

SYNTHESE / EXTENDED ABSTRACT
FRANÇAIS / ENGLISH

**PLASTIQUES BIOSOURCES ET/OU BIODEGRADABLES
EN FIN DE VIE
CONDITIONS ET CONSEQUENCES SUR
LEUR VALORISATION DANS LES FILIERES ACTUELLES
DE VALORISATION DES DECHETS**

***END OF LIFE BIOBASED AND/OR BIODEGRADABLE PLASTICS
CONDITIONS AND CONSEQUENCES ON THEIR RECOVERY
IN CURRENT WASTE RECOVERY SECTORS***

novembre 2020

Créée à l'initiative du Ministère en charge de l'Environnement, l'association RECORD est depuis 1989, le catalyseur d'une coopération entre industriels, institutionnels et chercheurs.

Acteur reconnu de la recherche appliquée dans le domaine des déchets, des sols pollués et de l'utilisation efficace des ressources, RECORD a comme objectif principal le financement et la réalisation d'études et de recherches dans une perspective d'économie circulaire.

Les membres de ce réseau (groupes industriels et institutionnels) définissent collégialement des programmes d'études et de recherche adaptés à leurs besoins. Ces programmes sont ensuite confiés à des laboratoires publics ou privés.

Avertissement :

Les rapports ont été établis au vu des données scientifiques et techniques et d'un cadre réglementaire et normatif en vigueur à la date de l'édition des documents.

Ces documents comprennent des propositions ou des recommandations qui n'engagent que leurs auteurs. Sauf mention contraire, ils n'ont pas vocation à représenter l'avis des membres de RECORD.

- ✓ Pour toute reprise d'informations contenues dans ce document, l'utilisateur aura l'obligation de citer le rapport sous la référence :
RECORD, Plastiques biosourcés et/ou biodégradables en fin de vie. Conditions et conséquences sur leur valorisation dans les filières actuelles de valorisation des déchets, 2020, 281 p, n°18-0916/1A
- ✓ Ces travaux ont reçu le soutien de l'ADEME (Agence de la transition écologique)
www.ademe.fr

© RECORD, 2020

RESUME

La demande industrielle de plastiques biosourcés et/ou biodégradables augmente au fil de la prise de conscience de la nécessité de développer une société moins dépendante des ressources fossiles. De nouveaux produits sont développés pour répondre à la demande de production de biens de consommation et d'équipements, tout en satisfaisant les exigences réglementaires et sociétales. La diversification des matières plastiques nécessite de prendre en considération leur intégration dans les filières actuelles de traitement et de valorisation des déchets solides : filières de recyclage mécanique, filières biologiques de valorisation matière et/ou énergie (compostage, méthanisation) et filières pouvant être amenées à se développer en se basant sur du recyclage chimique et biochimique. Basée sur une revue détaillée de la littérature scientifique et technique, cette étude a pour objectif d'identifier les conséquences de la présence de plastiques biosourcés et/ou biodégradables dans les filières de traitement des déchets solides. Il conviendra de cerner les enjeux de recherche et développement technologique favorisant leur intégration effective dans les filières actuelles et futures de valorisation circulaire des ressources.

MOTS CLES

Polymère, biosourcé, biodégradable, valorisation, filière de traitement, gestion des déchets, fin de vie, recyclage matière, recyclage chimique, recyclage biochimique, compostage, méthanisation

SUMMARY

The industrial demand for biobased and/or biodegradable plastics is increasing because of the need to develop a society that is less dependent on fossil resources. New products are developed to meet the demand for production of consumer goods and equipment as well as to meet regulatory and societal demands. Diversification of bioplastics requires consideration of their integration into current (and future) processes for the treatment and recovery of solid waste: mechanical recycling, chemical recycling, biological recovery of material and / or energy (composting, anaerobic digestion). Based on a detailed review of the scientific and technical literature, this study aims at identifying the consequences of the presence of biobased and/or biodegradable plastics in the solid waste treatment sectors and to identify research and development issues favoring their effective integration into current and future value chains of circular resources.

KEY WORDS

Polymer, biobased, biodegradable, valorization, treatment process, waste management, end of life, mechanical recycling, chemical recycling, organic recycling, composting, anaerobic digestion

Contexte de l'étude

Dans un contexte soutenu de développement de la gestion circulaire des ressources exploitées et consommées dans nos systèmes économiques, l'offre et la demande industrielle croissante de plastiques biosourcés et/ou biodégradables nécessitent de prendre en considération l'usage et le devenir de tels produits en fin de vie. La prise de conscience de l'épuisement des ressources naturelles, le réchauffement climatique et l'accumulation des plastiques dans l'écosystème expliquent en grande partie la demande croissante de plastiques biosourcés en Europe. Bien que ne représentant que 2% de la capacité de production totale en 2018, leur pénétration progressive du marché nécessite de les intégrer dans les filières de gestion des déchets.

Si les avantages sont bien identifiés et largement mis en valeur dans le développement commercial de l'offre, la fin de vie contrôlée des plastiques biosourcés et/ou biodégradable est une problématique encore non résolue. C'est d'autant plus nécessaire dans un contexte réglementaire où les acteurs concernés sont réglementairement contraints de développer des solutions techniques de recyclage des plastiques, qu'ils soient biosourcés ou non.

La diversification de l'offre de plastiques biosourcés et/ou biodégradables nécessite en effet de prendre en considération les filières actuelles de traitement et de valorisation des déchets solides : plusieurs retours d'expériences mettent en évidence les difficultés de tri-séparation des plastiques biosourcés en minorité dans un flux d'emballage à recycler et l'absence de filière de valorisation pour les plastiques biosourcés constitués de polymères à structure innovante.

Objectif et plan de l'étude

Basée sur une revue détaillée de la littérature scientifique, rapports techniques et échanges avec les acteurs du secteur, cette étude réalise un état de l'art des connaissances scientifiques et techniques sur l'intégration des plastiques biosourcés et/ou biodégradables dans les filières actuelles de gestion des déchets solides. Les filières abordées sont le recyclage mécanique, les traitements biologiques (compostage, méthanisation) et deux filières en cours de développement : le recyclage chimique et le recyclage enzymatique. Les filières de valorisation thermique et le stockage ultime sont abordés, mais peu détaillés dans la mesure où les conditions de traitement thermique des plastiques biosourcés ne diffèrent pas de celles des plastiques conventionnels, très majoritairement pétrosourcés et non biodégradables.

Le rapport s'organise en quatre parties :

La première partie présente les plastiques biosourcés, biodégradables ou non. Nous avons choisi de considérer également les plastiques pétrosourcés et biodégradables dans cette étude. Cette première partie permet de disposer des informations techniques sur les principaux plastiques biosourcés, biodégradables ou pas, produits pétrosourcés biodégradables actuellement disponibles sur le marché, ou en cours de développement.

La seconde partie concerne les « *Filières de gestion des déchets plastiques* ». Elle précise les différentes filières de traitement et de valorisation impliquant des flux de matières plastiques au sens large, c'est-à-dire les plastiques pétrosourcés ou biosourcés, biodégradables ou pas, et présente la situation actuelle du traitement des plastiques, selon

Context of the study

In a sustained context of development of the circular management of the resources exploited and consumed in our economic systems, the growing industrial supply and demand for biobased and / or biodegradable plastics require consideration of the use and fate of such products in end of life. The awareness of the depletion of natural resources, global warming and the accumulation of plastics in the ecosystem largely explain the growing demand for bio-based plastics in Europe. Although representing only 2% of total production capacity in 2018, their gradual market penetration requires their integration into waste management options.

While the advantages are well identified and widely highlighted in the commercial development of the offer, the controlled end of life of biobased and / or biodegradable plastics is a still unresolved issue. This is all the more necessary in a regulatory context where the actors concerned are legally obliged to develop technical solutions for recycling plastics, whether or not they are biobased.

The diversification of the supply of biobased and / or biodegradable plastics indeed requires to take into account the current options of treatment and recovery of solid waste: several feedbacks highlight the difficulties of sorting-separation of biobased plastics in a minority in a packaging flow to be recycled and the absence of a recovery option for biobased plastics made from polymers with an innovative structure.

Objective and tasks of the study

Based on a detailed review of the scientific literature, technical reports and discussions with stakeholders in the sector, this study provides a state of the art of scientific and technical knowledge on the integration of biobased and / or biodegradable plastics in current sectors of solid waste management. The sectors covered are mechanical recycling, biological treatments (composting, anaerobic digestion) and two sectors under development: chemical recycling and enzymatic recycling. Thermal recovery and ultimate storage are discussed, but not very detailed insofar as the heat treatment conditions for biobased plastics do not differ from those for conventional plastics, the vast majority of which are petroleum-based and non-biodegradable.

The report is organized into four sections:

The first section presents bio-based plastics, biodegradable or not. We have chosen to consider also petroleum-based and biodegradable plastics in this study. This first part provides technical information on the main biobased plastics, biodegradable or not, biodegradable petroleum products currently available on the market, or under development.

The second section concerns "Plastic waste management options". It specifies the different treatment and recovery options involving flows of plastics in the broad sense, that is to say petroleum-based or bio-based plastics, biodegradable or not, and presents the actual situation of the treatment of plastics, according to their source (origin, use), their collection conditions (separate or mixed) and according to their purpose (material recovery, energy recovery, ultimate storage). It also describes two promising sectors, but still under development, chemical recycling and biochemical (or enzymatic) recycling.

leur source (origine, usage), leurs conditions de collecte (séparée ou en mélange) et selon leur finalité (valorisation matière, valorisation énergétique, stockage ultime). Elle décrit également deux filières prometteuses, mais toujours en cours de développement, le recyclage chimique et le recyclage biochimique (ou enzymatique).

L'analyse des usages et des fins de vie des plastiques biosourcés et/ou biodégradables dans les filières de valorisation est présentée dans la troisième partie « *Intégration des plastiques biosourcés et/ou biodégradables dans les filières de gestion des déchets* ». Il s'agit de préciser les principaux scénarii de fin de vie en fonction des usages des polymères biosourcés et/ou biodégradables, d'analyser les connaissances scientifiques et, dans la mesure du possible, d'identifier les conséquences potentielles de leur présence au sein de ces filières en termes de perturbation/contamination des flux (notamment de recyclage), d'optimisation des techniques de tri, et de faisabilité technique de leur recyclage. Cette partie se concentre sur des polymères thermoplastiques biosourcés et/ou biodégradables déjà disponibles sur le marché tels que PLA et PBAT, ainsi que sur PBS, PHAs, PEF, mélanges à base d'amidon ou de cellulose

La dernière partie de l'étude est consacrée à la synthèse des enjeux techniques et de recherche dans le développement des plastiques biosourcés et/ou biodégradables, dans la perspective de leur intégration effective dans les filières actuelles et futures voies de valorisation circulaire des ressources.

Plusieurs annexes complètent ce rapport dont :

- La synthèse des réglementations Européenne et Française en lien avec la gestion des déchets et des plastiques ;
- Les définitions associées aux filières de gestions des déchets, à la biodégradation, et à la gestion de la fin de vie des plastiques ;
- La présentation des mécanismes de biodégradation des polymères ;
- La présentation des principales normes associées aux polymères biosourcés et/ou biodégradables ;
- Les fiches techniques sur les principaux polymères biosourcés.

Principaux résultats obtenus

Plastiques biosourcés et pétrosourcés, biodégradables ou non

Sur une production mondiale de près 350 Mt en 2019, dont 40 % pour la production d'emballages, les plastiques biosourcés et/ou biodégradables représentaient 0,6 % de la production globale de matières plastiques, soit 2,1 Mt (European Bioplastics 2019), avec un taux de croissance annuel moyen de 4 % jusqu'en 2024. Ils sont classés en deux familles : ceux ayant une analogie de structure stricte avec les plastiques conventionnels, aussi appelés polymères « *drop-in* », tels que le « bio-PET » ou le « bio-PE », non biodégradable ; et ceux ayant une structure nouvelle comme le polyacide lactique (PLA), le polybutylène-succinate (PBS) ou les polyhydroxyalcanoates (PHAs), En 2018, et à l'exclusion des époxy, des polyuréthanes et des acétates de cellulose, les capacités de production principales étaient majoritairement destinées aux polymères *drop-in* et non biodégradables, tels que le « bio-PET », plus facilement intégrables dans le marché actuel car destinés aux mêmes usages que leurs équivalents pétrosourcés. La capacité de production de polymères biosourcés la plus importante en 2018 est celle dédiée aux Polyuréthanes (PUR), suivie par l'acétate de cellulose et les résines époxy

The analysis of the uses and end of life of biobased and / or biodegradable plastics in recovery channels is presented in the third section "Integration of biobased and / or biodegradable plastics in waste management". This involves specifying the main end of life scenarios according to the uses of biobased and / or biodegradable polymers, analyzing scientific knowledge and, as far as possible, identifying the potential consequences of their presence within these sectors in terms of disruption / contamination of flows (especially recycling), optimization of sorting techniques, and technical feasibility of their recycling. This part focuses on bio-based and / or biodegradable thermoplastic polymers already available on the market such as PLA and PBAT, as well as on PBS, PHAs, PEF, blends based on starch or cellulose.

The last section of the study is devoted to the synthesis of the technical and research issues in the development of biobased and / or biodegradable plastics, with a view to their effective integration into current and future pathways for circular resource development.

Several appendices complete this report, including:

- The synthesis of European and French regulations related to the management of waste and plastics;
- Definitions associated with waste management, biodegradation, and end-of-life management of plastics;
- Presentation of the biodegradation mechanisms of polymers;
- Presentation of the main standards associated with biobased and / or biodegradable polymers;
- Technical sheets on the main biobased polymers.

Main results obtained

Bio-based and petroleum-based plastics, biodegradable or not

Out of a worldwide production of nearly 350 Mt in 2019, of which 40% for the production of packaging, biobased and / or biodegradable plastics represented 0.6% of the global production of plastics, or 2.1 Mt (European Bioplastics 2019), with an average annual growth rate of 4% until 2024. They are classified into two families: those having a strict structural analogy with conventional plastics, also called "drop-in" polymers, such as "bio -PET" or "bio-PE", not biodegradable; and those having a new structure such as poly lactic acid (PLA), polybutylene succinate (PBS) or polyhydroxyalkanoates (PHAs),.... In 2018, and excluding epoxies, polyurethanes and cellulose acetates, the main production capacities were mainly intended for drop-in and non-biodegradable polymers, such as "bio-PET", which are more easily integrated into the current market because intended for the same uses as their petro-sourced equivalents. The most important production capacity of biobased polymers in 2018 is that dedicated to Polyurethanes (PUR), followed by cellulose acetate and epoxy resins and, to a lesser extent, drop-in polymers: "bio-PET", "Bio-PE" and finally, PLA.

Regarding biobased and biodegradable polymers with a new structure, starch-based blends and PLA dominate the market with, respectively, 18% and 10% of global production capacities. The major application of these innovative polymers remains in the food-packaging sector, followed by single-use bags and mulch films for the agricultural sector. Bio-based polymers can be classified according to the initial resource, namely polymers produced directly from organic

puis, dans une moindre mesure, les polymères *drop-in* : « bio-PET », « bio-PE » et finalement, le PLA.

Concernant les polymères biosourcés et biodégradables à structure nouvelle, les mélanges à base d'amidon ainsi que le PLA dominent le marché avec, respectivement, 18 % et 10 % des capacités mondiales de production. L'application majeure de ces polymères innovants reste le secteur des emballages alimentaires, suivie par les sacs à usage unique et les films de paillage pour le secteur agricole.

Les polymères biosourcés peuvent être classés selon la ressource initiale, à savoir les polymères directement produits à partir de matières organiques issues du vivant (et renouvelables) – éventuellement modifiés chimiquement ou comprenant des additifs pour modifier leurs propriétés – et les polymères synthétisés à partir de molécules issues de matières organiques renouvelables telles que les sucres.

Déchets plastiques et filières actuelles de gestion des déchets

Qu'ils soient présents dans les déchets ménagers ou bien dans les déchets des entreprises et administrations, les déchets plastiques pétro-sourcés et bio-sourcés, biodégradables ou pas, seront présents dans ces deux principaux flux de déchets : déchets collectés par les municipalités et déchets collectés auprès des entreprises et des administrations (déchets d'emballages plastiques, déchets plastiques hors emballages). Les déchets plastiques générés en post-consommation sont à traiter selon trois situations distinctes, selon les usages des produits plastiques et les conditions de collecte après usage :

Situation 1 : Gestion des plastiques en mélange avec d'autres déchets. C'est le cas des plastiques présents dans les Ordures Ménagères Résiduelles (OMR). Cela concerne les déchets plastiques qui ne sont pas séparés à la source auprès des ménages et PME, c'est-à-dire les pots, barquettes, films et sacs en plastique, malgré l'extension des consignes de tri dans les zones où elle est mise en œuvre, et dont la généralisation à l'ensemble du territoire est prévue en 2022 ;

Situation 2 : Gestion des plastiques issus d'opérations de collectes sélectives. Cela concerne les déchets plastiques ayant bénéficié d'une collecte spécifique des fractions recyclables auprès des particuliers : déchets municipaux avec tri à la source concernant les bouteilles et flacons en plastique : collecte en porte-à-porte – poubelle jaune - 20% ; collecte en point d'apport volontaire – déchèteries - 29% des DM produits) ; et déchets collectés auprès des entreprises et des administrations. C'est la gestion des plastiques « post-collecte sélective », plastiques dédiés au recyclage matière, filières actuelles comme le recyclage mécanique, ou filières en développement ;

Situation 3 : Gestion des plastiques dans un flux de déchets organiques collectés à la source. Cette situation correspond au cas où les plastiques sont involontairement présents (plastiques conventionnels) ou volontairement collectés (plastiques potentiellement biodégradables) dans un gisement de déchets organiques fermentescibles orientés vers une filière de valorisation/recyclage organique. Les biodéchets se définissent réglementairement comme les « déchets biodégradables de jardins ou de parcs, déchets alimentaires ou de cuisine issus des ménages, des restaurants, des traiteurs ou des magasins de vente au détail, déchets comparables provenant des usines de transformation de denrées alimentaires ». Cette situation concerne principalement des biodéchets collectés en porte-à-porte ou collectés en point d'apport volontaire, les biodéchets traités en gestion décentralisée (gestion domestique, gestion de quartier).

materials from living organisms (and renewable) - possibly chemically modified or comprising additives to modify their properties - and polymers synthesized from molecules from renewable organic materials such as sugars.

Plastic waste and actual waste management options

Whether present in household waste or in waste from companies and administrations, petro-sourced and bio-sourced plastic waste, biodegradable or not, will be present in these two main waste streams: waste collected by municipalities and waste collected from businesses and administrations (plastic packaging waste, plastic waste excluding packaging). Plastic waste generated post-consumer must be treated in three distinct options, depending on the uses of plastic products and the conditions of collection after use:

Option 1: *Management of plastics mixed with other waste. This is the case with plastics found in Residual Municipal Solid Waste (RMSW). This concerns plastic waste that is not separated at source from households and professional activities, that is to say pots, trays, films and plastic bags, despite the extension of sorting instructions in areas where it is being implemented, and the generalization of which to the whole of the territory is scheduled for 2022;*

Option 2: *Management of plastics from selective collection operations. This concerns plastic waste that has benefited from a specific collection of recyclable fractions from individuals: municipal waste with sorting at source for plastic bottles and flasks: door-to-door collection - yellow bin - 20%; collection at a voluntary drop-off point - waste collection centers - 29% of MD produced); and waste collected from businesses and administrations. This is the management of "post-selective collection" plastics, plastics dedicated to material recycling, current sectors such as mechanical recycling, or sectors in development;*

Option 3: *Management of plastics in an organic waste stream collected at the source. This situation corresponds to the case where plastics are unwittingly present (conventional plastics) or intentionally collected (potentially biodegradable plastics) in a fermentable organic waste deposit oriented towards an organic recovery / recycling channel. Biowaste is defined by regulations as "biodegradable waste from gardens or parks, food or kitchen waste from households, restaurants, caterers or retail stores, comparable waste from food processing plants". This situation mainly concerns bio-waste collected door-to-door or collected at voluntary drop-off points, bio-waste treated under decentralized management (household management, district management).*

Biobased and / or biodegradable plastics in waste management options

Although representing only 2% of total production in 2018 (European Bioplastics 2019), the development of the supply of biobased and / or biodegradable plastics will lead them to find themselves more and more frequently and in increasing quantities in the flow of waste to be treated. Biobased and biodegradable polymers are mainly found in short-term uses such as food packaging, sackcloth, and agriculture (mulch films).

In the case of drop-in polymers, the analogy of chemical structure with existing polymers does not lead to new use a priori. Their end-of-life treatment will not be different from

Plastiques biosourcés et/ou biodégradables dans les filières actuelles

Bien que ne représentant que 2% de la production totale en 2018 (European Bioplastics 2019), le développement de l'offre de plastiques biosourcés et/ou biodégradables les amènera à se retrouver de plus en plus fréquemment et en quantités croissantes dans les flux de déchets à traiter. Les polymères biosourcés et biodégradables se retrouvent majoritairement dans des usages à durée courte comme l'emballage alimentaire, la sacherie, et l'agriculture (films de paillage).

Dans le cas des polymères *drop-in*, l'analogie de structure chimique avec les polymères déjà existants n'entraîne a priori pas de nouvel usage. Leur traitement de fin de vie ne sera pas différent de leurs équivalents pétrosourcés, en particulier dans la filière de recyclage mécanique. Les polymères biosourcés et /ou biodégradables à structure innovante permettent également de substituer des polymères utilisés dans le secteur de l'emballage de denrées alimentaires, la sacherie dont la production de sacs de collecte de biodéchets.

Représentant encore une proportion marginale de la production globale de matières plastiques en termes de tonnages, les plastiques biosourcés et/ou biodégradables à structure innovante ne possèdent pas leur filière de valorisation propre. Cela s'explique notamment par la multiplicité des polymères qui complique la création de technologies spécifiques dédiées à la séparation de ces nouveaux matériaux présents en faible quantité. Possédant des caractéristiques physiques et mécaniques ainsi que des stabilités physico-chimiques (à l'eau ou à la chaleur) très différentes, ces matériaux requièrent des traitements spécifiques qui impliquent une séparation efficace en amont et une voie de valorisation pertinente en aval. Les plastiques biosourcés et/ou biodégradables sont voués à terminer leur vie dans les flux de déchets actuels :

- Plastiques biosourcés et/ou biodégradables dans un flux d'ordures ménagères résiduelles : en absence de consignes claires sur leur tri à la source, les plastiques biosourcés et/ou biodégradables ont une forte probabilité de se retrouver dans ce flux, soit traité par incinération, soit stocké en installation de stockage de déchets ultimes non dangereux ;
- Plastiques biosourcés et/ou biodégradables dans un flux issu de la collecte sélective de déchets : dans un contexte réglementaire européen et français dont la Loi « Anti-Gaspillage pour une économie circulaire » privilégiant le recyclage matière des plastiques, certains plastiques biosourcés et/ou biodégradables sont donc amenés à se retrouver de plus en plus fréquemment dans le flux de déchets issus de la collecte sélective, ce qui implique d'étudier les conséquences potentielles de leur présence dans les filières de recyclage matière : recyclage mécanique, recyclage chimique et recyclage biochimique ;
- Plastiques biosourcés et/ou biodégradables dans un flux de déchets organiques : cette fin de vie peut être envisagée dans la mesure où les polymères biosourcés et/ou biodégradables à structure innovante qui les constituent présentent également la propriété d'être biodégradable dans certaines conditions environnementales. C'est le cas de certains emballages alimentaires souples (sacs de fruits et légumes, films d'emballage, sacs de collecte de biodéchets...), certains emballages rigides (barquettes...) ou certains produits du secteur de l'agriculture (films de paillage, supports de culture...) biosourcés et/ou biodégradables dont la collecte à la source pourrait s'effectuer via la collecte des biodéchets.

their petroleum-based equivalents, in particular in the mechanical recycling sector. Bio-based and / or biodegradable polymers with an innovative structure also make it possible to substitute polymers used in the packaging sector.

Still representing a marginal proportion of the overall production of plastics in terms of quantity, biobased and / or biodegradable plastics with an innovative structure do not have their own recycling channel. This is explained in particular by the multiplicity of polymers which complicates the development of specific technologies dedicated to the separation of these new materials present in small quantities. Having very different physical and mechanical characteristics as well as physicochemical stability (in water or heat), these materials require specific treatments that involve effective separation upstream and a relevant recovery route downstream. Bio-based and / or biodegradable plastics are doomed to end their life in today's waste streams:

- *Biobased and / or biodegradable plastics in a residual municipal solid waste stream: in the absence of clear instructions on their sorting at source, biobased and / or biodegradable plastics have a high probability of ending up in this stream, either treated by incineration or stored in a non-hazardous ultimate waste storage facility;*
- *Biobased and / or biodegradable plastics in a flow resulting from selective waste collection: in a European and French regulatory context, including the "Anti-Gaspillage pour une économie circulaire" French law favoring material recycling of plastics, biobased plastics and / or biodegradable products are therefore increasingly found in the waste stream from selective collection, which implies studying the potential consequences of their presence in material recycling channels: mechanical recycling, chemical recycling and biochemical recycling ;*
- *Biobased and / or biodegradable plastics in an organic waste stream: this end of life can be considered insofar as the biobased and / or biodegradable polymers with an innovative structure that constitute them also have the property of being biodegradable under certain environmental conditions. This is the case for certain flexible food packaging (fruit and vegetable bags, packaging films, bio-waste collection bags, etc.), certain rigid packaging (trays, etc.) or certain products in the agricultural sector (films mulching, growing media, etc.) biobased and / or biodegradable which could be collected at source through the collection of bio-waste.*

Integration of biobased and / or biodegradable plastics in the actual waste management

Mechanical recycling

The vast majority of polymers are currently recycled mechanically. During their use, plastic materials are subjected to various environmental conditions (heat, oxygen, radiation, humidity and mechanical stress). The resulting aging (mainly photo-oxidation) induces various structural changes in polymers. The material entering the recycling process is therefore no longer quite the same as that originally produced. In addition to this first degradation, thermomechanical aging in the tools for processing in the molten state (extrusion, injection, etc.).

Intégration des plastiques biosourcés et/ou biodégradables dans les filières actuelles

Recyclage mécanique

C'est par voie mécanique que la très grande majorité des polymères sont actuellement recyclés. Au cours de leur usage, les matériaux plastiques sont soumis à diverses conditions environnementales (chaleur, oxygène, rayonnement, humidité et contraintes mécaniques). Le vieillissement qui en résulte (principalement de la photo-oxydation) induit divers changements structurels des polymères. Le matériau en entrée du procédé de recyclage n'est donc plus tout à fait le même que celui produit à l'origine. A cette première dégradation, s'ajoute le vieillissement thermomécanique dans les outils de mise en œuvre à l'état fondu (extrusion, injection...).

Ces vieillissements peuvent induire des scissions de chaînes (polypropylène), des ramifications, voire réticulations (polyéthylène). Les propriétés sont souvent modifiées (abaissement de la température de transition vitreuse, perte de résistance mécanique et de tenue aux chocs, propriétés rhéologiques et de surface, couleur...).

Le recyclage passe en général par des étapes de tri, broyage, lavage puis extrusion pour mettre la matière recyclée sous forme de granulés. Pour la transformation de matières recyclées, on pourra équiper les lignes d'extrusion avec i) des filtres à particules, ii) des systèmes de dégazage pour éliminer des composés organiques volatils (COV), voire iii) des équipements permettant une dépollution à l'état fondu avec addition de fluides, par exemple.

Recyclage chimique - en développement

La solvolysse correspond à une réaction chimique coupant le polymère en oligomères, monomères ou autres synthons. Des étapes de séparation et parfois de synthèse chimique doivent permettre par la suite de produire des synthons, dont des monomères. La synthèse de polymères de hautes masses molaires implique d'utiliser des monomères de très grande pureté. Les étapes de purification subséquentes à la dépolymérisation sont donc de la plus importance.

Les polyesters sont parmi les polymères les plus faciles à recycler par solvolysse. En effet, ces polymères contiennent des fonctions esters qui peuvent aisément être sectionnées par des réactifs ou solvants tels que l'eau (hydrolyse), des alcools (alcoolysse), des acides (acidolysse), des glycols (glycolysse) ou encore des amines (aminolysse).

L'hydrolyse s'apparente à un hydrocraquage. C'est l'unique méthode de solvolysse qui mène directement à la production d'acide téréphtalique (TPA) et d'éthylène glycol (EG), par dépolymérisation du PET. Le PET peut être directement repolymérisé à partir de ces espèces, après purification. Les procédés de glycolysse des polyuréthanes permettent d'obtenir des oligomères pouvant réagir par la suite avec des diisocyanates pour former des polymères comparables à ceux traités. Cette matière recyclée est mélangée (souvent à hauteur maximale de 30%) avec de la matière vierge pour former par exemple de nouvelles mousses PUR. Ces procédés sont encore au stade de développement en laboratoire ou de pilotes de démonstration pour les plus avancés.

La dépolymérisation thermique ou pyrolyse flash est réalisée à hautes températures (350 à 600°C) et sous atmosphère réductrice contrôlée (absence d'oxygène, etc.). Ces conditions opératoires de pression et température permettent de dépolymériser les structures macromoléculaires des thermoplastiques en de plus petites molécules. La scission des chaînes macromoléculaires est donc le fait de la température et non de la réaction avec une autre entité chimique.

This aging can induce chain splitting (polypropylene), branching, or even cross-linking (polyethylene). The properties are often modified (lowering of the glass transition temperature, loss of mechanical strength and impact resistance, rheological and surface properties, color, etc.). Recycling generally involves stages of sorting, grinding, washing and then extrusion to put the recycled material in the form of granules. For the transformation of recycled materials, the extrusion lines can be equipped with i) particulate filters, ii) degassing systems to remove volatile organic compounds (VOCs), or even iii) equipment allowing pollution control at the molten state with the addition of fluids, for example.

Chemical recycling - in development

Solvolysis corresponds to a chemical reaction cutting the polymer into oligomers, monomers or other building blocks. Separation and sometimes chemical synthesis steps must subsequently make it possible to produce building blocks, including monomers. The synthesis of polymers of high molecular masses involves the use of monomers of very high purity. The purification steps subsequent to the depolymerization are therefore of the most importance.

Polyesters are among the easiest polymers to recycle by solvolysis. Indeed, these polymers contain ester functions which can easily be sectioned by reagents or solvents such as water (hydrolysis), alcohols (alcoholysis), acids (acidolysis), glycols (glycolysis) or even amines (aminolysis). Hydrolysis is commonly associated to hydrocracking. It is the only solvolysis method that directly leads to the production of terephthalic acid (TPA) and ethylene glycol (EG), by depolymerizing PET. PET can be directly repolymerized from these species, after purification. Polyurethane glycolysis processes provide oligomers which can subsequently react with diisocyanates to form polymers comparable to those treated. This recycled material is mixed (often at a maximum level of 30%) with virgin material to form, for example, new PUR foams. These processes are still at the stage of laboratory development or demonstration pilots for the more advanced.

Thermal depolymerization or flash pyrolysis is carried out at high temperatures (350 to 600°C) and under a controlled reducing atmosphere (absence of oxygen, etc.). These operating conditions of pressure and temperature make it possible to depolymerize the macromolecular structures of thermoplastics into smaller molecules. The scission of macromolecular chains is therefore the result of temperature and not of reaction with another chemical entity.

Biochemical recycling (or enzymatic recycling) - in development

The biochemical recycling of petroleum-based and bio-based polymers is a promising technical option for recycling, based on bio-catalytic depolymerization by enzymes produced from selected and, often genetically modified microorganisms.

This "biorecycling" is the subject of academic research strongly supported by public and private actors, with a view to offering an alternative technology to mechanical and chemical recycling. Biochemical recycling is indifferent to petro-sourced or biobased polymers, whether or not they are biodegradable. This is a bio-catalytic depolymerization of polymers with the recovery of their constituent elements, the monomers or oligomers, with the aim of synthesizing new materials. Biochemical recycling makes it possible to

Recyclage biochimique (ou recyclage enzymatique) - en développement

Le recyclage biochimique des polymères pétrosourcés et biosourcés est une filière prometteuse, basée sur la dépolymérisation bio-catalytique par des enzymes produites à partir de micro-organismes sélectionnés et, souvent, génétiquement modifiés.

Cette filière de « biorecyclage » fait l'objet d'une recherche académique fortement soutenue par les acteurs publics et privés, dans la perspective d'offrir une technologie alternative au recyclage mécanique et chimique. Le recyclage biochimique concerne indifféremment les polymères pétro-sourcés ou biosourcés, qu'ils soient biodégradables ou pas. Il s'agit d'une dépolymérisation bio-catalytique des polymères avec récupération de leurs éléments constitutifs, les monomères ou les oligomères, dans le but de synthétiser de nouveaux matériaux. Le recyclage biochimique permet de générer une résine aux mêmes propriétés qu'une résine pure et permet de concevoir une boucle de production sans perte de valeur. Les enzymes sont sélectionnées selon les liaisons à cliver (hydrolases, oxydo-réductases). Concernant les plastiques biosourcés, la grande majorité des travaux de recherche et développement porte sur les PLA, PHAs, PBS, PCL, Bio-PET et le PEF.

L'analyse de la bibliographie scientifique met en évidence certaines difficultés et limites liées au recyclage biochimique en vue de produire des monomères repolymérisables. En effet, si la plupart des polymères sont susceptibles d'être dépolymérisés par des enzymes, de nombreux facteurs influencent l'efficacité des réactions de clivage bio-catalytique de dépolymérisation hydrolytique des polyesters, polyuréthanes et polyamides, et réactions d'oxydo-réduction des polyoléfines et polyamides : accessibilité des chaînes de polymères aux enzymes ; prétraitement approprié des déchets plastiques ; tout comme le recyclage mécanique, le recyclage biochimique nécessite *a priori* de traiter préférentiellement des gisements de déchets plastiques peu souillés. Les caractéristiques des enzymes recherchées sont : stabilité de l'activité enzymatique (pH, température, solvants...), sélectivité vis à vis des liaisons à cliver, absence d'inhibition par les produits issus de la réaction, régénération-recyclage des enzymes.

Par ailleurs, les études abordent de manière plus évasive, d'une part la régénération des biocatalyseurs et, d'autre part, les opérations de récupération des produits issus de catalyse biochimique, étapes similaires à celles mises en œuvre dans les filières de recyclage chimique. La repolymérisation des produits obtenus suite à la catalyse enzymatique est encore peu évaluée et nécessite des investigations complémentaires. Citons la société française Carbios qui revendique la repolymérisation de monomères obtenus par dépolymérisation du PET avec ses enzymes activées.

Traitement biologique

L'intégration des produits de consommation constitués de tels polymères dans les filières de traitement et de valorisation des déchets organiques fermentescibles est largement considérée comme une « voie logique » de leur gestion en fin de vie. En effet, sur la base de la propriété avérée de « biodégradabilité » des polymères, l'usage de courte durée de certains matériaux, comme c'est le cas pour la plupart des emballages alimentaires, suppose leur orientation après usage vers des opérations de traitement biologique de biodéchets urbains ou de résidus de production agricole : compostage domestique, compostage industriel, digestion anaérobie mésophile, digestion anaérobie thermophile.

generate a resin with the same properties as a pure resin and makes it possible to design a production loop without loss of value. The enzymes are selected according to the bonds to be cleaved (hydrolases, oxidoreductases). Regarding biobased plastics, the vast majority of research and development work focuses on PLA, PHAs, PBS, PCL, Bio-PET and PEF.

Analysis of the scientific literature highlights certain difficulties and limitations associated with biochemical recycling in order to produce repolymerizable monomers. Indeed, if most polymers are capable of being depolymerized by enzymes, many factors influence the efficiency of the bio-catalytic cleavage reactions of hydrolytic depolymerization of polyesters, polyurethanes and polyamides, and oxidation-reduction reactions of polyolefins and polyamides: accessibility of polymer chains to enzymes; appropriate pretreatment of plastic waste; just like mechanical recycling, biochemical recycling requires a priori to preferentially treat lightly soiled plastic waste deposits. The characteristics of the enzymes sought are: stability of the enzymatic activity (pH, temperature, solvents, etc.), selectivity with respect to the bonds to be cleaved, absence of inhibition by the products resulting from the reaction, regeneration-recycling of the enzymes.

In addition, the studies address more evasively, on the one hand the regeneration of biocatalysts and, on the other hand, the operations of recovery of products resulting from biochemical catalysis, steps similar to those implemented in chemical recycling channels. . The repolymerization of the products obtained following enzymatic catalysis is still little evaluated and requires additional investigations. Let us quote the French company Carbios which claims the repolymerization of monomers obtained by depolymerization of PET with its activated enzymes.

Biotreatment

The integration of consumer products made from such polymers in the processing and recovery of fermentable organic waste is widely considered a "logical path" for their end-of-life management. Indeed, on the basis of the proven property of "biodegradability" of polymers, the short-term use of certain materials, as is the case for most food packaging, supposes their orientation after use towards biological processing operations of bio-waste or agricultural production residues: home composting, industrial composting, mesophilic anaerobic digestion, thermophilic anaerobic digestion.

However, this orientation raises many questions:

- Biodegradation evaluation conditions under specific composting or anaerobic digestion conditions at laboratory scale do not allow real conditions to be simulated. Compliance of plastics with standards does not guarantee complete biodegradation in facilities for the biological treatment of organic waste;*
- Diversity of biological treatment: from domestic composting to industrial composting and anaerobic digestion installations, the operating conditions vary from one process to another, from one installation to another (duration of treatment, temperature, humidity, ventilation for aerobic processes, etc.);*

Toutefois, cette orientation soulève de nombreuses interrogations :

- Conditions d'évaluations de la biodégradation dans des conditions spécifiques de compostage ou de méthanisation à l'échelle laboratoire ne permettent pas de simuler les conditions réelles. La conformité des plastiques aux normes ne garantit pas la biodégradation totale dans les installations de traitement biologique de déchets organiques ;
- Diversité de traitement biologique : du compostage domestique aux installations industrielles de compostage et de méthanisation, les conditions opératoires varient d'un process à l'autre, d'une installation à l'autre (durée de traitement, température, humidité, conditions d'aération pour les process aérobies...);
- Difficulté expérimentale d'évaluer la biodégradation d'un polymère *in situ* ;
- Bénéfices agronomiques (apport de nutriments, biomasse carbonée) non estimés : les plastiques sont supposés être majoritairement convertis en CO₂ et intégrés dans la biomasse microbienne ;
- Libération de micropolluants inorganiques ou organiques (catalyseurs, additifs, genèse de métabolites...), biodégradation incomplète, et genèse de micro-plastiques. Le risque est la contamination des matières organiques résiduelles produites au cours du traitement (composts et digestats) et utilisés comme amendements organiques pour les sols agricoles. Encore mal estimés, les risques environnementaux et sanitaires liés à la présence et à l'accumulation de micropolluants et micro-plastiques dans les sols sont encore peu étudiés, et ne sont pas pris en compte dans la réglementation UE.

Conclusions et perspectives de recherche

Ecoconception

L'écoconception de nouveaux polymères doit intégrer la fonctionnalité des matériaux plastiques dans leurs usages, et les enjeux environnementaux sur l'ensemble de leur cycle de vie : ressource initiale, consommation optimisée des ressources, synthèse des polymères, production et mise en forme du matériau et, fins de vie contrôlées associées à leurs usages. Sur la base des objectifs initiaux, notre étude a ciblé la question de la fin de vie des plastiques biosourcés et/ou biodégradables, en considérant plusieurs facettes du problème :

- Polymères biosourcés et/ou biodégradables, formulations actuellement sur le marché ou en cours de développement ;
- Usages effectifs et potentiels ;
- Fins de vie contrôlées, liées à l'usage de ces polymères ;
- Filières de traitement des plastiques actuelles ou en développement, soit en vue de leur élimination, soit en vue de leur valorisation : conséquences du développement de nouveaux polymères dans ces filières.

L'écoconception des plastiques biosourcés et/ou biodégradable est mise en œuvre pour développer une alternative crédible aux polymères conventionnels. Pour cela, et au regard de l'analyse des connaissances actuelles sur la fin de vie des plastiques biosourcés et/ou biodégradable, il semble nécessaire de disposer d'une méthodologie spécifique d'écoconception, adaptée à la conception des plastiques. Directement liée à leur gestion en fin de vie contrôlée, la recyclabilité est l'un des enjeux majeurs pour le développement d'une offre alternative de nouveaux polymères, présentant de nouvelles caractéristiques les distinguant des plastiques conventionnels. Pour intégrer la recyclabilité des polymères biosourcés et/ou biodégradables en

- *Experimental difficulty of evaluating the biodegradation of a polymer in situ;*
- *Agronomic benefits (supply of nutrients, carbonaceous biomass) not estimated: plastics are assumed to be mainly converted into CO₂ and integrated into the microbial biomass;*
- *Release of inorganic or organic micropollutants (catalysts, additives, genesis of metabolites...), incomplete biodegradation, and genesis of microplastics. The risk is the contamination of residual organic matter produced during treatment (composts and digestates) and used as organic amendments for agricultural soils. Still poorly estimated, the environmental and health risks linked to the presence and accumulation of micropollutants and microplastics in soils are still little studied, and are not taken into account in EU regulations.*

Conclusions and research perspective:

Ecodesign

The ecodesign of new polymers must integrate the functionality of plastic materials into their uses, and environmental issues throughout their life cycle: initial resource, optimized consumption of resources, synthesis of polymers, production and shaping of the material and, controlled end of life associated with their uses. Based on the initial objectives, our study targeted the issue of the end of life of biobased and / or biodegradable plastics, by considering several facets of the problem:

- *Biobased and / or biodegradable polymers, formulations currently on the market or under development;*
- *Actual and potential uses;*
- *Controlled end of life, linked to the use of these polymers;*
- *Current or developing plastics processing channels, either with a view to their elimination or with a view to their recovery: consequences of the development of new polymers in these sectors.*

The eco-design of biobased and / or biodegradable plastics is implemented to develop a credible alternative to conventional polymers. For this, and in view of the analysis of current knowledge on the end of life of biobased and / or biodegradable plastics, it seems necessary to have a specific ecodesign methodology, adapted to the design of plastics. Directly linked to their management at the controlled end of their life, recyclability is one of the major challenges for the development of an alternative offer of new polymers, presenting new characteristics that distinguish them from conventional plastics. To integrate the recyclability of biobased and / or biodegradable polymers at the end of their life, it appears necessary to think about ecodesign, considering the current state of the waste treatment and recovery options:

Mechanical recycling

It is still, and probably for a long time to come, the main economically viable route for recycling conventional plastics. An essential sector at this time, biobased and / or biodegradable polymers should be eco-designed with a view to material recycling after mechanical separation sorting operations. On the other hand, the presence of catalyst residues and additives can potentially be problematic for material recycling. Indeed, it is difficult to extract unwanted substances from polymer formulations for recycling. Also, it

fin de vie, il apparaît nécessaire de penser l'écoconception, en considérant l'état actuel des filières de traitement et de valorisation des déchets :

Recyclage mécanique

C'est toujours, et probablement encore pour longtemps, la principale filière économiquement viable de recyclage des plastiques conventionnels. Filière incontournable pour l'instant, les polymères biosourcés et/ou biodégradables devraient être écoconçus dans la perspective d'un recyclage matière après les opérations mécaniques de tri séparatif. D'autre part, la présence de résidus de catalyseurs et d'additifs peut potentiellement être problématique pour le recyclage matière. En effet, il s'avère difficile d'extraire les substances indésirables des formulations polymères en vue de leur recyclage. Aussi, il est important de sélectionner des catalyseurs et additifs non susceptibles de gêner le recyclage mécanique. Nous distinguons deux situations :

- Polymères biosourcés identiques aux polymères pétrosourcés : leur traitement dans les filières actuelles de recyclage mécanique des déchets ne présente pas de limite technique spécifique pour leur tri, leur identification et leur valorisation matière ;
- Polymères biosourcés et/ou biodégradables de structures nouvelles : leur intégration dans la filière recyclage mécanique est problématique : actuellement, nécessité de les identifier pour les écarter des flux de plastiques conventionnels et éviter le risque avéré de perturber la valorisation matière. Cette contrainte est d'autant plus forte pour les polymères dégradables en raison de l'altération des chaînes polymères sous l'effet de facteurs biotiques ou abiotiques ; à court terme, absence de filière spécifique de valorisation de tels polymères.

Dans les cas où il n'y a pas de contraintes particulières, liées à l'usage des matériaux, le recyclage mécanique peut-être mis en œuvre rapidement et à moindres frais. Même si le taux de polluants résiduels potentiels avec un recyclage mécanique risque d'être toujours supérieur à celui d'un recyclage par « dépolymérisation, purification, repolymérisation », il est possible de purifier les matières à l'état fondu avec des solvants ou mélanges de solvants (eau, éthanol, acétone, CO₂ supercritique...). Il semble toutefois nécessaire de poursuivre les recherches sur les procédés de dépollution en ligne. Il est aussi pertinent de poursuivre les recherches visant à « régénérer » les chaînes polymères à l'état fondu, par exemple avec des réactions de couplage visant à limiter la fluidification de matières sensibles à l'hydrolyse en particulier, pour ajuster des viscosités.

Recyclage chimique

Cette filière est en voie de développement en Europe. Son intérêt majeur est le suivant : de nombreux polymères, pétro ou biosourcés, peuvent être traités par catalyse chimique, avec production de synthons, monomères, oligomères. Des offres technologiques existent, mais encore non disponibles à l'échelle industrielle. La viabilité économique et environnementale reste encore à démontrer. Toutefois, le recyclage chimique peut être une opportunité pour traiter les plastiques qui ne seraient pas recyclables dans la filière recyclage matière. Le recyclage chimique ouvre des perspectives qui expliquent une forte activité de recherche pour le développement de procédés. L'écoconception intégrant le recyclage chimique semble une orientation intéressante pour le développement de nouveaux polymères, dans le cas où le recyclage matière ne pourrait pas être envisagé.

is important to select catalysts and additives that are not likely to interfere with mechanical recycling. We distinguish two situations:

- *Biobased polymers identical to petroleum-based polymers: their treatment in current mechanical waste recycling channels has no specific technical limit for their sorting, identification and material recovery;*
- *Biobased and / or biodegradable polymers from new structures: their integration into the mechanical recycling sector is problematic: currently, it is necessary to identify them in order to separate them from conventional plastic flows and avoid the proven risk of disrupting material recovery. This constraint is even stronger for degradable polymers due to the alteration of polymer chains under the effect of biotic or abiotic factors; in the short term, there is no specific technical option for upgrading such polymers.*

In cases where there are no particular constraints related to the use of materials, mechanical recycling can be implemented quickly and inexpensively. Even if the rate of potential residual pollutants with mechanical recycling may always be higher than that of recycling by "depolymerization, purification, repolymerization", it is possible to purify the materials in the molten state with solvents or mixtures of solvents (water, ethanol, acetone, supercritical CO₂, etc.). However, it seems necessary to continue research on on-line pollution control processes. It is also relevant to continue research aimed at "regenerating" polymer chains in the molten state, for example with coupling reactions aimed at limiting the fluidization of materials sensitive to hydrolysis in particular, to adjust viscosities.

Chemical recycling

This option is developing in Europe. Its major interest is as follows: many polymers, petro or biobased, can be treated by chemical catalysis, with production of synthons, monomers, oligomers. Technological offers exist, but not yet available on an industrial scale. The economic and environmental viability remains to be demonstrated. However, chemical recycling can be an opportunity to treat plastics that would not be recyclable in the material recycling sector. Chemical recycling opens up prospects which explain a strong research activity for the development of processes. Ecodesign integrating chemical recycling seems an interesting direction for the development of new polymers, in the event that material recycling could not be considered.

In the 2000s, there was already an interest in chemical recycling and it has again raised high hopes in recent years. It is certain that the disadvantage of polyesters, polyamides sensitive to hydrolysis, glycolysis, in the hypothesis of mechanical recycling, becomes an advantage when one seeks to depolymerize.

While it is easy to cut the polyesters, polyamides chains, the degradation products are not necessarily the monomers that one would like for a new polymerization leading to the polymer that has just been degraded, with a view to isofunction recycling. It is important to find the conditions (choice of catalyst, reaction temperature, etc.) to optimize the desired yields of synthons. One can also ask the question of the valorization of by-products, such as oligomers for example. Can they be used as plasticizers?

Dans les années 2000, il y avait déjà un intérêt pour le recyclage chimique et ce dernier suscite à nouveau beaucoup d'espoirs depuis quelques années. Il est certain que l'inconvénient des polyesters, polyamides sensibles à hydrolyse, glycolyse, dans l'hypothèse de recyclage mécanique, devient un avantage quand on cherche à dépolymériser.

Si on arrive facilement à couper les chaînes de polyesters, polyamides, les produits de dégradation ne sont pas forcément les monomères qu'on souhaiterait pour une nouvelle polymérisation menant au polymère que l'on vient de dégrader, en vue d'un recyclage isofonction. Il est important de trouver les conditions (choix de catalyseur, température de réaction...) pour optimiser les rendements en synthons souhaités. On peut aussi se poser la question de la valorisation des sous-produits, comme les oligomères par exemple. Sont-ils valorisables comme plastifiants ?

Les étapes de purification des produits post « dépolymérisation » relèvent du génie chimique et il est important d'avoir de très bonnes puretés des monomères à polycondenser en polyesters. Sans quantités suffisantes à raffiner, les opérations de purification ne devraient pas être rentables et pourraient remettre en cause l'intérêt économique du recyclage chimique. Par rapport à un recyclage mécanique qui pourrait être assez simple à mettre en œuvre, le recyclage chimique implique des études et investissements pour les étapes de dépolymérisation et purification.

Recyclage biochimique (ou recyclage enzymatique)

La filière industrielle n'existe pas actuellement. Le recyclage biochimique est une alternative intéressante au recyclage chimique, sur l'hypothèse encore à démontrer de sa viabilité technique, économique et environnementale. Cette filière de catalyse enzymatique traite surtout les polyesters avec sans doute le potentiel de traiter n'importe quel polymère, biosourcé ou non, biodégradable ou non. Tout comme le recyclage chimique, cette option de fin de vie devrait être intégrée dans l'écoconception comme filière possible de recyclage de polymères à structure nouvelle pour lesquels le recyclage matière n'est pas forcément très satisfaisant à ce jour.

- Les perspectives de recherche spécifique à l'étape de catalyse enzymatique des polymères, biosourcés sont :
- Le prétraitement des polymères pour favoriser l'accessibilité des liaisons et leur dépolymérisation enzymatique, mais également pour éliminer les éléments indésirables qui pourraient nuire à la catalyse enzymatique, en particulier la matière organique fermentescible souillant les emballages plastiques dédiés au conditionnement et à l'utilisation de produits alimentaires ;
- L'optimisation de l'activité des enzymes avec de nombreuses voies d'amélioration comme, par exemple, la stabilité thermique des enzymes permettant de réaliser des biocatalyses dans des conditions de températures supérieures à la T_g, conditions favorisant l'accessibilité des polymères aux enzymes ;
- Le design d'enzymes permettant à la fois de réaliser la dépolymérisation et la repolymérisation, selon les conditions opératoires imposées ;
- La sélection d'enzymes et conception de procédés permettant la régénération et la réutilisation des biocatalyseurs dont le coût de production est élevé.

Traitement biologique

Certes, le « recyclage biologique » est LA filière mise en avant dans le développement de l'offre commerciale de matériaux polymères biodégradables. Il s'agit plus d'une filière de **traitement biologique** que d'un recyclage biologique, sur le principe de considérer une biodégradation ultime du matériau

The stages of purification of the post "depolymerization" products fall under chemical engineering and it is important to have very good purities of the monomers to be polycondensed into polyesters. Without sufficient quantities to refine, purification operations are unlikely to be profitable and could undermine the economic benefit of chemical recycling.

Compared to mechanical recycling which could be quite simple to implement, chemical recycling involves studies and investments for the depolymerization and purification steps.

Biochemical recycling (or enzymatic recycling)

The industrial sector does not currently exist. Biochemical recycling is an interesting alternative to chemical recycling, on the hypothesis to be demonstrated of its technical, economic and environmental viability. This enzymatic catalysis sector mainly treats polyesters with undoubtedly the potential to treat any polymer, biobased or not, biodegradable or not. Like chemical recycling, this end-of-life option should be integrated into ecodesign as a possible route for recycling polymers with a new structure for which material recycling is not necessarily very satisfactory to date.

The research perspectives specific to the enzymatic catalysis step of biobased polymers are:

- *The pretreatment of the polymers to promote the accessibility of the bonds and their enzymatic depolymerization, but also to eliminate the undesirable elements which could harm the enzymatic catalysis, in particular the fermentable organic matter soiling the plastic packaging dedicated to packaging and use food products;*
- *Optimization of the activity of enzymes with many ways of improving such as, for example, the thermal stability of enzymes allowing biocatalysis to be carried out under temperature conditions above T_g, conditions favoring the accessibility of polymers to enzymes;*
- *The design of enzymes allowing both depolymerization and repolymerization, according to the operating conditions imposed;*
- *The selection of enzymes and design of processes allowing the regeneration and reuse of biocatalysts whose production cost is high.*

Biotreatment

Certainly, "biological recycling" is THE industry facility highlighted in the development of the commercial offer of biodegradable polymer materials. It is more of a biological treatment process than a biological recycling, on the principle of considering an ultimate biodegradation of the material under environmental (temperature, pH, presence or absence of oxygen, humidity, etc.) and conditions imposed by the different biological treatment routes. Ecodesign must integrate these conditions imposed in current organic sectors for the development of new "biodegradable" materials, insofar as this innovative property is highlighted for the end of the product's life. It is therefore a question of eco-designing new polymers meeting relatively complex specifications: ensuring the properties of use of polymer materials (mechanical resistance, behavior in water, thermal resistance, etc.), ensuring their ultimate biodegradability under the conditions imposed by the biological anaerobic

dans les conditions environnementales (température, pH, présence ou absence d'oxygène, humidité, ...) et temporelles imposées par les différentes voies de traitement biologique. L'écoconception doit intégrer ces conditions imposées dans les filières biologiques actuelles pour le développement de nouveaux matériaux « biodégradables », dans la mesure où cette propriété novatrice est mise en avant **pour la fin de vie du produit**. Il s'agit donc d'écoconcevoir de nouveaux polymères répondant à un cahier des charges relativement complexe : assurer les propriétés d'usage des matériaux polymères (résistance mécanique, comportement à l'eau, résistance thermique, etc.), assurer leur biodégradabilité ultime dans les conditions imposées par les filières biologiques de méthanisation et de compostage, tout en garantissant l'absence d'impacts environnementaux et sanitaires associés à leur biodégradation : désintégration et formation de microplastiques, minéralisation incomplètes, relargage de produits de dégradation : monomères, catalyseurs, additifs.

Tenant compte de ces nombreuses interrogations, le co-traitement biologique des plastiques biodégradables, biosourcés ou pétrosourcés, dans un flux de déchets organiques fermentescibles est une option de traitement sans doute à limiter à certains produits dont l'usage et la fin de vie sont associés à la gestion des biodéchets. C'est le cas des sacs plastiques biodégradables utilisés pour leur collecte. Néanmoins, le co-traitement biologique des sacs biodégradables avec les biodéchets nécessite des investigations complémentaires, pour éviter toutes conséquences négatives associées à leur biodégradation, totale ou incomplète, au cours des opérations de traitement biologique.

Les principaux points de recherche identifiés sont les suivants :

- Le développement de polymères biosourcés ou pétrosourcés, dont la biodégradation est effective et totale dans des conditions de températures mésophiles, et dans des conditions temporelles imposées par les différents procédés de traitement biologique, compostage ou méthanisation ;
- L'usage de catalyseurs et d'additifs non toxiques et biodégradables, des pistes biosourcées étant identifiées ;
- L'évaluation de la biodégradation *in situ* des polymères biosourcés et biodégradables, ou dans des conditions simulées proches des conditions réelles de traitement biologiques ;
- L'évaluation des conséquences environnementales et sanitaires de la biodégradation des plastiques biosourcés et biodégradables sur la qualité des résidus organiques issus d'opérations de traitement biologique.

digestion and composting channels, while guaranteeing the absence of environmental and health impacts associated with their biodegradation: disintegration and formation of microplastics, incomplete mineralization, release of degradation products: monomers, catalysts, additives.

Taking into account these many questions, the biological co-treatment of biodegradable, biobased or petroleum-based plastics, in a flow of fermentable organic waste is a treatment option that should probably be limited to certain products whose use and end of life are associated to the management of bio-waste. This is the case with the biodegradable plastic bags used for their collection. Nevertheless, the biological co-treatment of biodegradable bags with bio-waste requires additional investigations, to avoid any negative consequences associated with their biodegradation, total or incomplete, during biological treatment operations.

The main research points identified are as follows:

- *The development of biobased or petro-sourced polymers, whose biodegradation is effective and complete under conditions of mesophilic temperatures, and under temporal conditions imposed by the various processes of biological treatment, composting or anaerobic digestion;*
- *The use of non-toxic and biodegradable catalysts and additives, bio-sourced routes being identified;*
- *The evaluation of the in situ biodegradation of biobased and biodegradable polymers, or under simulated conditions close to the real conditions of biological treatment;*
- *Assessment of the environmental and health consequences of the biodegradation of biobased and biodegradable plastics on the quality of organic residues resulting from biological treatment operations.*