

Lab.RII

UNIVERSITÉ DU LITTORAL CÔTE D'OPALE
Laboratoire de Recherche sur l'Industrie et l'Innovation

CAHIERS DU LAB.RII

– DOCUMENTS DE TRAVAIL –

N°293

Février 2015



**LES INNOVATIONS DE
PRODUITS DANS LA
CHIMIE DU VEGETAL
COMME SUBSTITUTS
AUX PLASTIQUES**

Manon JUBIEN

LES INNOVATIONS DE PRODUITS DANS LA CHIMIE DU VEGETAL COMME SUBSTITUTS AUX PLASTIQUES

PRODUCTS INNOVATION IN BIO-BASED CHEMISTRY AS A SUBSTITUTE TO PLASTICS

Manon JUBIEN¹

Résumé : La chimie du végétal se définit par l'utilisation de ressources renouvelables au lieu des ressources pétrolières. La chimie du végétal présente une dimension environnementale et est porteuse d'innovations dans les différents domaines de l'industrie chimique. Le polyacide lactique est l'innovation de produit la plus mature et la plus répandue sous diverses applications dans la plasturgie. Cependant, la substituabilité des plastiques pétrosourcés usuels par le polyacide lactique doit être évaluée par la comparaison fiabilité technologique/faisabilité économique de chaque produit.

Abstract: Bio-based chemistry is defined by the use of renewable resources over oil. Bio-based chemistry is embedded in an environmental dimension and brings innovations in every sectors of chemical industry. Polylactic acid is the most matured and the most spread product innovation in plastic industry. However the substitutability of plastics by polylactic acid can be assessed by the comparison technologic reliability/economic feasibility of each product.

© Laboratoire de Recherche sur l'Industrie et l'Innovation
Université du Littoral Côte d'Opale, février 2015

¹ MASTER 2 Stratégie d'innovation et dynamiques entrepreneuriales

LES INNOVATIONS DE PRODUITS DANS LA CHIMIE DU VEGETAL COMME SUBSTITUTS AUX PLASTIQUES

PRODUCTS INNOVATION IN BIO-BASED CHEMISTRY AS A SUBSTITUTE TO PLASTICS

Manon JUBIEN

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	4
1. LES INNOVATIONS DE PRODUITS DANS LA CHIMIE DE VEGETAL : APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DES PLASTIQUES BIOSOURCES	5
1.1. La Chimie du végétal comme source d'innovation de produits dans le domaine des plastiques biosourcés	5
	6
1.1.1. Secteur de l'emballage	6
1.1.2. Secteur automobile	7
1.1.3. Secteur électronique	7
1.1.4. Secteur biomédical	8
1.1.5. Secteur textile	8
1.1.6. Secteur du bâtiment	8
1.2. Evolution des innovations de produits dans le domaine des plastiques pétrosourcés et biosourcés	8
2. LE DEGRE DE SUBSTITUABILITE DES PLASTIQUES ISSUS DE LA PETROCHIMIE PAR LES PLASTIQUES BIOSOURCES	10
2.1. Fiabilité technologique comparée des innovations de produits de la chimie du végétal et des plastiques usuels	10
2.1.1. Secteur de l'emballage agro-alimentaire	11
2.1.2. Secteur biomédical	12
2.2. Faisabilité économique des innovations de produits de la chimie du végétal	12
2.2.1. Secteur de l'emballage agro-alimentaire	12
2.2.2. Secteur biomédical	13
CONCLUSION	14
BIBLIOGRAPHIE	15

INTRODUCTION

La principale matière première de l'industrie chimique est le pétrole. En effet, ce produit permet d'obtenir les molécules de base servant ensuite à synthétiser des produits plus complexes. Le raffinage du pétrole consiste en la distillation de celui-ci afin de récupérer et de séparer les différents constituants. Après les distillations, le vapocraquage permet d'obtenir des molécules de plus petite taille très utiles pour l'industrie chimique. Suite à la définition du concept de développement durable dans les années 1970, de nombreux débats se sont ouverts autour de l'utilisation du pétrole dont les sources sont amenées à diminuer pour les générations futures.

La chimie verte est définie pour la première fois en 1998 par Anastas et Warner sous la forme de 12 principes visant à la synthèse de produits chimiques plus respectueux de l'environnement, par des procédés moins consommateurs d'énergie (figure 1). Ainsi, la chimie verte est une discipline récente et donc porteuse d'innovations dans les différents domaines de l'industrie chimique actuelle. La chimie du végétal telle qu'elle est considérée aujourd'hui se définit par rapport à la chimie verte et plus précisément à partir du principe n°7. Ainsi la chimie du végétal présente la même dimension environnementale que la chimie verte. Par le développement d'innovations de produits efficaces et efficaces, la chimie du végétal prend en compte l'aspect économique de l'industrie et peut alors être envisagée comme une chimie de substitution à la pétrochimie.

- Les 12 Principes de la Chimie Verte :
- 1- La prévention de la pollution à la source en évitant la production de résidus
 - 2- L'économie d'atomes et d'étapes qui permet, à moindre coût, l'incorporation de fonctionnalités dans les produits recherchés tout en limitant les problèmes de séparation et de purification.
 - 3- La conception de synthèses moins dangereuses.
 - 4- La conception de produits chimiques moins toxiques.
 - 5- La recherche d'alternatives aux solvants polluants et aux auxiliaires de synthèse.
 - 6- La limitation des dépenses énergétiques.
 - 7- L'utilisation de ressources renouvelables à la place des produits fossiles.
 - 8- La réduction du nombre de dérivés en minimisant l'utilisation de groupes protecteurs ou auxiliaires.
 - 9- L'utilisation des procédés catalytiques de préférence aux procédés stoechiométriques.
 - 10- La conception des produits en vue de leur dégradation finale.
 - 11- La mise au point des méthodologies d'analyse en temps réel pour prévenir la pollution, en contrôlant le suivi des réactions chimiques.
 - 12- Le développement d'une chimie fondamentalement plus sûre pour prévenir les accidents.

Figure 1: Enoncé des 12 principes de la chimie verte selon Anastas et Warner (1998).

Le domaine de l'industrie chimique le plus important en termes de consommation de matières premières pétrolières est la plasturgie. L'importance de ce secteur se justifie d'autant plus qu'il existe de nombreuses applications pour les plastiques, comme le bâtiment, l'emballage, l'automobile ou l'électronique. Il apparaît alors important dans le cadre d'une étude sur les

innovations de la chimie du végétal de s'intéresser à la plasturgie qui pourrait en constituer un débouché important.

On peut alors se demander, dans le secteur de la plasturgie, quelles sont les conditions qui permettront la substitution des plastiques pétrosourcés par des innovations de produits de la chimie du végétal.

Avant de commencer l'étude, il est nécessaire de définir certains termes propres au secteur étudié. Un plastique est un matériau formulé à partir de polymères et de différents additifs qui amélioreront ses propriétés. Les polymères sont des macromolécules, principaux constituants du plastique. Ainsi, cette étude des innovations de produits de la chimie du végétal dans le domaine des plastiques sera basée sur les innovations de polymères. Ensuite, il est important de définir la notion de biopolymère. Les biopolymères regroupent deux familles : les polymères biodégradables et les polymères biosourcés. Tout en précisant que certains biopolymères présentent ces deux caractéristiques, ici l'étude sera centrée sur les biopolymères biosourcés. Enfin, la dernière notion à définir est celle de produit biosourcé. Un produit biosourcé est un produit synthétisé à partir de la biomasse. Selon la directive 2009/28/CE, la biomasse se définit comme « la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux ».

Dans une première partie, après avoir dressé un état des lieux des innovations de produits de la chimie du végétal dans les différents secteurs de la plasturgie, les motivations de l'utilisation de ces innovations seront exposées. Dans une seconde partie, la fiabilité technologique et la faisabilité économique de ces innovations seront évaluées afin d'établir les conditions qui permettront la substitution.

1. LES INNOVATIONS DE PRODUITS DANS LA CHIMIE DE VEGETAL : APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DES PLASTIQUES BIOSOURCES

1.1. La Chimie du végétal comme source d'innovation de produits dans le domaine des plastiques biosourcés

Il existe deux types d'innovations de produits dans le domaine des plastiques biosourcés, les biopolymères extraits de la biomasse et les biopolymères artificiels. Les biopolymères extraits de la biomasse sont séparés tels quels des ressources végétales puis sont fonctionnalisés pour améliorer leurs propriétés. Les biopolymères artificiels sont des plastiques synthétisés à partir de molécules biosourcées.

Comme indiqué précédemment, les plastiques couvrent de larges domaines d'applications. Proposons alors d'établir un état des lieux, pour chaque domaine d'applications, des plastiques pétrosourcés les plus utilisés et des innovations de produits de la chimie du végétal. Retenons alors les principaux secteurs : l'emballage et essentiellement l'emballage alimentaire, le bâtiment-travaux-publics, l'automobile, les équipements électriques et électroniques, le biomédical et le textile.

Actuellement, et toutes applications confondues, six familles de plastiques pétrosourcés dominant le marché en représentant près de 80% de la demande totale en plastiques en 2012. Ces six familles sont : le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC), le polystyrène (PS), le polyéthylène téréphtalate (PET) et le polyuréthane (PUR).

1.1.1. Secteur de l'emballage

Dans le secteur de l'emballage, parmi les produits pétrosourcés les plus utilisés actuellement, on trouve le polyéthylène téréphtalate (PET) essentiellement pour des emballages alimentaires comme des bouteilles, des pots de yaourts. Le polyéthylène téréphtalate est ensuite recyclé sous forme de fibres textiles. Le polyéthylène (PE) est également utilisé pour des emballages alimentaires mais aussi des sacs plastiques. On peut aussi citer le polypropylène (PP) pour des applications dans les emballages alimentaires sous vide.

Le premier avantage que proposent les plastiques biosourcés par rapport aux plastiques pétrosourcés usuels est la biodégradabilité. En effet, l'amidon, qui est un polymère extrait directement des plantes céréalières, des tubercules ou encore des légumineuses, est utilisé pour ses propriétés de compostabilité pour réaliser des emballages pour la collecte des déchets. Dans le domaine des emballages alimentaires, un des plastiques biosourcés les plus prometteurs est le polyacide lactique (PLA). Le polyacide lactique fait partie de la catégorie des biopolymères artificiels car il est synthétisé à partir du glucose extrait de l'amidon. Ses propriétés de barrière aux odeurs et aux arômes et sa résistance aux graisses lui permettent d'être utilisé pour des emballages alimentaires comme des récipients pour fruits et légumes ou des pots de yaourts. Les applications sont actuellement limitées par le manque de stabilité de ce matériau du fait de sa biodégradabilité.

Une innovation de produit pourrait alors pallier à cet inconvénient. Un nouveau plastique dont le début de la production industrielle est prévu pour 2017 est développé par la start-up néerlandaise Avantium grâce à des investissements de groupes agro-alimentaires comme Coca-cola et Danone. Ce plastique innovant est le polyéthylène furanoate (PEF) dont la structure est similaire au polyéthylène téréphtalate (PET) et pourrait donc avoir les mêmes applications dans les emballages alimentaires. De plus, il pourrait aussi être recyclé sous forme de fibres textiles comme le polyéthylène téréphtalate (PET).

1.1.2. Secteur automobile

Il est à noter tout d'abord que la partie plastique d'un véhicule représente environ 20 % de son poids total. Le choix du plastique n'est alors pas négligeable. Le polyacrylonitrile-butadiène-styrène (ABS), matériau pétrosourcé faisant partie de la famille des polystyrènes mais renforcé pour présenter une bonne résistance aux chocs, est généralement utilisé pour constituer les tableaux de bords ou encore les pare-chocs. Le caoutchouc, qui est le premier plastique découvert et qui est directement extrait de la biomasse, est essentiellement employé pour les pneus et les petites pièces d'étanchéité.

Une alternative biosourcée a été développée par Toyota pour la conception des tableaux de bords et panneaux intérieurs de portières. Ce matériau alternatif est constitué de polyacide lactique (PLA) renforcé grâce à l'ajout de fibres de Kenaf dont l'utilisation était jusqu'alors réservée à la papeterie. Cependant, ce matériau ne peut pas encore être utilisé pour la fabrication de pièces extérieures comme les pare-chocs. En effet, le PLA est un matériau

biodégradable et donc les pièces formulées manqueraient de stabilité au vu des conditions extérieures telles que les intempéries.

1.1.3. Secteur électronique

Comme pour le secteur de l'automobile, la plasturgie ne permet pas ici de constituer des produits complets. Le rôle des pièces plastiques dans l'électronique est essentiellement un rôle de protection, protection de l'objet par des coques, des boîtiers mais aussi protection de l'utilisateur grâce aux propriétés isolantes de ces matériaux.

Les matières plastiques les plus utilisées dans ce domaine sont le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP) et le polyacrylonitrile-butadiène-styrène (ABS). Tandis que le polyéthylène est essentiellement utilisé pour confectionner des isolants pour les câbles électriques, ce choix se justifiant par la souplesse du matériau, le polypropylène et le polyacrylonitrile-butadiène-styrène servent à la fabrication des carters d'appareils électroménagers et électroniques, et de machines diverses. Encore une fois, c'est la rigidité et la résistance du polyacrylonitrile-butadiène-styrène qui en fait un atout pour ce type d'application.

L'utilisation des matériaux biosourcés dans ce secteur est encore marginale mais certaines innovations ont vu le jour. Parmi celles-ci figure le développement, en 2005, du premier boîtier de PC portable biosourcé à partir de polyacide lactique par Fujitsu essentiellement dans le but de réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO₂). Les groupes Pioneer et Sanyo ont également mis au point des compact discs à base de polyacide lactique.

1.1.4. Secteur biomédical

Dans le secteur du biomédical, les plastiques sont essentiellement utilisés pour la fabrication de prothèses et de fils de suture. Les exigences sont très élevées que ce soit en termes de biocompatibilité des dispositifs ou de propreté et stérilité des produits. Ensuite, ce sont les propriétés mécaniques du matériau qui déterminent sa qualité en tant que dispositif biomédical. En effet, le produit conçu doit supporter les contraintes de son utilisation, les prothèses d'articulations devant supporter les mouvements du corps humain et les fils de suture ne doivent pas casser sous la moindre contrainte.

Les plastiques correspondant à ces critères et les plus utilisés pour la fabrication de prothèses, sont le polyéthylène terephthalate (PET) et les polyuréthanes. Le polyéthylène terephthalate (PET) est utilisé essentiellement comme prothèse vasculaire alors que les polyuréthanes constituent des valves pour le cœur. En ce qui concerne les fils de suture non biorésorbables, les matériaux plastiques employés sont le polypropylène (PP) et les polyamides (nylon).

Le passage aux plastiques biosourcés a été motivé par la recherche de biodégradabilité. En effet, les applications de ces matériaux consistent essentiellement en la confection de dispositifs biorésorbables. Pour la fabrication de fils de suture biorésorbables, un matériau composite a été développé : le PLGA. Le PLGA est synthétisé à partir de deux autres polymères biosourcés, le polyacide lactique (PLA) et le polyacide glycolique (PGA). Ce matériau est aussi utilisé dans l'encapsulation pour la libération contrôlée de médicaments, ainsi c'est la vitesse de dégradation du matériau qui va déterminer la vitesse de délivrance du principe actif.

1.1.5. Secteur textile

Les premières fibres synthétiques ont été utilisées à partir des années 1940. Ce sont pourtant les mêmes qui sont de nos jours employées. Ce secteur est donc moins porteur d'innovation en termes de produits. Les fibres les plus utilisées sont les polyamides, dont le nylon, et le polyéthylène téréphtalate (PET).

L'alternative biosourcée dans ce domaine est encore le PLA. En effet, ce plastique faisant partie de la même famille que le PET, présente donc des propriétés similaires. De plus, le PLA présente l'avantage d'être peu inflammable et antibactérien. La fibre textile produite trouve des applications dans l'habillement et la construction.

1.1.6. Secteur du bâtiment

Les plastiques sont également omniprésents dans le bâtiment, des revêtements de sol, plaques et tuyaux confectionnés en polychlorure de vinyl (PVC) jusqu'aux mousses d'isolation thermique en polyuréthane.

Les innovations de produits de la chimie du végétal sont encore peu présentes dans ce secteur. Il est à noter que la fibre textile en PLA présente tout de même des avantages intéressants dans le secteur de la construction pour la confection de capitonnages ou de dalles de moquettes peu inflammables.

Il apparaît alors, selon cet état des lieux, que l'innovation de produit de la chimie du végétal omniprésente dans tous ces secteurs est le polyacide lactique (PLA). En effet, il s'agit d'un des plastiques biosourcés les plus matures au niveau du procédé de production mais aussi au niveau de l'exploitation de ces propriétés.

1.2. Evolution des innovations de produits dans le domaine des plastiques pétrosourcés et biosourcés

A l'origine, l'industrie chimique était d'abord une industrie d'extraction à partir des matières premières végétales et animales. Elle devient, au milieu du XIX^{ème} siècle, une industrie de transformation du charbon puis du pétrole. Il est à noter que la première raffinerie a été montée en 1857 à Pêchebronn (Alsace), mais c'est à partir des années 1930 et surtout de la seconde guerre mondiale que l'industrie chimique assimile les procédés de fabrication de produits à partir de pétrole et que la pétrochimie devient la base de la chimie.

Les plastiques représentent un des principaux secteurs d'activité de la chimie, pourtant il s'agit de matériaux très récents. En effet, le premier polymère a été inventé en 1870 par les frères Hyatt, imprimeurs à New-York pour répondre au concours lancé par un fabricant d'accessoires pour le billard visant à remplacer l'ivoire des boules. Ce polymère est le celluloid, il s'agit d'un mélange de nitrate de cellulose et de camphre, deux substances issues de matières végétales et modifiées chimiquement. Ce matériau étant fortement inflammable, apparaît alors en 1884 l'acétate de cellulose ininflammable et également biosourcé. Ce matériau trouve des applications importantes dans le domaine textile. En 1910, Bakeland, un chimiste américain d'origine belge crée la bakélite qui est le premier plastique synthétique, tandis qu'en 1913, le premier matériau d'emballage plastique est commercialisé, la cellophane à partir de cellulose biosourcée. Les années 1920 marquent les débuts de la compréhension

moléculaire des plastiques avec les travaux de Staudinger qui reçut ainsi le prix Nobel de chimie en 1953.

A partir des années 1930, la maîtrise des procédés de production de plastique à partir du pétrole ainsi que l'amélioration des procédés de mise en forme des matériaux conduisent au démarrage de la production des familles de plastiques encore très utilisées à ce jour comme les PVC (Polychlorure de Vinyle), le polystyrène, le polyéthylène et les polyamides. Ces avancées technologiques mènent à la réduction du prix du produit fini et donc à la démocratisation de ces matériaux dans des domaines d'applications très variés : décoration intérieure, textile, l'automobile... Avec l'essor des hautes technologies (informatique, aéronautique) dans les années 1980, les plastiques s'adaptent grâce aux recherches de modulation et de contrôle des propriétés de ces matériaux.

Le retour aux plastiques biosourcés a commencé dans les années 1980. L'intérêt était alors porté sur la biodégradabilité de ces matériaux dont les plastiques pétrosourcés développés jusque-là étaient dépourvus. Pour les applications biomédicales, la biocompatibilité est une propriété fondamentale, la biodégradabilité peut s'avérer intéressante pour des produits biorésorbables et permettre ainsi d'éviter des interventions médicales supplémentaires pour les retirer.

Ensuite, c'est la problématique environnementale qui permet d'élargir le domaine d'applications de ces matériaux biosourcés. En effet, la croissance de la consommation de plastiques a mené à une augmentation du volume de déchets plastiques. Ce constat a permis d'intensifier la filière de recyclage de ces déchets, mais là encore, la recherche de biodégradabilité semblait une solution pour réduire leur volume. Toujours en ce qui concerne la problématique environnementale, les années 1990 ont vu naître la définition et l'émergence de la chimie verte et en particulier de la chimie du végétal. La chimie du végétal se présente comme une réponse au développement durable dans le domaine de la chimie car elle prône l'utilisation de ressources végétales renouvelables. C'est donc à partir de cette période que les plastiques biosourcés présentent un intérêt autre que leurs propriétés de biodégradabilité. De plus, tous les plastiques biosourcés n'étant pas biodégradables, cet intérêt grandissant pour les produits biosourcés permet l'augmentation de la gamme des plastiques issus du végétal.

Il est à noter que la pétrochimie absorbe seulement 10% de la consommation de pétrole mais souffre cependant d'une mauvaise réputation. Cette réputation est due aux accidents industriels ayant eu lieu depuis les années 1970 et dont la majorité sont liés à l'industrie chimique. En 1976, l'explosion d'un réacteur produisant des herbicides, près de Seveso (Italie), a entraîné la formation d'un nuage toxique contaminant 2000 hectares de terres. En 1984, c'est à Bhopal, en Inde, qu'une cuve de l'usine d'Union Carbide (Dow Chemicals) explose et le nuage toxique formé fera 15 000 morts et 250 000 blessés ou intoxiqués. En 2001, à l'usine d'engrais AZF à Toulouse, un stock de 300 à 400 tonnes de nitrate d'ammonium explose creusant un cratère et créant un séisme de magnitude 3,4. Cette explosion cause la mort de 30 personnes et plus de 2 500 personnes sont blessées. Enfin, en 2005, une série de trois explosions ont eu lieu au terminal pétrolier de Buncefield (Grande-Bretagne) déclenchant un incendie qui sera maîtrisé seulement deux jours plus tard.

Ces accidents industriels sont la cause de la mauvaise réputation de l'industrie chimique, mais ces catastrophes ont permis une prise de conscience menant à des réglementations pour les éviter à l'avenir. La directive « Seveso 1 » fera suite à l'accident de 1976, publiée en 1982, elle impose le recensement des établissements industriels présentant des risques d'accidents

industriels. Outre la directive Seveso, on peut citer le programme européen REACH entré en vigueur en 2007. Ce programme se déroule en plusieurs étapes, en commençant par une procédure d'enregistrement des substances chimiques utilisées par les fabricants et les importateurs, puis les procédures d'autorisation et de restriction. Ce programme vise donc à la protection de la santé et de l'environnement, par une meilleure connaissance voire une interdiction des substances chimiques, ainsi qu'à l'amélioration de la communication des acteurs de la filière. Les molécules servant de bases dans la chimie et issues du pétrole peuvent présenter une certaine toxicité. Suite au programme REACH, ces substances pourraient alors être réglementées voire interdites, on peut voir alors l'intérêt du végétal qui pourrait proposer à l'industrie chimique des molécules de base moins toxiques.

L'émergence de ces problématiques, la recherche de biodégradabilité, de ressources renouvelables et des procédés et produits plus sûrs pour l'industrie chimique dans les années 1980 et 1990 marque le début du développement d'innovations dans le domaine des plastiques biosourcés. C'est au cours des années 2000 que commence la production industrielle de ces matières plastiques. En 2011, la production mondiale de plastiques biosourcés était de 675 000 tonnes sur une production mondiale totale d'environ 280 millions de tonnes soit 0.2%. A savoir que la majorité de ces plastiques biosourcés produits sont les reproductions de plastiques pétrosourcés. Pourtant, le polyacide lactique (PLA) qui est une des innovations de produit de la chimie du végétal les plus matures, a été développé jusqu'à présenter des applications dans tous les secteurs de la plasturgie. C'est pourquoi il est important d'étudier les conditions permettant l'émergence de ces innovations et de déterminer la substituabilité des plastiques pétrosourcés par ces innovations.

2. LE DEGRE DE SUBSTITUABILITE DES PLASTIQUES ISSUS DE LA PETROCHIMIE PAR LES PLASTIQUES BIOSOURCES

Dans cette partie sera évalué le degré de substituabilité des plastiques issus de la pétrochimie par les plastiques biosourcés. Pour ce faire, la fiabilité technologique des innovations de plastiques biosourcés sera étudiée puis la faisabilité économique. L'évaluation de la substituabilité dérivera donc de la comparaison fiabilité technologique/ faisabilité économique entre produits biosourcés et plastiques pétrosourcés.

Cette évaluation de la substituabilité se fera par secteur d'applications des plastiques. L'étude sera alors réduite à deux secteurs : l'emballage et en particulier l'emballage agro-alimentaire et le biomédical. Le secteur de l'emballage a été choisi car c'est le premier débouché des plastiques, en 2012, la demande pour les plastiques d'emballage représente 39.4% de la demande totale des plastiques (source : Plastics Europe Market Research Group). Ensuite, le secteur biomédical a été sélectionné puisque, comme décrit précédemment, la recherche sur les plastiques a commencé suite à la demande de produits biorésorbables, ce qui fait du secteur biomédical un secteur émergent et prometteur pour ces innovations.

2.1. Fiabilité technologique comparée des innovations de produits de la chimie du végétal et des plastiques usuels

La fiabilité technologique de ces innovations de produits sera déterminée en fonction des propriétés nécessaires à leur usage dans le secteur concerné.

2.1.1. Secteur de l'emballage agro-alimentaire

En se restreignant aux emballages alimentaires, les innovations de la chimie du végétal à étudier sont, tout d'abord, le polyacide lactique (PLA), puis le polyéthylène furanoate (PEF). Les propriétés de ces innovations seront comparées aux performances du polyéthylène téréphtalate (PET), leur analogue pétrosourcé.

Tout comme le polyéthylène téréphtalate pétrosourcé, le polyacide lactique (PLA) possède de bonnes propriétés mécaniques : il présente une bonne rigidité ce qui en fait un bon matériau d'emballage pour la protection des aliments. De plus, ces matériaux présentent les propriétés essentielles pour l'emballage alimentaire : ils font barrière aux odeurs et arômes garantissant la qualité des produits emballés mais ils sont aussi résistants aux graisses, permettant à l'emballage de ne pas être altéré par les aliments gras contenus. Au niveau esthétique, ces trois plastiques sont transparents et facilement imprimables. Ils sont également faciles à mettre en forme ce qui est un autre avantage pour ce secteur où les emballages prennent des formes et tailles variées.

Le polyacide lactique présente des propriétés supplémentaires par rapport aux plastiques pétrosourcés. En effet, le polyacide lactique possède une meilleure perméabilité à l'eau évitant ainsi la formation de condensation sur l'emballage. C'est pourquoi ce plastique présente un avantage non négligeable pour emballer et conserver les fruits et légumes. Ensuite, ce plastique est biodégradable, ce point est non négligeable en terme de gestion en fin de vie du produit, ce qui sera traité par la suite. Sa biodégradabilité est déclenchée en fonction des conditions de l'environnement. Le polyacide lactique n'est pas biodégradable à 25 °C (température ambiante), cependant sa qualité n'est pas garantie sur le long terme en présence d'humidité, c'est pourquoi il ne peut pas encore remplacer le polyéthylène téréphtalate dans la confection de bouteilles.

Outre ce problème de biodégradabilité, le polyéthylène téréphtalate et le polypropylène présentent d'autres performances que le polyacide lactique n'atteint pas encore. Le polyéthylène téréphtalate est particulièrement résistant aux chocs et à la pression interne, ce qui explique son utilisation pour la fabrication de bouteilles et notamment les bouteilles de boissons gazeuses. De plus, grâce à sa bonne résistance aux températures, le polyéthylène téréphtalate peut être utilisé pour des emballages adaptés au four micro-onde.

Ainsi, le polyacide lactique possède des propriétés intéressantes pour en faire un plastique usuel pour les emballages alimentaires cependant ses propriétés ne lui permettent pas actuellement de couvrir toutes les applications de ce secteur contrairement au polyéthylène téréphtalate. Une autre innovation de produit biosourcé est en cours de développement et n'est pas encore commercialisé, il s'agit du polyéthylène furanoate (PEF). En effet, cette innovation semble prometteuse car présente une structure assez similaire à celle du polyéthylène téréphtalate car faisant partie de la même famille de polymères : les polyesters.

Cette innovation de produit, le polyéthylène furanoate, est développé grâce à la prise de participation des acteurs du secteur agro-alimentaire. En effet, les groupes The Coca-Cola Company et Danone sont actionnaires de la société Avantium qui annonce la mise en place d'une unité de production pour 2017. La prise de participation des acteurs concernés permet d'orienter les recherches vers les propriétés recherchées dans le domaine des emballages agro-alimentaires.

Le développement de ce plastique semble déjà engageant. En effet, il est plus rigide que le polyéthylène téréphtalate. Il présente également de meilleures propriétés de barrière à l'oxygène et au dioxyde de carbone permettant une meilleure conservation des aliments.

2.1.2. Secteur biomédical

Dans le secteur biomédical, les plastiques sont essentiellement utilisés dans la fabrication de fils de suture et d'agrafes. En ce qui concerne les prothèses, celles-ci sont principalement constituées de métaux, seules certaines pièces sont en plastique. Enfin pour ce qui est de la libération contrôlée de médicaments, cette application n'est envisagée seulement depuis le développement des plastiques biosourcés comme le polyacide lactique. Donc, pour cette étude de substituabilité, seuls les fils de suture et agrafes seront pris en compte.

C'est la recherche de propriété de biorésorbabilité qui a motivé l'émergence des innovations de plastiques biosourcés pour la confection d'agrafes et de fils de suture. La principale innovation dans ce secteur est le PLGA, matériau composite synthétisé à partir de polyacide lactique (PLA) et de polyacide glycolique (PGA). L'utilisation d'un matériau composite est ici nécessaire, en effet, le polyacide lactique étant trop hydrophobe, il doit être combiné pour diminuer cette particularité. De plus, ces deux plastiques, biodégradables, n'ont pas la même vitesse de dégradation. Ainsi la proportion de chaque polymère dans le matériau final permet d'en moduler le temps de résorption.

Ces fils de suture et agrafes biorésorbables sont utilisés pour la majorité des sutures internes et pour les sutures externes dans des zones peu accessibles (par exemple, le cuir chevelu). L'utilisation de ces dispositifs évite une seconde intervention médicale. Cependant, il y a toujours un besoin pour les fils de suture non biorésorbables. C'est le cas pour les sutures des tissus vasculaires ne cicatrisant pas. Enfin, dans certaines situations, les sutures biorésorbables ne peuvent être utilisées, leur temps de dégradation étant inférieur au temps de cicatrisation de la plaie. Il y a donc encore des recherches à effectuer quant au contrôle de la vitesse de biodégradation.

2.2. Faisabilité économique des innovations de produits de la chimie du végétal

Afin d'étudier la faisabilité économique de ces innovations de produits, deux principaux points doivent être abordés. Le premier point concerne le mode de production du plastique et les différents facteurs qui vont en déterminer le prix. Ensuite, le devenir du produit en fin de vie ainsi que son apport environnemental participent au coût indirect du produit et doivent être intégrés à l'étude.

2.2.1. Secteur de l'emballage agro-alimentaire

Le prix du polyacide lactique (PLA) est actuellement de trois à quatre fois supérieur à celui du polyéthylène téréphtalate (PET) et celui du polypropylène (PP). Plusieurs facteurs permettent d'expliquer cet effet.

Dans un premier temps, les procédés de production du polyéthylène téréphtalate et du polypropylène ont été mis au point après la seconde guerre mondiale alors que le polyacide lactique a été commercialisé pour la première fois en 2002. Cette industrialisation a fait suite à des programmes de recherche et développement ayant durés plus d'une dizaine d'années. Il y a donc un effet d'amortissement des coûts de R&D intégré dans le prix du PLA.

Ensuite, le PLA est majoritairement produit par voie biotechnologique et non pas par voie chimique. Cette voie présente des avantages comme la mise en place de procédés dans des conditions plus douces en termes de température et de pression et un meilleur rendement du procédé. Ces deux aspects permettent en effet de réduire les coûts de production à long terme. Cependant, il s'agit de procédés nouveaux pour l'industrie chimique et plasturgique nécessitant du personnel qualifié. Les investissements à la mise en place de ces procédés impactent donc également le prix du PLA.

Concernant le devenir en fin de vie, il existe trois options pour les déchets plastiques : le recyclage, la valorisation énergétique (essentiellement par la combustion) et la mise en décharge. Dans le cadre d'une optique de réduction des déchets, ce sont les deux premières options qui doivent être privilégiées. Le PLA n'étant pas recyclable, l'autre solution serait la valorisation énergétique grâce au compostage du matériau, or il n'existe pas de filière de collecte et de compostage de ce type de produit. Le devenir du PLA ne peut alors qu'être l'incinération. De ce point de vue, l'apport environnemental du PLA par rapport au polyéthylène téréphtalate n'est pas concluant.

Le caractère biosourcé du PLA présente alors un autre avantage environnemental par l'utilisation de ressources renouvelables. Cependant, de récentes recherches ont permis de mettre au point du polyéthylène téréphtalate en partie biosourcé. En effet, ce plastique est synthétisé à partir d'éthylène glycol et d'acide téréphtalique. L'éthylène glycol qui était jusque-là pétrosourcé, peut maintenant être produit à partir de biomasse. Mais il n'existe pas encore de possibilité de produire de l'acide téréphtalique biosourcé. Le polyéthylène téréphtalate peut alors être jusqu'à 30 % biosourcé maximum et des recherches sont en cours pour augmenter ce pourcentage. De plus, ce plastique est toujours recyclable permettant une meilleure gestion en fin de vie que pour le PLA.

Donc, au niveau de la fiabilité technologique, le PLA présente de bonnes propriétés pour un emballage agro-alimentaire cependant ses performances n'atteignent pas encore celles du plastique de référence dans ce domaine, le polyéthylène téréphtalate (PET). De plus, son prix est encore bien supérieur à celui du PET. Le facteur déterminant réside donc dans l'apport environnemental du produit. Au niveau des options de fin de vie, là encore le PET est bien plus intéressant que le PLA car recyclable. Enfin, la dernière particularité du PLA est son origine 100 % végétale mais là aussi, le PET tend à devenir biosourcé. Donc la substituabilité du PET par le PLA semble compromise sauf dans des cas particuliers où les propriétés du PLA prendront le dessus.

C'est pourquoi il faut alors s'intéresser au cas du polyéthylène furanoate (PEF). Ce matériau est fiable technologiquement car présente des propriétés similaires voire supérieures à celles du PET. De plus, ce plastique 100 % biosourcé peut être recyclé, tout comme le PET, sous forme de fibre textile. Il pourra alors s'intégrer dans les filières existantes de traitement des déchets. Le dernier point est le prix qui n'est pas encore connu puisque ce matériau n'est pas encore commercialisé mais il est à supposer que son prix sera dans un premier temps plus élevé que celui du PET afin d'amortir les investissements. La substitution est alors envisageable à long terme.

2.2.2. Secteur biomédical

Le prix des fils de sutures résorbables en PLGA sont actuellement jusqu'à deux fois plus élevés que ceux des sutures non résorbables en polypropylène (PP) ou polyamide (nylon). Là

encore, cette différence se justifie par les technologies mises en jeu dans les procédés de production. Cependant, ce coût supplémentaire est amorti à l'usage par rapport au coût d'une seconde intervention devenue inutile.

L'aspect environnemental a moins d'impact dans ce secteur. En effet, le secteur biomédical représente seulement 1 % de la consommation mondiale de plastique. De plus, ce domaine est moins générateur de déchet puisque les sutures résorbables sont absorbées par le corps et les sutures non résorbables sont laissées en place dans le cas des tissus non cicatrisables.

La substitution ne peut pas être totale dans ce domaine car les sutures non résorbables seront toujours indispensables et que le faible impact environnemental de ce secteur ne permet pas de pousser la substitution de ces sutures par des sutures biosourcées non résorbables. Néanmoins, cette substitution peut être augmentée grâce à un meilleur contrôle des temps de dégradation puisque dans certains cas l'utilisation des sutures non résorbables se justifie par un temps de cicatrisation plus élevé que les temps de dégradation des sutures biosourcées.

CONCLUSION

C'est l'apparition de la problématique du développement durable qui a permis l'émergence de la chimie verte et de la chimie du végétal. La chimie du végétal a proposé à partir des années 2000 des innovations de produits dans tous les secteurs de l'industrie chimique et notamment la plasturgie. Parmi ces innovations, on peut en noter une qui trouve des applications dans tous les domaines de la plasturgie, il s'agit du polyacide lactique (PLA).

Les conditions permettant la substituabilité des innovations de la chimie du végétal sont classées dans trois catégories : technique, économique et environnementale.

Dans beaucoup de domaines, au niveau technique, le développement de ces innovations s'est basé sur la biodégradabilité paraissant, en premier lieu, un bon moyen de réduire le volume des déchets. Cependant les propriétés des plastiques biosourcés n'atteignent pas encore les performances de leurs analogues pétrosourcés. Au niveau économique, les prix de ces innovations sont encore bien plus élevés que ceux des plastiques pétrosourcés, essentiellement parce que le prix comprend l'amortissement des coûts de R&D. L'analyse des aspects techniques et économiques ne permet pas d'expliquer totalement pourquoi ces innovations de plastiques se développent. C'est pourquoi il est important d'intégrer l'aspect environnemental. Cet aspect environnemental comprend pour ce type d'innovations, la proportion de ressources renouvelables qui le constitue mais aussi le devenir en fin de vie du plastique.

Dans le cas du secteur de l'emballage, le polyacide lactique, une innovation plus mature qui paraît prometteuse, ne se distingue pas par son aspect environnemental par rapport à son analogue pétrosourcé, le polyéthylène téréphtalate. Néanmoins, la mise en évidence des défauts du PLA a permis d'orienter la recherche vers d'autres innovations qui devraient pallier à ces défauts comme le polyéthylène furanoate (PEF). Les premières innovations de produits aux avantages discutables comme le PLA ont alors peut-être pour ambition d'être des amorceurs des prochaines innovations de produit du secteur.

Ensuite, les conditions permettant la substituabilité dépendent du secteur et de ses motivations puisque tous les secteurs n'ont pas la même structure technologique, économique et environnementale. Dans le secteur de l'emballage qui est le premier secteur d'application des

plastiques et donc un des principaux secteurs producteur de déchets, c'est l'aspect environnemental de ces innovations qui sera prioritaire. Dans le secteur biomédical très exigeant quant à la qualité des produits et peu producteur de déchet, c'est l'aspect technologique qui prendra l'avantage.

Donc pour une étude plus globale des innovations de la chimie du végétal, il serait intéressant, tout d'abord, d'effectuer une classification des différents secteurs de l'industrie chimique selon les critères technologiques, économiques et environnementaux. Cette classification permettra alors de sélectionner les innovations de produits les plus adaptées à chaque secteur et de les améliorer en fonction des contraintes de ce même secteur.

BIBLIOGRAPHIE

Association Chimie du Végétal, <http://www.chimieduvegetal.com/GERI%20%282%29.asp>, accédé le 15/11/2014.

ADEME, (2010), *Panorama et potentiel de développement des bioraffineries*, Ademe.

ADEME, (2011), *Feuille de route R & D de la filière Chimie du végétal*, Ademe.

ADEME, (2011), *Les plastiques biosourcés*, Ademe.

ADEME, <http://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/produits-biosources>, accédé le 16/11/14.

ADEME, <http://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/produits-biosources/passer-a-l'action/dossier/valorisation-fin-vie/problematiques-gestion-produits-biosources-fin-vie>, accédé le 16/11/14.

Avebe, <http://www.avebe.com/>, accédé le 20/11/14.

CNRS, <http://www.ihtp.cnrs.fr/spip.php%3Farticle316&lang=fr.html>, accédé le 14/11/2014.

COLONNA, P., (2006), *La Chimie Verte*, Paris, Editions Tec & Doc, Lavoisier.

Commissariat général du développement durable, (2013), l'activité de la pétrochimie en France, Données 2012, <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/CS477.pdf>, accédé le 20/11/14.

DEFOSSEZ, E., SAVOURE, M.-L., SCHEURER, O. (2011). Evaluer le potentiel de cultures biomasse des exploitations. *Travaux & Innovations*, pp. 13–17.

European Bioplastics, <http://en.european-bioplastics.org/market/>, accédé le 20/11/14.

France Green Plastics, <http://www.plastipolis.fr/francegreenplastics/index.html>, accédé le 16/11/14.

GARNIER, E., DEBREF, R. (2014). Les divergences au sein de la composante technico-scientifique du nouveau système sectoriel d'innovation de la chimie doublement verte. *Innovations*, 43, 39–59.

IFP Energies Nouvelles, <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-grands-debats/Quel-avenir-pour-le-petrole/L-evolution-de-la-demande-energetique>, accédé le 20/11/14.

KOICHI, K., HORIKOSHI, Y. (2005). Bio-based polymers. *Fujitsu Sci. Tech. J*, 173–180.

LATIEULE, S., (2013), Danone teste l'utilisation de matériaux biosourcés dans ses emballages alimentaires, *Formule Verte*, 09/08, <http://formule-verte.com/danone-teste-lutilisation-de-materiaux-biosources-dans-ses-emballages-alimentaires/>, accédé le 18/11/14.

LATIEULE, S., (2014), PEF : Avantium lève 36 millions d'euros, *Formule Verte*, 06/06, <http://formule-verte.com/pef-avantium-leve-36-millions-deuros/>, accédé le 30/12/14.

MARK, J. E. (1999) *Polymer data handbook*, Oxford University Press.

NatureWorks, <http://www.natureworksllc.com/About-NatureWorks>, accédé le 18/11/14

Novamont, <http://www.novamont.com/default.asp?id=1815>, accédé le 20/11/14.

Pôle IAR, <http://www.iar-pole.com/>, accédé le 16/11/14.

PlasticsEurope, <http://www.plasticseurope.fr/decouvrez-le-plastique/historique.aspx>, accédé le 14/11/2014.

PlasticsEurope, (2012). *Plastiques 2012 – Faits et chiffres Analyse de la production et de la demande en plastiques & de la gestion des déchets en Europe en 2011*, PlasticsEurope, Bruxelles.

Polymer innovation blog, <http://polymerinnovationblog.com/polyethylene-furanoate-pef-100-biobased-polymer-to-compete-with-pet/>, accédé le 15/01/14.

Service national d'assistance réglementaire REACH, <http://reach-info.ineris.fr/reach> en détail, accédé le 21/11/14.

Société Chimique de France, <http://www.societechimiquedefrance.fr/fr/premiere-partie-les-polymeres-avant-staudinger.html>, accédé le 14/11/2014.

Techniques de l'ingénieur, (2011), Les catastrophes industrielles qui ont éveillé les consciences, http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/environnement-thematique_191/diaporama-les-catastrophes-industrielles-qui-ont-eveille-les-conscienc-article_63614/, accédé le 21/11/14.

VINK, E. T. H., RABAGO, K. R., GLASSNER, D. A., GRUBER, P. R. (2003). Applications of life cycle assessment to NatureWorksTM polylactide (PLA) production. *Polymer Degradation and Stability*, 80(3), 403–419.

VINK, E. T. H., RABAGO, K. R., GLASSNER, D. A., SPRINGS, B., O'CONNOR, R. P., KOLSTAD, J., & GRUBER, P. R. (2004). The sustainability of NatureWorks polylactide polymers and Ingeo polylactide fibers: an update of the future. *Macromolecular Bioscience*, 4(6), 551–64.

WILS, C. (2013). La chimie verte: une nouvelle industrie de substitution. *Cahiers Du Lab.RII*, 263, 1–13.