéristiques principales sont les suivantes :

- L'amidon, peu coûteux, renouvelable, est aisé à obtenir et biodégradable, de plus il est le plus présent au niveau de l'emballage avec un marché de 22.2 % selon Smithers Pira (Pierce, 2011). Il provient des sources abondantes et diversifiées telles que le maïs, la pomme de terre, le blé, le riz et même la canne à sucre et les racines du manioc. L'amidon utilisé seul est hydrosoluble (à cause de sa forte affinité avec l'eau), difficile à travailler et cassant. Il doit donc être plastifié, utilisé avec d'autres matériaux ou modifié chimiquement.

L'amidon thermoplastique (TPS ou «ThermoPlastic starch») est un bioplastique ainsi plastifié avec des agents tels que l'eau, la glycérine ou le sorbitol. En présence de ces plastifiants, à des températures élevées et avec des forces de cisaillement, l'amidon fond et

se fluidifie ce qui rend son usage facile pour la fabrication des plastiques synthétiques. Ses principales limitations demeurent son affinité avec l'eau, ses faibles propriétés mécaniques et une variation importante de ses propriétés après fabrication (Yu, 2009).

Novamont est un important producteur de TPS dont la gamme de produits est appelée Mater-Bi. Les origines de cette compagnie italienne remonte à 1989 et sa capacité de production annuelle atteint les 60 000 tonnes de bioplastique compostable (Novamont, 2009e). La famille de produits Mater-Bi est variée et utilise comme matières premières de l'amidon, mais aussi des bioplastiques biodégradables provenant de ressources renouvelables ou d'origine fossile (Novamont, 2009d). Des films et des plateaux en bioplastique thermoformé, tels que ceux illustrés à la figure ci-après, sont des applications possibles pour l'emballage alimentaire.



**Figure 2-2 : Exemple des sacs de Mater-Bag (de Novamont, 2009d)**

Certains grades peuvent aussi être combinés au papier ou au carton pour former entre autres des gobelets ou des contenants alimentaires compostables (Novamont, 2009a). Finalement, certains grades sont aptes au compostage domestique et sont certifiés *OK Compost HOME* (Novamont, 2009b).

- Cellulose l'élément constitutif du bois et de la tige du maïs, est la substance la plus abondante de la surface de la Terre. Elle est utilisée dans la fabrication du papier. C'est un matériau peu coûteux semi-cristallin (Avérous, 2004). Les bioplastiques à base de cellulose sont aussi utilisés de manière importante pour l'emballage avec une part de marché de 9 % selon Smithers Pira (Pierce, 2011).

La compagnie Innovia Films fabrique par exemple des films à base de cellulose nommés NatureFlex provenant de pâte de bois (Innovia Films, 2012c). La compagnie emploie 1350 personnes à travers le monde et possède des sites de production au Royaume-Uni, aux États-Unis, en Belgique et en Australie (Innovia Films, 2012a). Ses bioplastiques NatureFlex proviennent de ressources renouvelables dans des proportions qui varient généralement entre 90 et 99% selon les grades (Innovia Films, 2012c). Ils sont également compostables dans des installations industrielles ou dans des unités de compostage domestique (Innovia Films, 2012b).



Figure 2-3 : Exemples d'application de NatureFlex. (de Innovia Films, 2012c)

## b) Les protéines

Les protéines sont des arrangements réguliers de différents acides aminés. Ce sont les constituants de la matière vivante animale, tels que la peau, les muscles, les cheveux (Jarroux, 2010). La plupart des protéines utilisées comme biopolymères le sont à l'état naturel, telles que la laine et la soie. Elles sont également issues des plantes oléagineuses (colza, tournesol, soya), des protéagineux (pois, fèves), du son de céréales (gluten) ou de tissus animaux (collagène, gélatine) ou de produits animaux (caséine) (Bewa, 2006). L'inconvénient principal de leur utilisation est leur sensibilité à l'humidité.

La caséine (protéine du lait), la gélatine, le gluten, la protéine de soja, la kératine, le collagène, la fibre de soie ou de laine sont des protéines employées comme biopolymères (Castelan, 2010; Jarroux, 2010). Le prix de revient des polymères issus de protéines est élevé.

Un laboratoire de recherche près de Lyon vient de mettre au point un nouveau polymère pour fabriquer du bioplastique (plastique entièrement biodégradable). Ce polymère, nommé LACTINOV, est constitué de granulés thermoplastiques à base de caséine, d'eau et d'autres additifs tels que les colorants. A partir de ce polymère, les chercheurs ont réussi à produire un film de plastique permettant de faire des emballages.



**Figure 2-4 : Exemple d'application du LACTINOV dans le domaine d'emballage alimentaire (article dans L'ESSOR de nov 2010)**

### 2.2.2 Bioplastiques issus des microorganismes par fermentation microbienne

Les polyesters naturels sont produits par de nombreuses variétés de bactéries, ils proviennent du mécanisme de survie de certains microorganismes qui les conservent et les accumulent comme source d'énergie et de carbone et sont sensibles à la dégradation par les microbes (Yu, 2009 ; Castelan, 2010). Ce groupe de bioplastiques est constitué de la famille des polyhydroxyalcanoates (PHA), dont le polyhydroxybutyrate (PHB) et le polyhydroxybutyrate-valérate (PHBV) qui sont les plus communs (Yezza, 2012a).

Ces réserves sont de microscopiques inclusions à l'intérieur des cellules. Des recherches ont démontré que les propriétés des PHBV sont parfois similaires à celles du polypropylène (PP) (Yu, 2009). Ses bonnes propriétés barrières aux gaz peuvent entre autres mener à des applications pour les emballages alimentaires.

Les bioplastiques issus des microorganismes n'occupent qu'une faible place dans le marché de l'emballage en ne représentant que 2.4 % des parts de marché selon Smithers Pira (Pierce, 2011).

Le PHA est produit directement par des microorganismes, qui l'accumulent dans leurs cellules ou biologiquement, par la fermentation bactérienne de biomasse (Avérous, 2004; Gross et Kalra, 2002). Un des grands fabricants de PHA est Metabolix, compagnie fondée en 1992 et dont le siège social est au Massachusetts (États-Unis), avec sa gamme de bioplastiques compostables Mirel (Metabolix, 2012a). Les ressources renouvelables nécessaires à leur production sont du sucre dérivé du maïs ou d'autres éléments de la biomasse comme des sucres lignocellulosiques provenant de cultures énergétiques (Metabolix, 2012c). Ses propriétés barrières seraient similaires au polypropylène (PP), sa résistance chimique serait similaire au polyéthylène téréphtalate (PET) et sa solidité dans l'ordre du polystyrène (PS) au PP ou mieux (Kelly, 2011). Des applications pour des emballages alimentaires thermoformés sont présentées à la figure II-5. La compagnie met également de l'avant les certifications obtenues pour certains grades pour un compostage domestique, dans l'eau et dans le sol.



**Figure 2-5 :** Applications pour des emballages alimentaires thermoformés avec les bioplastiques de *Metabolix*. (Tiré de Kelly, 2011, p. 19)

### 2.2.3 Bioplastiques obtenus par synthèse à partir de monomères renouvelables

Les polymères artificiels issus de l'agrochimie sont plutôt nombreux. Ces bioplastiques renouvelables peuvent être regroupés en deux sous-groupes. Les bioplastiques biodégradables comme l'acide polylactique (PLA) et les bioplastiques non biodégradables qui comprennent par exemple le polyéthylène biosourcé (BioPE).

1) **Le PLA** : Il est obtenu à partir de l'acide lactique, qui peut être obtenu de façon chimique ou biologique (fermentation de glucides comme le maïs, la canne à sucre ou de la betterave par lactobacilles) (Avérous, 2004). Il est le bioplastique le plus utilisé pour l'emballage. Selon Smithers Pira, il représente 42.5 % du marché (Pierce, 2011). Il est présent dans le domaine médical, pour lequel de nombreuses applications industrielles ont été développées (Castelan, 2010), dont l'emballage (pellicules, contenants thermoformés, bouteilles à courte durée de vie) (Gross et Kalra, 2002).

Bien que plusieurs sources de biomasse puissent être utilisées, le maïs a l'avantage de procurer le haut niveau de pureté d'acide lactique requis. Le PLA est donc un bioplastique biosourcé et il est biodégradable dans des installations industrielles ou municipales (Nature Works, 2012a).

Le potentiel de substitution du PLA aux plastiques traditionnels d'origine fossile tels que le polyéthylène (PE), le PP, le PS ou le PET est élevé dû à ses propriétés physiques et chimiques (Yezza, 2012a). Sa stabilité au niveau de la température et ses aptitudes de transformation sont similaires au PS tandis que sa résistance aux huiles et graisses ainsi que ses propriétés barrières aux saveurs sont comparables au PET (Kale *et autre.*, 2007). Le PLA est bien adapté à plusieurs des méthodes conventionnelles de transformation des produits thermoplastiques telles que l'extrusion et l'injection (Yu, 2009).

Lorsqu'il est mis aux rebuts, le PLA se dégrade par hydrolyse plutôt que par l'action microbienne. Même sous des conditions de haute humidité, il est peu fréquent que ce biopolymère soit contaminé par des moisissures ou autres microbes; il devient donc intéressant pour des applications alimentaires de longue durée et se traite à la chaleur sans trop de modifications à l'équipement de fabrication (Gross et Kalra, 2002). Il se composte dans des conditions

spécifiques, soit à plus de 50 °C dans un milieu humide (Avérous, 2004), idéalement dans des installations municipales (Gross et Kalra, 2002).

NatureWorks est un fabricant majeur de PLA qui utilise le maïs comme matière première. Son usine de fabrication est située au Nebraska, aux États-Unis, et sa capacité de production est de 140 000 tonnes métriques de bioplastique appelé Ingeo (NatureWorks, 2012a). Le lactide est le monomère qui provient de l'acide lactique qui est utilisé pour produire le matériau. Les monomères s'unissent par polymérisation pour former le PLA (NatureWorks, 2012d). Il y a de nombreuses applications au niveau de l'emballage alimentaire pour ce bioplastique, dont des bouteilles et des contenants de toutes sortes. Le couchage du PLA sur du carton permet également la fabrication de boîtes pliantes qui sont compostables et particulièrement utiles pour des applications où l'emballage est souillé par les aliments. L'ensemble produit/contenant peut ainsi être composté dans des installations industrielles ou municipales sans tri préalable.



**Figure 2-6:** Exemple d'application du PLA dans le domaine d'emballage alimentaire par NatureWorks

2) **Le BioPE** : est composé de bioplastiques biosourcés mais non biodégradables (Preventpack, 2012). le polypropylène biosourcé (BioPP) ainsi que le polyéthylène téréphtalate biosourcé (BioPET) sont des exemples du même sous-groupe de bioplastique. L'utilisation de ces bioplastiques est donc marginale mais est en pleine expansion.

De gros joueurs dans l'industrie de l'alimentation ont annoncé leur intention ou utilisent déjà ces bioplastiques biosourcés et non biodégradables. Le produit de Coca-Cola appelé PlantBottle est un

exemple de ce type de matériaux déjà commercialisés et provenant de ressources renouvelables. Le procédé de fabrication convertit la canne à sucre en monoéthylène glycol (MEG) qui est utilisé dans une proportion qui va jusqu'à 30 % du poids de la bouteille. Le bioplastique ainsi obtenu est du PET biosourcé qui a les mêmes caractéristiques et qui est recyclable tout comme les bouteilles en PET à 100 % d'origine fossile (The Coca-Cola, 2012a).

Pepsi a également annoncé dernièrement la mise au point d'une bouteille en PET biosourcé entièrement fabriquée à partir de ressources renouvelables. Danone au Canada annonçait aussi en 2011 l'utilisation de polyéthylène haute densité (HDPE) fabriqué entièrement à partir de la canne à sucre pour tous ses contenants de yaourt à boire (DanActive, Danacol, Danino Go et Activia).

Braskem, qui est le plus important producteur de résine en Amérique, est un fabricant important de BioPE nommé GreenPE (Braskem, 2011d). Le procédé de fabrication utilise la canne à sucre pour produire du bioéthanol qui est ensuite converti en bioéthane et finalement en BioPE (Yezza, 2012a). Le BioPE a les mêmes propriétés et est recyclable tout comme son pendant d'origine fossile (*ibid.*). Le HDPE et le polyéthylène à basse densité linéaire (LLDPE) biosourcés de Braskem, qui entrent tous les deux dans la gamme du GreenPE, ont obtenu la certification *OK biobased* d'AIB Vinçotte (Braskem, 2011c). Rappelons que cette certification n'est pas pour la biodégradabilité et que le Green PE de Braskem ne se biodégrade pas. C'est une certification accordée pour l'utilisation de ressources renouvelables. La compagnie va produire sous peu du BioPP fabriqué également à partir de la canne à sucre (Braskem, 2011a). Le fabricant a plusieurs clients d'importance, dont Danone et Coca-Cola, qui ont été mentionnés précédemment et qui utilisent des bioplastiques biosourcés (Braskem, 2011b).



Figure 2-7 : Exemple de bioplastique GREEN PE de Braskem.

#### 2.2.4 Bioplastiques pétrochimiques biodégradables

Les bioplastiques de cette catégorie sont fabriqués à partir d'origine fossile. Ils ne proviennent donc pas de ressources renouvelables mais sont biodégradables. On peut classer ces bioplastiques en trois groupes : les polycaprolactones (PCL), les polyesteramides (PEA) et différents copolyesters aromatiques ou aliphatiques (Avérous, 2007).

Les copolyesters aromatiques et aliphatiques représentent 6.7 % du marché de l'emballage selon Smithers Pira (Pierce, 2011). Il existe de nombreux polyesters produits par les industries, par l'entremise de fermentation, conversion microbologique et condensation à haute température. Ces polyesters ont diverses applications, comme la confection de vêtements, de tapis, de composants qui doivent être résistants à l'usure, aux taches et faciles à laver (Jarroux, 2010).

L'*Ecoflex* produit par BASF, une immense compagnie du secteur chimique qui possède 370 unités de production à travers le monde, entre dans cette catégorie (BASF, 2012). C'est un copolyester biodégradable qui convient particulièrement bien à la fabrication de pellicules pour des secteurs comme l'emballage (BASF, 2010). Il peut également être couché sur du papier et parmi les applications citées par la compagnie, on retrouve des contenants à repas-minute, des gobelets et l'emballage d'aliments congelés ou de fruits et légumes.

Les propriétés de l'*Écoflex* sont souvent favorables au LDPE. Selon le fabricant, la résistance à la traction et la résistance à la déchirure sont plus élevées que les valeurs de référence du LDPE. La perméabilité à l'oxygène est deux fois moins élevée que le LDPE mais la perméabilité à la vapeur d'eau est en revanche plus élevée que ce dernier (BASF, 2010). Contrairement à la majorité des catégories de polyester, le séchage préalable de l'*Ecoflex* est inutile avant son utilisation sur une ligne de production, car sa stabilité à l'hydrolyse est adéquate aux températures normales de traitement.



**Figure 2-8 :** *Emballages de fruits et légumes avec l'Écoflex de BASF. (Tiré de BASF, 2010, p)*

### 2.3 Innovation

Une des critiques souvent formulées à l'endroit des bioplastiques biosourcés est l'utilisation de cultures destinées à l'alimentation humaine et animale. Plusieurs recherches sont effectuées présentement afin de trouver des solutions de remplacement et un grand nombre de fabricants ont des stratégies en ce sens dont Cereplast, qui est une compagnie américaine productrice de bioplastiques biosourcés. Ses résines sont produites à base d'amidon de maïs, de blé, de tapioca et de pommes de terre venant principalement de la région du Midwest des États-Unis (Cereplast, 2012a). Cereplast produit maintenant des bioplastiques à base d'algues qui sont conçus pour remplacer jusqu'à 50 % ou plus de la teneur en pétrole utilisé dans les résines en plastique traditionnel (Cereplast, 2012b). NatureWorks planifie également d'utiliser des matières cellulosiques, des matières résiduelles provenant de l'agriculture et des plantes non destinées à l'alimentation comme ressources renouvelables (NatureWorks, 2012e). Par ailleurs, plusieurs

compagnies explorent aussi la possibilité de développer des bioplastiques à l'aide de dioxyde de carbone (Pierce, 2011). Cette tendance à chercher des solutions de rechange aux cultures destinées à l'alimentation devrait demeurer au cours des prochaines années (Laird, 2011b).

Des recherches qui captent aussi l'attention sont celles concernant les matériaux nanocomposites. L'un des axes de développement est relié à la perméabilité aux gaz qui est souvent le point faible des bioplastiques pour l'emballage d'aliments frais (Laird, 2012b).

Des chercheurs norvégiens travaillent actuellement à la fabrication d'une barrière appelée cellulose microfibrillée créée à partir de plantes. Cette barrière est fabriquée à l'aide de fibres qui ont un diamètre de 100 nanomètres mais qui sont extrêmement longues. Elles viendraient renforcer les bioplastiques tout en diminuant leur perméabilité à certains gaz dont l'oxygène, augmentant leur intérêt pour l'emballage alimentaire. Ce projet de recherche appelé NanoBarrier durera 4 ans et représente seulement une des nombreuses pistes présentement explorées afin d'améliorer les propriétés des bioplastiques.

L'intégration et le mélange de différents éléments aux bioplastiques existants sont aussi des options envisagées. Par exemple, l'incorporation d'argile au PLA afin d'améliorer ses propriétés thermomécaniques est l'un des axes de recherche du Centre de Technologie Minérale et de Plasturgie de Theford Mines (Vuillaume, 2011).

# *CHAPITRE 3*

*‘LES POLYMERES, BIOPOLYMERES  
ET LEURS IMPACTS SUR  
L'ENVIRONNEMENT’*

### 3. LES POLYMERES, BIOPOLYMERES ET LEURS IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

L'ubiquité des plastiques dans la vie quotidienne a un impact important sur l'environnement : sa présence autant que matières résiduelles responsables d'une génération de GES supplémentaires suite à leur transport vers un lieu d'enfouissement.

L'enfouissement et le recyclage ne tiennent pas compte d'un troisième lieu ultime pour ces résidus, l'environnement urbain et naturel. Ainsi, lorsque des contenants appropriés pour les matières résiduelles ne sont pas à la portée du consommateur, ils sont disposés aisément dans la nature. Ces polymères, choisis pour leur durabilité, perdurent dans l'environnement selon leurs caractéristiques ainsi que l'environnement dans lequel ils sont abandonnés.

Selon Moore (2008), un total de 267 espèces d'organismes marins, au niveau planétaire, est affecté par des débris de plastique, un nombre qui augmentera au fur et à mesure que seront évaluées des espèces de plus petite taille. Il a été démontré que les polymères se fragmentent dans l'environnement et sont ingérés par la faune (Barnes et autres, 2009). Les tortues de mer, 26 espèces de cétacés et presque la moitié de toutes les espèces d'oiseaux de mer ingèreraient ou s'enchevêtreraient dans des déchets de plastique (Moore, 2008). Selon une revue faite par Todd et autres (2010), les mammifères marins, les tortues, les oiseaux de mer et les crustacés seraient particulièrement affectés par les déchets plastiques marins.

Les problématiques moins reconnues sont les risques encourus par les transports marins, les pêcheries et autres activités maritimes. Les espèces envahissantes, transportées par des débris de plastique flottant ou coulant au fond malgré leur flottabilité, représentent également une problématique importante reliée à la pollution des polymères dans les océans; ces espèces pourraient mettre en péril des espèces endémiques dans les environnements côtiers.

### 3.1 Avantages et inconvénients liés à l'utilisation des polymères fragmentables

L'utilisation de biopolymères permet de réintroduire les polymères dans le cycle du carbone; les ressources fossiles sont également renouvelables, mais à raison d'un cycle de millions d'années. Le taux de consommation des ressources fossiles étant plus rapide que leur renouvellement, le cycle du carbone est déséquilibré dans notre consommation fossile. En comparaison, les biopolymères, fabriqués à partir de maïs et d'amidon, peuvent être reconvertis en biomasse presque aussi rapidement (Kijchavengkul et Auras, 2008).

L'impact visuel des déchets sauvages risque peu d'être réduit avec l'utilisation de biopolymères, puisque les déchets sauvages qui se retrouvent dans les arbres ou sur le béton ne sont pas exposés à un niveau suffisant d'organismes microbiologiques pour s'y décomposer. Cette problématique risque même de s'accroître si les consommateurs croient que les biopolymères (ou polymères biofragmentables) vont disparaître rapidement dans l'environnement (Environment Australia, 2002).

Les émissions de GES de l'industrie pétrochimique peuvent être réduites; selon plusieurs analyses, les technologies visant la production de biopolymères consommeraient moins d'énergie, permettant de réduire les émissions de GES qui y sont associées en comparaison aux équivalents issus de la pétrochimie. Les technologies de fabrication des polymères ainsi que des biopolymères devraient s'optimiser; les nouvelles méthodes d'exploitation pétrochimique (sables bitumineux, exploration en haute mer, exploration arctique) auront toutefois un défi de taille à relever pour atteindre la même efficacité que les biopolymères (Jong et autres, 2012).

En contrepartie, les biopolymères émettent des biogaz lorsqu'ils sont enfouis et peuvent contribuer aux émissions de GES. Le biogaz récupéré pour la cogénération d'énergie et de chaleur représente une source d'énergie renouvelable, puisque son contenu en carbone provient d'une absorption dans l'atmosphère. Lorsque ces biogaz ne sont pas récupérés, une émission supplémentaire de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> en résulte (Environment Australia, 2002).

Bien que les biopolymères biodégradables soient conçus dans un esprit de compostage en fin de vie, leur utilisation permettrait l'augmentation théorique de la capacité des sites d'enfouissement, en se décomposant dans une période relativement courte et en libérant d'autres matériaux tels que les aliments pour la dégradation (Environment Australia, 2002). Leur utilisation dans l'industrie alimentaire permet, pour sa part, de faciliter la valorisation par différentes méthodes de recyclage (dont le compostage ou la biométhanisation) sans avoir à investir dans des activités coûteuses de tri des matières, pour lesquelles peu d'industriels sont enclins à investir; pour un compost (ou un digestat) de qualité, un tri doit tout de même être effectué afin de ne conserver que les matières réellement putrescibles. Au Québec, l'enfouissement de matières putrescibles doit cesser d'ici 2020. L'utilisation de matériel biodégradable représente donc une mesure incitative supplémentaire pour faciliter et améliorer la gestion des matières putrescibles, le produit final pouvant être utilisé comme substrat.

### **3.2 Problématiques environnementales liées aux biopolymères**

La biodégradabilité des biopolymères est avantageuse dans l'optique où des installations sont disponibles pour composter ces matériaux. S'ils doivent être transportés dans un site de compostage distant, la quantité de ressources fossiles requises pour leur transport et les émissions de GES associées pourraient annuler le bénéfice relié à leur utilisation.

Les biopolymères présentent plusieurs perfectionnements quant à leur production, les rendant plus durables en comparaison aux polymères issus de la pétrochimie, dont les améliorations exposées dans le tableau 3.1.

**Tableau 3-1 : Améliorations durables des biopolymères comparativement aux polymères issus de la pétrochimie (Alvarez-Chavez et autres, 2012, p.50)**

Biopolymère	Amélioration durable
PHA	Fortement dégradable
PLA	Production requiert de 30 à 50 % moins d'énergie fossile et génère de 50 à 70% moins de CO <sub>2</sub> . Utilisation comparable de l'eau avec les meilleurs PIP, recyclable, compostable à une température supérieure à 60°C.
Amidon thermoplastique	Production requiert 68% moins d'énergie que son homologue PIP. Emission de CO <sub>2</sub> plus faibles que les PIP. Biodégradable et compostable.
Bio-uréthane	Production requiert 23 à moins d'énergie et 36% moins de GES comparativement aux PIP.
Cellulose et lignine	La dégradation biologique de lignine est un peu plus faible que celle de la cellulose. Compostable.
Zéine de maïs et protéine de soya	Biodégradable et compostable.

Légende : PIP : Polymère issu de la pétrochimie

Il n'en demeure pas moins que des problématiques environnementales importantes sont également reliées à leur fabrication, telles que décrites dans le tableau III-2.

**Tableau 3-2 : Risques environnementaux reliés aux biopolymères (inspiré de : Alvarez-Chavez et autres, 2012, p.50)**

Impact environnementale	Biopolymères						
	PHA	PLA	ATP	Biouréthane	Cellulose et lignine	Zéine de maïs et protéine de soya	Nano-biocomposites (cellulose et lignine)
Matière première issus des méthodes agricoles, industrielles, incluant OGM.	√	√	√		√	√	
Les données sur la consommation énergétiques sont controversés	√						
Utilisation de 11—octanol (écotoxique) et étain organique (accumulation dans les microorganismes)		√					
Besoin en énergie et en eau élevés pour fabrication.				√			√
Moins de 5% issus de matière renouvelable lors de la fermentation du glucose					√		

### 3.3 Performance environnementale des emballages alimentaires en bioplastique

L'analyse environnementale du cycle de vie nommée plus simplement ACV dans la suite du texte est un moyen efficace pour évaluer la performance environnementale d'un produit.

Le présent chapitre a pour objectif de démontrer toute la complexité derrière l'évaluation des impacts environnementaux potentiels des emballages alimentaires sur l'ensemble de leur cycle de vie.

#### 3.3.1 La performance environnementale par l'analyse du cycle de vie

L'ACV permet d'évaluer les performances environnementales d'un produit ou d'un procédé à partir de l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie (Quantis, 2011).

L'évaluation des impacts environnementaux potentiels est donc effectuée sur tout le cycle de vie du produit qui est illustré à la figure ci-dessous et diffère de l'approche traditionnelle qui ne prenait en considération que les activités de l'entreprise (Ellipso, 2007). Il faut spécifier qu'il s'agit d'impacts potentiels du fait que leurs conséquences réelles dépendent fortement des caractéristiques du milieu récepteur et des effets de synergie ou d'antagonisme entre les polluants (ADEME, 2005).

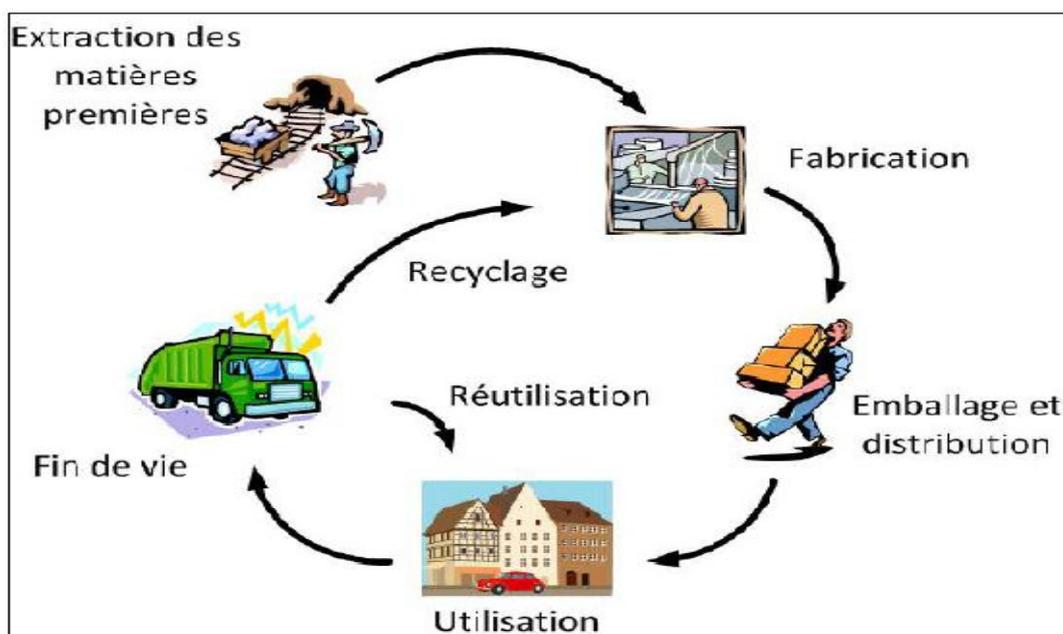


Figure 3-1: Portée de l'analyse du cycle de vie. (Tiré de Gagnon, 2010, p. 40)

L'ACV fait partie des outils utilisés au niveau de la gestion du cycle de vie qui est un concept beaucoup plus large et qui vise à minimiser le fardeau environnemental et socioéconomique d'un produit ou d'une gamme de produits (Gagnon, 2010). Parmi les autres techniques employées dans une démarche de gestion du cycle de vie, on retrouve entre autres l'analyse des coûts sur le cycle de vie (ACCV) et l'analyse sociale du cycle de vie (ASCV) (Gagnon, 2010) (Ellipsos, 2007). Comparativement à ces deux dernières, l'analyse environnementale du cycle de vie ou plus simplement l'ACV est la méthode la plus connue (Gagnon, 2010). Elle est internationalement reconnue et encadrée par les normes 14040 et les suivantes de l'Organisation Internationale de normalisation (ISO) (Quantis, 2011). La norme ISO 14040 : 2006 définit par exemple les quatre étapes à suivre lors d'une ACV qui sont : la définition des objectifs et du champ de l'étude, l'analyse de l'inventaire, l'évaluation des impacts et l'interprétation des résultats (Gagnon, 2010). Éviter ou mieux comprendre les transferts de pollution entre les différentes options étudiées est l'un des avantages de l'ACV, car elle donne un portrait global sur tout le cycle de vie (ADEME, 2005). Par exemple, un changement de matériau visant à diminuer l'utilisation de ressources non renouvelables lors de la production pourrait causer la pollution de l'eau lors de l'élimination du produit. Les nombreuses applications de l'ACV sont présentées au tableau III-3 ainsi que des exemples concrets dans le domaine de l'emballage alimentaire.

**Tableau 3-3 : Applications de l'analyse du cycle de vie.**

APPLICATIONS DE L'ACV (Gagnon, 2010)	EXEMPLES DANS LE DOMAINE DE L'EMBALLAGE ALIMENTAIRE
Aide à la décision pour un choix de procédé.	Favoriser le recyclage ou le compostage du PLA ?
Aide à la décision pour l'optimisation de procédés existants après l'identification des points faibles.	Optimisation de la consommation d'eau pour la production de granules de résines PLA.
Décision sur la conception de produits ou services nouveaux.	Eco conception des emballages alimentaires.
Décision sur l'organisation des opérations.	Choi des modes de transport pour la distribution des emballages.
Décision sur l'efficacité d'une réglementation.	Interdiction des sacs en plastique d'origine fossile à usage unique ou non ?
Décision sur l'orientation d'une politique publique.	Subventions aux bioplastiques biosourcés ou plutôt aux bioplastiques compostables ?

Plusieurs études d'ACV portant sur différents types d'emballages alimentaires sont recensées dans la littérature mais il est souvent difficile de les comparer car les systèmes à l'étude varient. Le choix du cadre de l'analyse, de la définition des frontières du système, de l'unité fonctionnelle, du contexte géographique et industriel ainsi que le choix de la méthode d'évaluation des impacts sont parmi les différences qui compliquent les comparaisons des résultats.

### **3.3.2 Deux exemples d'ACV traitant des emballages alimentaires à base de bioplastique**

Les deux études d'ACV présentées dans ce chapitre comparent des emballages alimentaires conçus en bioplastique avec certains autres fabriqués à partir de matériels recyclés ou conçus avec des plastiques traditionnels d'origine fossile. Une analyse des résultats des deux ACV ainsi que les principaux points à considérer lors de l'interprétation des conclusions de telles études sont finalement présentés dans la section III.2.3.

#### **3.3.2.1 PLA Ingeo de NatureWorks comparé au PET pour des contenants alimentaires**

L'ACV présentée dans cette section a été effectuée par *l'Institute for Energy and Environmental Research* (IFEU), centre d'excellence indépendant dans le domaine de l'environnement qui a plus de 30 années d'expérience (IFEU, 2012).

L'ACV réalisée en 2009 a été demandée par le fabricant de bioplastiques NatureWorks. L'étude est en fait un complément à une ACV plus ancienne qui date de juillet 2006 et qui a également été effectuée par l'IFEU. Des contenants conçus avec du PLA Ingeo de NatureWorks, comme celui illustré à la figure . . . ., étaient comparés avec des emballages en plastique d'origine fossile, plus spécifiquement le polypropylène (PP), le polystyrène (PS) et le polyéthylène téréphtalate (PET) (Krüger *et autres.*, 2009).



**Figure 3-2** *Emballage étudié lors de l'ACV comparant le PLA de NatureWorks. (Tiré de Detzel et Krüger, 2006, p. 2)*

En 2009, l'objectif de l'étude est plutôt de comparer la performance environnementale du même type d'emballage en PLA, mais cette fois-ci, avec des contenants de PET vierge et recyclé (Krüger *et autres*, 2009).

Ces emballages servant à contenir des aliments froids, par exemple de la salade pour emporter, et disponibles aux consommateurs aux points de vente. L'étude est applicable pour des contenants de dimensions similaires.

Parmi les cas étudiés les poids des emballages suivants le font partie: 15 et 19.9 g pour le PLA et 19.9 g pour le PET. Le contenant de 15 g de PLA est considéré comme comparable au contenant de 19.9 g de PET car la rigidité du PLA est plus élevée et sa densité plus faible.

Les catégories d'impacts environnementaux qui ont été évaluées : les ressources d'origine fossile, le changement climatique, le smog estival (pollution photochimique), l'acidification, l'eutrophisation aquatique, l'eutrophisation terrestre, la toxicité humaine associée aux effets cancérigènes, la toxicité humaine associée aux particules fines, l'utilisation des terres et la consommation d'énergie renouvelable et non renouvelable (Krüger *et autres.*, 2009).

Les résultats globaux de l'ACV montrent que pour certaines catégories d'impacts environnementaux, les emballages en bioplastique (PLA) sont plus performants par rapport aux contenants en PET tandis que parfois, c'est l'inverse. Par exemple, les emballages en PLA contribuent moins aux changements climatiques car sa participation à l'émission de CO<sub>2</sub> est moins élevée que tous les contenants en PET étudiés.

Par contre, l'ACV ne favorise pas le PLA en ce qui concerne l'eutrophisation aquatique, car pour tous les scénarios, les impacts environnementaux sont plus élevés que les emballages en PET.

En résumé, le tableau III-4 compare les performances environnementales des emballages en bioplastique versus les emballages en plastique traditionnel. Seulement leur meilleure option respective a été retenue, c'est-à-dire l'emballage de 15 g de PLA fabriqué avec la nouvelle technologie de fermentation et l'emballage de 19.9 g de PET entièrement recyclé (Krüger *et autres.*, 2009).

**Tableau 3-4 : Comparaison de la performance environnementale du PLA versus le PET.**

Indicateurs environnementaux pour lesquels le type de matériaux a obtenu la meilleure performance environnementale	
<b>BIOPLASTIQUE : PLA</b> Scénario : emballage de 15g et nouvelle technologie de fermentation.	<b>PLASTIQUE D'ORIGINE FOSSILE : PET</b> Scénario : emballage de 19.9 g et recyclé à 100%
Utilisation de ressources d'origine fossile	Acidification
Changement climatique	Eutrophisation aquatique
Smog estival	Eutrophisation terrestre
Toxicité humaine associé aux effets cancérigènes	Toxicité humaine associé aux effets particules fines
La consommation d'énergie non renouvelable	

### 3.3.2.2 Comparaison de différentes barquettes fabriquées par Cascades

L'ACV présentée ci-dessous a été réalisée par le Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG), qui est un centre d'expertise en cycle de vie basé à Polytechnique Montréal. Établi depuis 2001, le CIRAIG est reconnu mondialement pour ses travaux et initiatives bâtis sur de solides assises scientifiques et ses dix années d'expérience appliquée (CIRAIG, 2012).

C'est une ACV qui date de 2011. Cascades a mandaté le CIRAIG pour effectuer une analyse comparative du cycle de vie de différents contenants pour l'emballage alimentaire (Cascades, 2011a). Les barquettes fabriquées avec les sept matériaux pris en considération, sont

présentées à la figure.... Elles sont toutes fabriquées par Cascades, Groupe Produits Spécialisés (CIRAIG, 2012).

Les objectifs de l'étude sont (CIRAIG, 2011) :

- Comparer les profils environnementaux des cycles de vie des différentes options d'emballage à l'étude;
- Déterminer les paramètres environnementaux clés dans le cycle de vie des options étudiées;
- Comparer les systèmes afin d'établir ceux qui génèrent les impacts environnementaux les plus faibles.

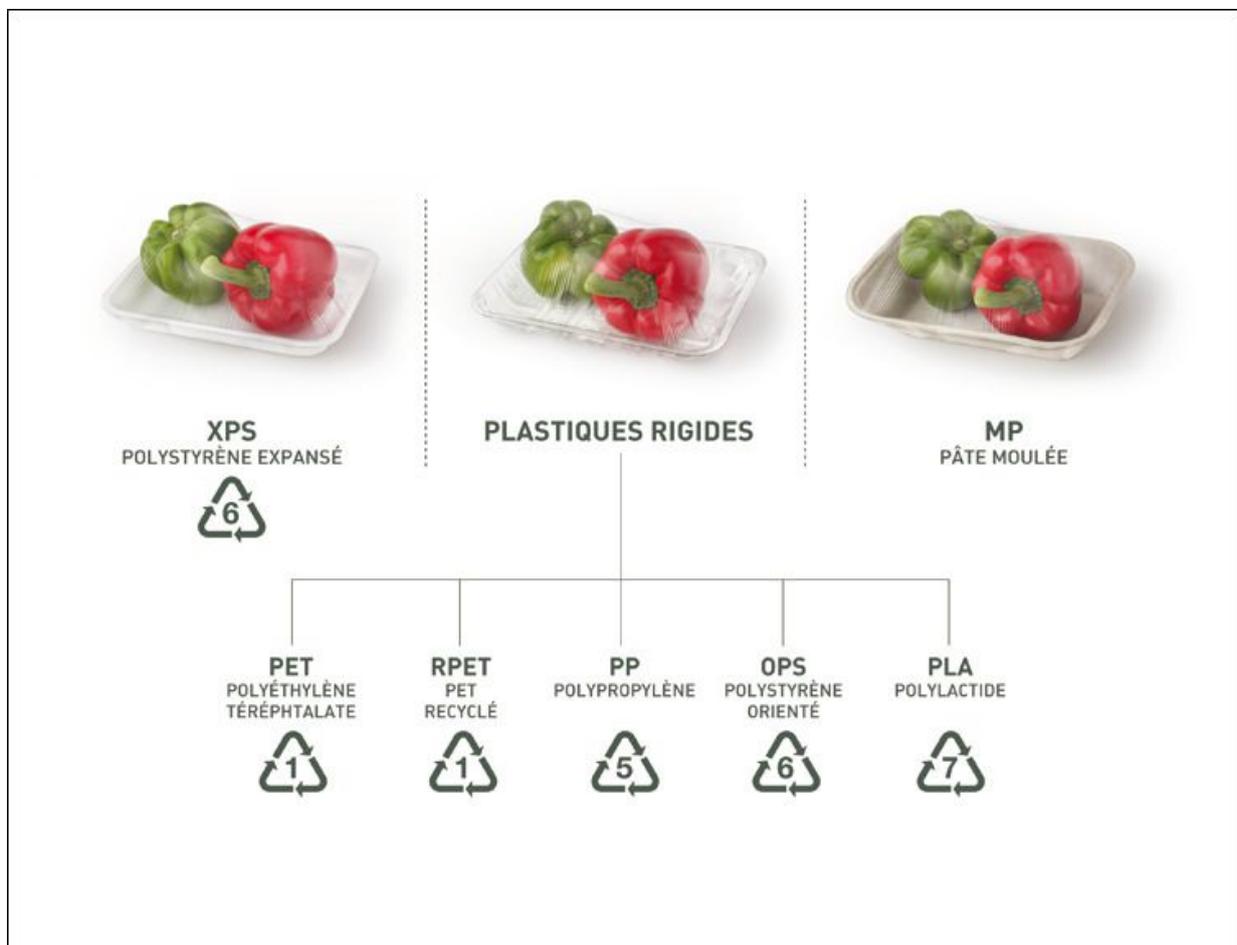


Figure 3-3 Barquettes étudiées lors de l'ACV des produits de Cascades. (Tiré de Cascades, 2011b, p. 3)

Les résultats clés relatifs à l'ACV et pour les contenants et les procédés de fabrication spécifiques à Cascades sont les suivants (Cascades, 2011a) :

- La pâte moulée (MP) et le polystyrène expansé (XPS) sont les choix avec l'impact environnemental le plus faible;
- Les étapes de production des matières premières et de fabrication sont celles contribuant le plus aux impacts;
- L'emplacement choisi pour la fabrication a un impact significatif dû aux différences dans la distribution énergétique (l'hydroélectricité ayant significativement moins d'impact environnemental que l'électricité produite à partir de la combustion d'huile ou de charbon);
- La fin de vie a très peu d'impacts dans le cycle de vie total;
- Dans le contexte de cette étude, le PLA s'avère le pire choix environnemental.

### 3.3.3 Analyse et interprétation des résultats

Les résultats des deux ACV présentées ci-dessus sont intéressants à plusieurs égards et certaines similitudes sont notables. Les processus qui génèrent le plus d'impacts pour la presque totalité des indicateurs sont les étapes de production des matières premières et de fabrication des contenants. La revue de la littérature incluse dans les lignes directrices sur les ACV rédigées par Quantis fait état du même constat : « *l'étape de production et de mise en forme des contenants apparaît généralement comme l'étape ayant la contribution la plus importante pour la majorité des catégories d'impact* » (Quantis, 2011, p. 36). Les poids des contenants sont donc primordiaux et influenceront grandement les performances environnementales résultantes. Les deux études confirment cette tendance, car pour le PLA de NatureWorks, une réduction d'environ 25 % du poids du contenant réduit d'autant les impacts environnementaux pour tous les indicateurs (Krüger *et autres.*, 2009). Il en va de même pour l'ACV du CIRAIG réalisée pour Cascades, car pour plusieurs des indicateurs, les impacts environnementaux les moins élevés sont associés au contenant le moins lourd fabriqué avec du polystyrène expansé (Cascades, 2011b).

Plusieurs différences sont par contre notables entre les deux études. Le point majeur distingue les deux études à trait aux performances environnementales des emballages en bioplastique (PLA). L'étude du CIRAIG pour les produits de Cascades identifie le PLA comme le pire choix environnemental, car comparativement aux autres matériaux, les impacts environnementaux potentiels sont les plus élevés pour cinq catégories d'indicateurs sur six. Au niveau de l'étude de l'IFEU sur le PLA de NatureWorks, les performances

environnementales entre les emballages en PLA et PET sont beaucoup plus partagées. Ces résultats de l'IFEU démontrent qu'il est généralement difficile de comparer différentes options ou produits entre eux. Un produit peut démontrer des avantages sur quelques impacts potentiels et des désavantages sur certains autres (ADEME, 2005). L'IFEU indique d'ailleurs que la préférence entre l'un ou l'autre des matériaux pour les emballages dépendra du jugement personnel et individuel porté sur les différents indicateurs (Krüger *et autres.*, 2009).

Finalement, ce chapitre démontre toute la complexité reliée à non seulement la réalisation d'une ACV, mais aussi à l'analyse et à l'interprétation des résultats. Malgré l'existence de standards ISO, le degré de liberté relié à l'élaboration d'une ACV demeure important (European Bioplastics, 2008). En bref, c'est une excellente méthode d'analyse et d'optimisation pour les fabricants, mais elle ne devrait pas être utilisée comme outil de marketing, trop de variables entrent en ligne de compte.

Puisque l'ACV prend en considération tout le cycle de vie, les résultats de l'étude ne seront applicables qu'aux produits ou procédés qui ont été analysés. Par exemple, le type de matières premières, la technologie de fabrication, les modes de transport, l'unité fonctionnelle choisie et les traitements en fin de vie sont quelques exemples des particularités uniques au système étudié. Les généralisations sur la meilleure performance environnementale d'un groupe de produits par rapport à un autre, les bioplastiques versus les plastiques traditionnels par exemple, ne sont donc pas possibles (European Bioplastics, 2008).

# *CHAPITRE 4*

*“ANALYSE CRITIQUE SUR  
L’AVENIR DES BIOPASTIQUES”*

## 4. ANALYSE CRITIQUE SUR L'AVENIR DES BIOPLASTIQUES

Une analyse sur l'avenir des bioplastiques utilisés pour les emballages alimentaires est tout d'abord effectuée aux deux premières sections de ce chapitre qui dressent un portrait des contraintes et facteurs de succès liés à leur essor. L'analyse est effectuée en intégrant plusieurs éléments des chapitres antérieurs.

### 4.1 Contraintes qui limitent l'essor des bioplastiques

La confusion au niveau de la terminologie, des coûts trop élevés, des propriétés qui ne sont pas toujours favorables, une problématique de gestion en fin de vie et une image négative au niveau des pratiques en agriculture représentent des freins à l'essor des bioplastiques.

La terminologie utilisée dans le domaine des bioplastiques est complexe dû aux différences dans l'utilisation des termes qui sont souvent délicates. Comme démontré auparavant, ces subtilités engendrent la confusion des consommateurs qui peuvent aisément confondre la gestion en fin de vie des bioplastiques (biodégradable et compostable) avec l'origine des ressources utilisées pour concevoir le matériau (biosourcé). La différence entre les termes « biodégradable » et « compostable » est également subtile, car rappelons qu'un bioplastique doit satisfaire les exigences de certaines normes afin d'être considéré comme compostable. Ces distinctions et mécompréhensions, jumelées aux pratiques commerciales ou au marketing vert des entreprises, peuvent facilement conduire à des erreurs lorsque les consommateurs disposent des produits en fin de vie des emballages. Ces risques d'erreurs ont été mis en lumière vu que des contenants et emballages en PLA ont été récupérés par des citoyens par les bacs de recyclage (Recyc-Québec et Éco Entreprises Québec, 2010). Ces matières ne sont généralement pas acceptées dans la collecte sélective et peuvent contaminer la filière de recyclage du PET (ÉEQ, 2012b).

Un consensus sur la signification des termes est également problématique auprès de la communauté scientifique et de l'industrie même. Par exemple, le manque d'uniformité dans l'utilisation du terme bioplastique est manifeste.

Les coûts sont également un frein majeur à l'essor des bioplastiques. Plusieurs sources sont assez unanimes sur les différences de prix et les bioplastiques seraient de 1.5 à 4 fois plus chers que les plastiques traditionnels (Mulot, 2007) (DiGregorio, 2009) (Doukhy-DeBoissoudy, 2011). Ce constat est confirmé par des données de 2012 qui indiquent que le coût pour des granules de résine de PLA est environ 2.5 fois plus élevé que des granules de PEBD (Yezza, 2012c). Pour les mêmes applications, ces différences de prix rendent les bioplastiques peu concurrentiels et ont de la difficulté à convaincre les acheteurs potentiels.

La gestion de fin de vie des emballages alimentaires n'est actuellement pas en faveur des bioplastiques biodégradables et compostables. L'exemple de l'emballage conçu avec du PLA présenté dans les chapitres précédents est représentatif de cette situation et démontre qu'aucune méthode de valorisation n'est adaptée à ce type de bioplastiques.

Premièrement, les bioplastiques biodégradables peuvent avoir des impacts négatifs sur les filières de recyclage. Par exemple, les bouteilles de PLA ont une apparence similaire à celles qui sont fabriquées en PET et elles risquent donc d'être mal triées et d'affecter la filière de recyclage de ce matériau, spécialement si le tri est manuel (ÉEQ, 2012b). La présence de PLA lors des opérations de recyclage du PET, et plus spécifiquement lors de la mise en forme, cause certaines problématiques. Une agglomération du PLA lors du séchage et de la mise en forme du PET ainsi qu'un jaunissement et opacification du PET recyclé sont entre autres deux des impacts observés (ÉEQ, 2012b). La fiche complète des problématiques ainsi répertoriées se trouve ci-dessous et provient d'Éco Entreprises Québec.

Une étude du Centre de recherche industriel du Québec (CRIQ) a également démontré des impacts similaires reliés à la présence de sacs en bioplastique compostable dans la filière de recyclage des sacs de plastique traditionnel (Recyc-Québec, 2007). Les problèmes de compatibilité au niveau du recyclage sont présentement limités dû à la faible part de marché des bioplastiques biodégradables. L'augmentation de la demande pour les bioplastiques prévue au cours des prochaines années par les études de marché pourrait par contre accentuer la problématique.

Deuxièmement, plusieurs municipalités n'acceptent pas la très grande majorité des bioplastiques compostables au niveau de leur processus de compostage, même s'ils sont certifiés. Les autorités supérieures de certains pays ont par ailleurs resserré très récemment

leurs lignes directrices pour l'encadrement des activités de compostage applicables aux lieux de compostage industriel. Elles indiquent qu'un sac compostable « *est considéré au même titre que les sacs de plastique, puisqu'il est tout aussi susceptible d'engendrer des conditions anaérobies* »

Les explications précédentes démontrent toute la problématique derrière les emballages ou produits conçus avec des bioplastiques compostables, car bien souvent, la seule option de fin de vie pour ces matériaux est le LET. La solution de traitement en fin de vie sur laquelle était originalement basée la promotion des bioplastiques compostables est malheureusement devenue un problème.

Les bioplastiques biosourcés sont tributaires de l'agriculture d'où ils tirent leurs matières premières, dont le maïs et la canne à sucre. L'emploi de ressources détournées des filières alimentaires est l'une des critiques souvent formulées à l'égard de ces pratiques. Afin de relativiser cette problématique, les fabricants de bioplastiques biosourcés mentionnent des statistiques intéressantes. Selon NatureWorks, leur procédé de fabrication du PLA ne requiert que 0.11 % des cultures fourragères de maïs disponibles comparativement à 25 à 40 % pour produire l'éthanol destiné aux carburants (Deligio, 2011). Un autre fabricant de bioplastiques biosourcés, Novamont, souligne des statistiques similaires. Les bioplastiques utiliseront 0.29 % de la surface agricole européenne en 2015 si l'augmentation des parts de marché anticipée se concrétise (Doukhy-DeBoissoudy, 2011). Par contre, les ressources agricoles utilisées pour la production de bioplastiques biosourcés sont généralement cultivées selon des méthodes de production industrielles et une quantité significative d'énergie, d'eau, de terre, d'OGM, de pesticides et de fertilisants sont nécessaires. Ces méthodes épuisent donc les ressources naturelles et risquent de polluer l'eau, l'air et le sol (Álvarez-Chávez *et autres.*, 2012).

## **4.2 Facteurs favorisant la croissance du marché occupé par les bioplastiques**

Malgré les freins liés à l'essor des bioplastiques, les prévisions de croissance sont excellentes au cours des prochaines années. La demande globale pour les bioplastiques devrait doubler entre 2013 et 2018 pour atteindre près de 2 millions de tonnes métriques (Lachance, 2011). Aux États-Unis, une tendance similaire est prévue et la demande pour les bioplastiques devrait grimper de 16 % par année jusqu'en 2016 (Converting Quarterly, 2012). Les

innovations technologiques qui augmentent les propriétés de ce type de matériaux et qui diminuent leurs prix devraient conduire à cette croissance.

Une réglementation plus restrictive à l'égard de l'utilisation des plastiques d'origine fossile non biodégradables a assurément une influence positive sur la demande des bioplastiques compostables. Plusieurs pays ont mis en place des réglementations interdisant, limitant ou taxant les sacs jetables qui dans certains cas favorisent les bioplastiques. Par exemple, depuis janvier 2011, l'Italie interdit les sacs d'emplettes à usage unique non compostables d'origine fossile tout en permettant les sacs en bioplastiques compostables (Laird, 2011c).

Les consommateurs sont également plus soucieux de se procurer des produits respectueux de l'environnement et les caractères biosourcés et compostables des bioplastiques constituent des atouts que les fabricants mettent en valeur à l'aide d'un marketing vert. La compagnie Coca-Cola affirme par exemple que l'utilisation de ressources renouvelables pour produire ses bouteilles en PET biosourcées a permis de diminuer les émissions de dioxyde de carbone de 30 000 tonnes métriques en 2010 (The Coca-Cola Company, 2012b). Cette réduction est comparée à un scénario où toutes les bouteilles en PET pour la même période auraient été produites à 100 % de ressources non renouvelables. Dans le même ordre d'idée, NatureWorks avance que la production de son PLA génère 60 % moins d'émissions de gaz à effet de serre que les plastiques traditionnels comme le PET ou le PS (NatureWorks, 2012c). Comme souligné au chapitre 3, une prudence est de mise lors de l'interprétation des gains environnementaux avancés par les compagnies. Les analyses du cycle de vie (ACV), qui servent souvent de références pour la promotion de ces gains, indiquent dans la majorité des cas des impacts environnementaux qui sont favorables tandis que certains autres ne le sont pas (ADEME, 2005).

L'Association canadienne de l'industrie des plastiques souligne que la production totale de plastique ne requiert que 4 % des réserves mondiales de pétrole (Gervais, 2010). Malgré ces statistiques, une moins grande dépendance aux hydrocarbures dont les prix fluctuent considérablement est un facteur qui favorise grandement la demande pour les bioplastiques biosourcés. Comme signalé précédemment, la gestion en fin de vie est problématique pour les bioplastiques compostables, mais il en est autrement des bioplastiques biosourcés non biodégradables. Plusieurs entreprises importantes dans l'industrie de l'alimentation utilisent ou prévoient utiliser ce type de bioplastiques. Comme souligné au chapitre 2, c'est le cas notamment des entreprises Coca-Cola et Pepsi pour leurs bouteilles en PET ainsi que Danone pour certains de ses pots fabriqués en PEHD. Ces contenants

biosourcés mais non biodégradables sont transparents et parfaitement compatibles avec les filières de recyclage actuelles. Une étude de marché de Smithers Pira prévoit d'ailleurs une croissance très marquée pour ces matériaux (Pierce, 2011). La croissance prévue au niveau de la demande de polyéthylène biosourcé est estimée à 83 % entre 2010 et 2020 et d'après une autre étude du Freedonia Group, l'augmentation de la capacité de production devrait réduire ses coûts (Converting Quarterly, 2012).

# *CHAPITRE 5*

*“RECOMMANDATIONS”*

## 5. RECOMMANDATIONS

En se basant sur le portrait des bioplastiques qui a été dressé dans les chapitres précédents ainsi que sur les freins limitant leur essor, plusieurs recommandations peuvent être avancées afin de faciliter leur intégration sur le marché et améliorer les bénéfices reliés à leur utilisation.

Sensibilisation et éducation, des recommandations pour l'industrie agricole, les instances gouvernementales et municipales ainsi que pour les fabricants de produits afin de réduire leur impact, sont décrites ci-dessous.

### 5.1 Sensibilisation et éducation

Puisque la confusion au niveau de la terminologie des bioplastiques est l'un des principaux problèmes liés à leur essor, la sensibilisation et l'éducation de la population sont essentielles. Par exemple, une bonne compréhension du terme « compostable » est primordiale car comme expliqué au chapitre 1, les processus de certification et leurs logos respectifs réfèrent à un compostage industriel ou municipal dans la très grande majorité des cas. La sensibilisation doit non seulement provenir des municipalités et des sociétés d'État, mais aussi des compagnies mêmes afin de rendre les messages plus clairs. Le message véhiculé par les fabricants devrait mettre de l'avant des concepts faciles à comprendre et les bénéfices de l'emballage qui interpellent les consommateurs (Verespej, 2011). Selon un expert du Biodegradable Products Institute, un exemple d'un tel message est : « *Recyclable avec les bouteilles en PET, réduit l'empreinte carbone, réduction de 3 millions de gallons d'hydrocarbures* ». Cette façon de faire représente un défi pour les compagnies car le message doit être concis sur les étiquettes. L'augmentation des parts de marché des bioplastiques qui est anticipée durant les prochaines années est un signal quant à l'urgence d'agir afin de mieux sensibiliser la population.

Plusieurs exemples démontrent l'importance d'une bonne sensibilisation nécessaire au succès d'un projet ou d'une réglementation visant les bioplastiques. Par exemple, une longue période de préparation a précédé l'implantation de la réglementation concernant le bannissement des sacs d'emplettes d'origine fossile non compostables en Italie (Laird,

2011c). Le cadre légal a été mis en place dès 2007 et une campagne a été lancée afin d'éduquer le public avant l'entrée en vigueur complète du bannissement en 2011.

Qui plus est, il est permis de disposer des sacs compostables avec la matière organique sous la réglementation italienne, renforçant ainsi l'importance du processus de sensibilisation préalable (*ibid.*). Par ailleurs, la ville du Lac Mégantic signale la grande importance qu'a eue la sensibilisation lors de l'implantation de la collecte à trois voies à cause de la confusion entre les plastiques biodégradables, compostables et oxo-biodégradables (Mercier, 2011).

## 5.2 Recommandation pour l'industrie agricole

L'impact des biopolymères pourrait être réduit grâce à une meilleure gestion des fertilisants et des pratiques d'agriculture extensive; de telles pratiques peuvent malheureusement entraîner des rendements plus faibles et donc augmenter les besoins en sols pour la production de biomasse (Weiss et autres, 2012).

Certains auteurs suggèrent l'utilisation des résidus agricoles du maïs afin de générer l'énergie nécessaire pour le processus de production des biopolymères (Weiss et autres, 2012; Kim and Dale, 2005). Cette pratique pourrait cependant s'avérer nuisible à long terme, puisqu'elle appauvrit le sol.

Diverses solutions sont avancées afin d'offrir des produits biosourcés plus avantageux pour l'environnement :

- produire la biomasse à partir de déchets ou la cultiver sur des terres abandonnées ou dégradées (Weiss et autres, 2012; Piemonte and Gironi, 2011);
- produire les matériaux biosourcés avec des cultures à haut rendement en matière première et sous-produits utiles (Patel et autres, 2006);
- faire une utilisation plus intensive des terres agricoles en utilisant les cultures intercalaires entre les récoltes, qui serviraient d'énergie ou de matière première (Weiss et autres, 2012);
- établir des lignes directrices claires pour la gestion des terres agricoles (Weiss et autres, 2012).

Pour pallier les problématiques associées aux méthodes agricoles, Des méthodes être mises en place, telles que :

- les cultures de couverture (qui absorbent l'azote minéral);

- les cultures dérobées en jachère, qui atténueraient les GES;
- une meilleure gestion des engrais et une utilisation optimale d'engrais azoté;
- l'interdiction de brûler les résidus des récoltes;
- un labourage minimal ou nul, permettant d'augmenter le carbone dans le sol (Bellarby et autres, 2008; Smith et autres, 2007).

### 5.3 Recommandations pour les instances gouvernementales

Selon Piemonte et Gironi (2011b), si l'objectif des diverses politiques gouvernementales est l'atténuation des changements climatiques induits par le CO<sub>2</sub>, les décideurs devraient, à court terme (horizon de 30 ans), se concentrer à améliorer l'utilisation des ressources fossiles (ou leur réutilisation), à conserver les forêts et savanes existantes ainsi qu'à restaurer les forêts naturelles et les habitats de prairie sur les terres agricoles non utilisées à des fins alimentaires. En plus de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, cette conversion de grandes surfaces vers des forêts secondaires offrirait des services écologiques supplémentaires, tels que la prévention de la désertification de produits forestiers, le maintien de la biodiversité biologique et la régulation du climat régional. Au contraire, l'utilisation de grandes surfaces de terres afin de fournir des biopolymères pourrait représenter des pressions supplémentaires sur l'environnement.

Plusieurs objets fabriqués de matières plastiques pourraient faire l'objet de différents programmes ou mesures permettant de réduire la quantité de matières plastiques enfouies. La mise en place des programmes pourrait être prise en charge par une internalisation des coûts dans le prix d'achat. Le *Règlement sur la récupération et la valorisation de produits par les entreprises* démontre qu'il est possible de réduire les déchets lorsqu'ils sont visés par des programmes réglementés.

Élargir le règlement à un nombre de produits de consommation courante représenterait une solution de responsabilisation du fabricant efficace.

### 5.4 La réduction à la source

Cette recommandation est applicable à tous les emballages et non seulement aux emballages en bioplastique. La réduction à la source entre dans une démarche d'écoconception qui vise à minimiser l'impact du couple contenu-contenant sur l'environnement tout au long du cycle de vie. La réduction à la source vise à éliminer une

problématique importante, le suremballage. Il faut cependant garder à l'esprit les rôles de l'emballage qui sont de protéger, transporter, conserver et stocker le produit qu'il contient tout en informant sur ce dernier (Yezza, 2012b).

La démarche est profitable aux fabricants à cause des gains reliés à la diminution des matières premières, de l'énergie et des coûts de transport (Yezza, 2012b). C'est une approche également bénéfique au niveau des ventes, car l'image de l'entreprise est rehaussée et les produits plus attrayants aux yeux des consommateurs. Pour les fabricants, les coûts à payer pour compenser les coûts nets des services municipaux de collecte sélective sont moindres car les tarifs sont fixés au poids (ÉÉQ, 2012e). Moins de matières résiduelles sont également produites et les gains environnementaux sont donc attribuables à l'ensemble des produits mis sur le marché.

## **5.5 Matières premières qui n'entrent pas en concurrence avec les produits alimentaires**

Produire des bioplastiques de deuxième génération issus de ressources qui ne font pas concurrence à l'alimentation humaine et animale est une autre importante recommandation qui améliorerait l'image des bioplastiques considérablement. Comme soulevé précédemment, plusieurs compagnies cherchent présentement à produire des bioplastiques à l'aide de solutions de rechange. Utiliser des matières premières comme des algues, des matières résiduelles provenant de l'agriculture et même du dioxyde de carbone sont parmi les options envisagées.

## CONCLUSION GENERALE

Les matières plastiques sont associées à une large problématique environnementale et sanitaire. Les bioplastiques sont souvent présentés comme solution préférables par rapport aux plastiques pétrochimiques. L'objectif principal de ce travail consistant à analyser l'usage actuel de ces bioplastiques biodégradables, compostables et biosourcés pour les emballages alimentaires.

Ce type d'emballages est un créneau convoité par les bioplastiques qui projettent une image positive grâce à leur caractère souvent biodégradable ou parce qu'ils proviennent de ressources renouvelables, donc ils sont préférables quant aux émissions de GES, alors que les plastiques pétrochimiques sont avantageux quant à l'acidification et l'eutrophisation.

Les bioplastiques peuvent être biosourcés, biodégradables ou les deux à la fois. La confusion des consommateurs rend la distinction entre l'origine de la ressource et la gestion en fin de vie du matériau importante, tout comme la différence entre les termes biodégradable et compostable. C'est pourquoi une terminologie et une classification des bioplastiques ont été décrites dans un premier temps et ont permis de dresser un portrait complet de ces matériaux. Les quatre groupes de bioplastiques ainsi que des exemples d'applications ont finalement été présentés et viennent clore le portrait des bioplastiques traité dans la première partie. Il y a plusieurs moyens pour regrouper les bioplastiques mais une classification par procédé de fabrication a été privilégiée.

Dans la deuxième partie de ce travail une analyse critiques de l'avenir des bioplastique, l'impact sur l'environnement de ces biopolymères ainsi que la performance environnementale des emballages alimentaires conçus en bioplastiques ont été cernés.

A travers notre recherche nous pouvons dire que l'analyse du cycle de vie est un outil souvent utilisé pour comparer la performance environnementale des emballages alimentaires en bioplastique avec leurs homologues conçus en plastique traditionnel. Ce travail démontre la complexité liée à l'interprétation des résultats de cette analyse.

L'analyse sur l'avenir des bioplastiques nous a permis conclure que les principaux freins à leur essor sont la confusion au niveau de la terminologie, des coûts trop élevés, des propriétés qui ne sont pas toujours favorables, une problématique de gestion en fin de vie et une image négative

au niveau des pratiques en agriculture. D'autre part, une réglementation favorable, une moins grande dépendance au pétrole pour les bioplastiques biosourcés et des innovations qui auront une incidence positive sur les prix sont des facteurs contribuant à une croissance des ventes.

Enfin, afin d'améliorer la performance des bioplastiques nous recommandons d'éduquer et de sensibiliser la population envers ces matériaux encore relativement nouveaux sur le marché et déstructurer la gestion de fin de vie des bioplastiques afin de répondre à l'accroissement des matières résiduelles associées à leur plus grande présence sur les marchés.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Introduction à l'Analyse de Cycle de Vie (ACV). In ADEME. Site de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie, [En ligne], 2005.

AIB Vinçotte . Signification de OK biobased. In AIB Vinçotte. Site du AIB Vinçotte, [En ligne], 2012d.

Álvarez-Chávez, C.R., Edwards, S., Moure-Eraso, R. and Geser, K. « Sustainability of bio-based plastics: general comparative analysis and recommendations for improvement ». *Journal of Cleaner Production*, vol. 23, n 1, p. 47-56, 2012.

American Society for Testing and Materials (ASTM) . Standard Practice for Evaluating and Reporting Environmental Performance of Biobased Products. West Conshohocken, ASTM International, 9p. (D7075-4), 2004.

American Society for Testing and Materials (ASTM) . Standard Specification for Labeling of Plastics Designed to be Aerobically Composted in Municipal or Industrial Facilities. West Conshohocken, ASTM International, 3p. (D6400-12), 2012.

Avérous, L. « Les Polymères Biodégradables : quelles finalités, quelles opportunités? In Luc Avérous ». Site de Luc Avérous, [En ligne], 2007.

BASF. Polymères biodégradables - inspirés par la nature - Ecoflex®, Ecovio®. In BASF. Site de BASF, [En ligne], 2010.

Barnes, D.K., Galgani, F., Thompson, R.C. and Barlaz, M. « Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments ». *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences*, vol. 364, n° 1526, p. 1985-1998, 2009

BASF. BASF at a glance. In BASF. Site de BASF, [En ligne], 2012.

Bellarby, J., Foereid, B., Hastings, A. and Smith, P. « Cool Farming: Climate Impacts of Agriculture and Mitigation Potential » (Rapport de recherche). The Netherlands, Greenpeace International, 44 p, 2008.

Bewa, H. « Matériaux polymères biodégradables et applications » (Note de Synthèse II) (Synthèse sur les produits biodégradables). France, ADEME Éditions, 16 p, 2006.

Braskem . Green products. In Braskem. Site de Braskem, [En ligne], 2011a.

Braskem . Innovative and sustainable partnerships. In Braskem. Site de Braskem, [En ligne], 2011b.

- Braskem . Line of renewable products. In Braskem. Site de Braskem, [En ligne], 2011c.
- Braskem . The strength of chemicals focused on business sustainability. In Braskem. Site de Braskem, [En ligne], 2011d.
- Cascades. Analyse du cycle de vie de divers contenants alimentaires. In Cascades. Site de Cascades, [En ligne], 2011a.
- Castelan, G. « Polymères biodégradables. In Anonyme, Bioprocédés dans les domaines de la santé, de l'agroalimentaire et de la chimie » (p. 1-25). France, Éditions Techniques de l'ingénieur ; 2010.
- Cereplast. Cereplast Compostables®. In Cereplast. Site de Cereplast, [En ligne], 2012a.
- Cereplast. RezInnovation™. In Cereplast. Site de Cereplast, [En ligne] , 2012b.
- Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). Final assessment report – Comparative life cycle assessment report of food packaging products. In Cascades. Site de Cascades, [En ligne], 2011.
- Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). Que sommes-nous? In CIRAIG. Site du Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services, [En ligne], 2012.
- Conseil national de l'emballage CNE, EMBALAGES COMPOSTABLES ET MATERIAUX PLASTIQUES DITS « BIODEGRADABLES » ISSUS DE RESSOURCES RENOUVELABLES, 2009.
- Converting Quarterly. US bioplastics demand to exceed 550M lbs in 2016. In Converting Quarterly. Site de Converting Quarterly, [En ligne], 2012.
- Deligio, T. « Can PLA take the next big step? In Plastics Today ». Site de Plastics Today, [En ligne], 2011.
- DiGregorio, B.E. « Biobased Performance Bioplastic: Mirel ». Chemistry & Biology. vol. 16, n 1, p. 1-2, 2009.
- Doukhy-DeBoissoudy, C. « Développement des bioplastiques en Europe et cadre législatif. Colloque québécois sur les bioplastiques compostables ». Sherbrooke, 2 juin 2011, 2011.
- Éco Entreprises Québec (ÉEQ) . Fiche technique - Impacts des emballages sur la collecte sélective et le recyclage. In ÉEQ. Site de Éco Entreprises Québec, [En ligne], 2012b.
- Éco Entreprises Québec (ÉEQ) . Tarifs de ÉEQ - Grilles de contributions par matière? In ÉEQ. Site de Éco Entreprises Québec, [En ligne], 2012<sup>e</sup>.

Ellipsos . Du concept à la pratique. In Ellipsos. Site de Ellipsos, [En ligne], 2007.

Environment Australia . Biodegradable plastics – developments and environmental impacts (Rapport sur les caractéristiques et problématiques reliées aux polymères biodégradables en collaboration avec ExcelPlas Australia). Melbourne, 60 p, 2002.

European Bioplastics . Position paper – Nov 2008 – Life cycle assessment of bioplastics. In European Bioplastics. Site de l'European Bioplastics, [En ligne], 2008.

European Bioplastics. Position paper – July 2009 – "Oxo-biodegradable" plastics. In European Bioplastics. Site de l'European Bioplastics, [En ligne], 2009.

European Bioplastics (s. d.). Bioplastics - What differentiates bioplastics from conventional plastics? In European Bioplastics. Site de l'European Bioplastics, [En ligne].

Gagnon, B. « Gestion du cycle de vie et écoconception ». Présentation dans le cadre du cours ENV805-Application du développement durable de l'université de Sherbrooke, Sherbrooke, 14 septembre 2010.

Gervais, H. « Les plastiques - Fiche informative. In Recyc-Québec ». Site de Recyc- Québec, [En ligne], 2010.

Gross, R.A. and Kalra, B. « Biodegradable Polymers for the Environment ». Science, vol. 297, n° 5582, p. 803-807, 2002.

Innovia Films . About us. In Innovia Films. Site de Innovia Films, [En ligne], 2012a.

Innovia Films . End of life. In Innovia Films. Site de Innovia Films, [En ligne], 2012b.

Innovia Films. Renewability. In Innovia Films. Site de Innovia Films, [En ligne], 2012c.

Jarroux, N. « Les biopolymères : différentes familles, propriétés et applications ». In Anonyme, Bioprocédés dans les domaines de la santé, de l'agroalimentaire et de la chimie (p. 25). Paris, Éditions Techniques de l'ingénieur, 2010.

Kale, G., Kijchavengkul, T., Auras, R., Rubino, M., Selke, S.E. and Singh, S.P. « Compostability of bioplastic packaging materials: an overview ». Macromolecular bioscience, vol. 7, n° 3, p. 255-277, 2007.

Kelly, P. « Innovation Today: Biobased Plastics with Performance and Biodegradability ». In Society of Chemical Industry. Site du Society of Chemical Industry, [En ligne], 2011.

Kijchavengkul, T. and Auras, R. « Compostability of polymers ». Polymer International, vol. 57, n° 6, p. 793-804, 2008.

- Kim, S. and Dale, B.E. « Life Cycle Assessment Study of Biopolymers (Polyhydroxyalkanoates) - Derived from No-Tilled Corn (11 pp) ». *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 10, n° 3, p. 200-210, 2005.
- Krüger, M., Kauertz, B. and Detzel, A. « Life Cycle Assessment of food packaging made of Ingeo™ biopolymer and (r)PET ». In NatureWorks. Site de NatureWorks, [En ligne], 2009.
- Krzan, A., Hemjinda, S., Miertus, S., Corti, A. and Chiellini, E. « Standardization and certification in the area of environmentally degradable plastics ». *Polymer Degradation and Stability*, vol. 91, n° 12, p. 2819-2833, 2006.
- Lachance, M. « Les bioplastiques : marchés et opportunités d'affaires. Colloque québécois sur les bioplastiques compostables ». Sherbrooke, 2 juin 2011.
- Laird, K. Green Matter, 2012 « Predictions: Bioplastics no longer here today, gone tomorrow. In *Plastics Today* ». Site de *Plastics Today*, [En ligne], 2011b.
- Laird, K. « Green Matter: Little Green Bags. In *Plastics Today* ». Site de *Plastics Today*, [En ligne], 2011c.
- Luckachan, G.E. and Pillai, C.K.S. « Biodegradable Polymers- A Review on Recent Trends and Emerging Perspectives ». *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 19, n° 3, p. 637-676, 2011.
- Lunt, J. Introduction to Bioplastics. In SlideShare.  
<http://fr.slideshare.net/jimlunt/introduction-to-bioplastics> (Page consultée le 1er février 2013), 2010.
- Mercier, R. « Problématique des plastiques dans la chaîne de compostage; Expérience de Lac-Mégantic ». Colloque québécois sur les bioplastiques compostables, Sherbrooke, 2 juin 2011.
- Metabolix. Corporate Profile. In Metabolix. Site de Metabolix, [En ligne], 2012a.
- Metabolix . Knowledge Centre – PHA primer. In Metabolix. Site de Metabolix, [En ligne], 2012c.
- Moore, C.J. « Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat ». *Environmental research*, vol. 108, n° 2, p. 131-139, 2008.
- Mulot, R. La vérité sur les plastiques biodégradables. *Sciences et avenir*, n° 725, p. 8-17, 2007.
- NatureWorks. About NatureWorks LLC. In NatureWorks. Site de NatureWorks, [En ligne], 2012a.

- NatureWorks. From plants to plastics. In NatureWorks. Site de NatureWorks, [En ligne], 2012d.
- NatureWorks. Sourcing Ingeo: Raw Materials. In NatureWorks. Site de NatureWorks, [En ligne], 2012<sup>e</sup>.
- Novamont . Film. In Novamont. Site de Novamont, [En ligne], 2009a.
- Novamont . Mater-Bi : biodegradability and compostability certificates. In Novamont. Site de Novamont, [En ligne], 2009b.
- Novamont . What is Mater-Bi. In Novamont. Site de Novamont, [En ligne], 2009d.
- Novamont . 15 years that have changed chemistry world-wide. In Novamont. Site de Novamont, [En ligne], 2009<sup>e</sup>.
- Patel, M.K., Crank, M., Dornburg, V., Hermann, B.G., Roes, L., Hüsing, B., Overbeek, L., Teraggni, F. and Recchia, E. « Medium- and long-term opportunities and risks of the biotechnological production of bulk chemicals from renewable resources – The potential of white biotechnology ». (Rapport préparé pour la Commission européenne), 2006.
- Piemonte, V. and Gironi, F. « Land-use change emissions: How green are the bioplastics? » *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. 30, n° 4, p. 685-691, 2011.
- Pierce, L.M. « PHA and bio-derived PE to drive bioplastic packaging market to 2020: study. In *Packaging Digest* ». Site de *Packaging Digest*, [En ligne], 2011.
- Preventpack. Dossier Biopackaging. In Preventpack. Site de Preventpack, [En ligne], 2012.
- Quantis. Lignes directrices pour la réalisation d'analyses du cycle de vie environnementales – Secteur des emballages au Québec. In ÉEQ. Site de Éco Entreprises Québec, [En ligne], 2011.
- Raschka, A. and Carus, M. (Industrial material use of biomass: Basic data for Germany, Europe and the world (Rapport de recherche). Hürth, nova-Institute for ecology and innovation, 27 p, 2012.
- Recyc-Québec. Sacs dégradables-Propriétés et allégations environnementales. In Recyc-Québec. Site de Recyc-Québec, [En ligne], 2005.
- Recyc-Québec. Avis sur les sacs d'emplettes-Évaluation de leur impact environnemental. In Recyc-Québec. Site de Recyc-Québec, [En ligne], 2007.
- Recyc-Québec et Éco Entreprises Québec. La caractérisation des matières résiduelles du secteur résidentiel au Québec 2010. In Recyc-Québec. Site de Recyc- Québec, [En ligne], 2010.

Smith, R. « Biodegradable polymers for industrial applications ». Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 531p, 2005.

Sustainable Biomaterials Collaborative (SBC). Working Landscape Certificates. In SBC. Site du Sustainable Biomaterials Collaborative, [En ligne], 2012b.

The Coca-Cola Company. PlantBottle de Coca-Cola Company, [En ligne], 2012a.

The Coca-Cola Company. PlantBottle Benefits. In The Coca-Cola Company. Site de Coca-Cola Company, [En ligne], 2012b.

Verespej, M. « Expert : Consumers confused by terms like 'bio-based' and 'renewable' ». In Plastics News. Site du Plastics News, [En ligne], 2011.

Vuillaume, P. « Stratégies pour l'amélioration des propriétés d'usage du PLA ». Colloque québécois sur les bioplastiques compostables, Sherbrooke, 2 juin 2011.

Weiss, M., Haufe, J., Carus, M., Brandão, M., Bringezu, S., Hermann, B. and Patel, M.K. « A Review of the Environmental Impacts of Biobased Materials ». Journal of Industrial Ecology, vol. 16, n° 1, p. S169-S181, 2012.

Yezza, I. « Biodegradable Plastics – PaperBoard Applications, Innovations and Trends ». Présentation à Cascades Sonoco, Kingsey Falls, 10 octobre 2010, 2012a.

Yezza, I. « Peut-on survivre sans emballage? In Scribd ». Site du Scribd, [En ligne], 2012b.

Yu, L., Dean, K. and Li, L. » Polymer blends and composites from renewable resources ». Progress in Polymer Science, vol. 31, n° 6, p. 576-602, 2006.

Yu, L. « Biodegradable Polymers Blends and Composites from Renewable Ressources ». New Jersey, John Wiley & Sons, Inc., 487p, 2009.