

# Le défi des matériaux polymères biosourcés

*Luc AVEROUS est professeur des universités à l'ECPM au sein de l'Université de Strasbourg.*

## 1 Les polymères biosourcés : classification et origines

### 1.1. Matériaux biosourcés et biodégradables : définition et classification

#### 1.1.1. Quelques définitions

**Le terme « biosourcé »** fait référence au début de la vie du matériau, notamment à l'origine du carbone et de ses différents atomes. Certains matériaux ont un carbone d'origine fossile et d'autres d'origine biosourcée, issu de la biomasse. La biomasse, c'est globalement tout ce qui est produit par des organismes vivants.

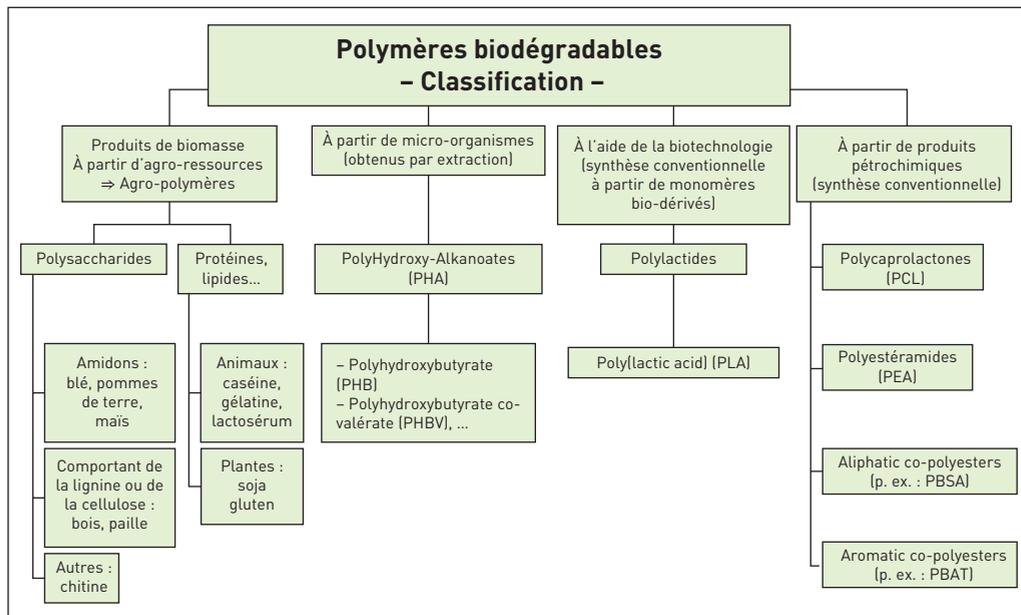
**Le terme « biodégradable »**, lui, fait référence à la fin de vie

du matériau. C'est une des fins de vie possibles des matériaux au même titre que le recyclage, par exemple. Pour qu'un matériau soit dit biodégradable, il faut qu'il réponde à certaines normes : des normes sur la biodégradabilité en milieu compost (compostage) tel que la norme EN 13432, en milieu marin, en eau douce...

Aussi certains matériaux ne sont-ils que biosourcés ou que biodégradables.

#### 1.1.2. Classification des polymères biodégradables

La **Figure 1** présente une classification des polymères biodégradables. Les matériaux des trois premières familles sont biosourcés et biodégradables, comme beaucoup



**Figure 1**

Classification des polymères biodégradables.

Nota : Classification publiée initialement dans : Avérous L. (2004). *Polymer Reviews*. Vol. 44, Issue 3, pp. 231-274, et largement reprise.

de polymères plus ou moins directement issus de la biomasse tels que les polysaccharides<sup>1</sup> ou les protéines. On trouve aussi les polymères bactériens, produits par fermentation, parmi lesquels se trouvent les polyhydroxyalcanoates<sup>2</sup> (PHA). On va trouver aussi des polymères dont les monomères ou synthons sont produits par fermentation, par exemple par lactofermentation pour l'acide lactique dont la polymérisation est ensuite faite par voie chimique, classiquement, pour obtenir l'acide polylactique (PLA). Mais on peut avoir aussi des polymères

biodégradables qui sont issus de ressources fossiles, parmi lesquels on va trouver les polycaprolactones<sup>3</sup> et différents (co)polyesters, qui ne sont pas biosourcés. La tendance est de plus en plus de produire industriellement ces (co)polyesters à partir de ressources renouvelables.

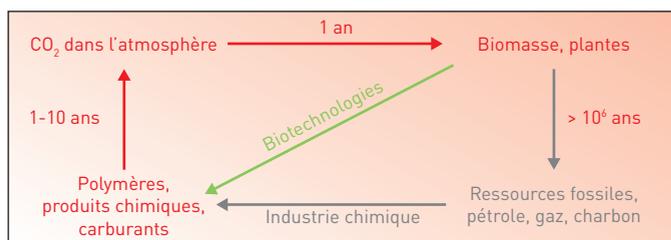
## 1.2. Ressources fossiles et biomasse

La **Figure 2** présente le cycle du carbone dans la production notamment de polymères. Les ressources fossiles que l'on utilise actuellement résultent de transformations naturelles de la biomasse sur des millions d'années. À partir de ces

1. Sucres complexes composés de plusieurs unités de sucres simples, les plus connus sont l'amidon ou la cellulose.

2. Famille de polyesters biodégradables produits naturellement par fermentation bactérienne de sucres ou de lipides.

3. Polyesters biodégradables fréquemment utilisés dans l'emballage ou dans le biomédical grâce à leur biocompatibilité.



**Figure 2**

Le cycle de vie du carbone et l'association « chimie et biochimie », pour la production de polymères.

D'après Le Pr. R. Narayan (MSU - USA).

ressources fossiles, on a synthétisé, notamment pendant tout le XX<sup>e</sup> siècle, la majorité des composés chimiques organiques et des carburants.

Le CO<sub>2</sub> produit sur terre est naturellement réutilisé par les plantes pour permettre la croissance de la biomasse dans un cycle court. À partir de la biomasse est intervenu un réel changement de paradigme avec une production de polymères renouvelables, en combinant chimie et biochimie (les biotechnologies). Cette association chimie/biochimie est de plus en plus importante. Dans ce nouveau schéma, les ressources fossiles apparaissent dans un rôle de séquestration du carbone sur des temps longs.

### 1.3. Teneur en biosourcé

#### 1.3.1. Le carbone 14

On détermine qu'un matériau est biosourcé notamment à partir de la mesure de sa teneur en carbone 14. Pour déterminer cette teneur, on utilise des normes qui portent sur l'analyse de ce radiocarbone.

Les organismes vivants ont une concentration positive en

carbone 14<sup>4</sup> due aux échanges entre les organismes et l'environnement. La demi-vie du carbone 14 étant de 5 700 ans, la teneur en carbone 14 sera indétectable après 50 000 ans environ, ce qui fait que tous les matériaux issus totalement de ressources fossiles vont donc avoir une teneur en carbone 14 égale à zéro. Ce ne sera pas le cas des matériaux issus de la biomasse, et l'on va ainsi pouvoir déterminer la teneur en carbone biosourcé.

#### 1.3.2. Teneur en carbone biosourcé et totale

La teneur en carbone biosourcé n'est pas équivalente à la teneur en biosourcé du matériau, comme le montre le cas très simple du PET<sup>5</sup>. Le PET est obtenu par réaction entre un diacide et un diol<sup>6</sup>. Ce dernier peut être assez facilement produit par fermentation

4. Isotope radioactif du carbone utilisé pour la datation de composés contenant du carbone.

5. Polyéthylène téréphtalate, polymère de la famille des polyesters notamment utilisé pour former des fibres synthétiques, des textiles ou des bouteilles d'eau ou d'autres emballages (barquettes).

6. Formule chimique : HO-CH<sub>2</sub>-OH.

à partir de biomasse. On synthétise ainsi un PET partiellement biosourcé. Dans ce cas, la teneur en carbone biosourcé est de 20 % (2 atomes de carbone sur les 10 atomes de l'unité répétitive), alors qu'en prenant maintenant en compte l'ensemble des atomes du polymère et non pas seulement le carbone, on n'est pas à 20 % mais 31 %. La teneur en carbone biosourcé et la teneur totale biosourcée du matériau ne sont donc pas identiques !

C'est la raison pour laquelle des normes sont actuellement proposées qui prennent en compte la teneur totale biosourcée déterminée soit en combinant des analyses chimiques élémentaires et les mesures de radiocarbone, soit en se basant sur les équations chimiques utilisées pour la synthèse de ces polymères. Il existe donc différentes approches dans la détermination de la teneur en biosourcé avec différentes normes associées.

La **Figure 3** montre que des logos de certification tel que « OK Biobased » sur des produits (emballages...) vont donner une évaluation de ces

teneurs. On définit dans ce cas un matériau comme étant biosourcé, uniquement à partir de 20 %.

### 1.3.3. Les polymères biosourcés au sein de la bioéconomie

Les matériaux polymères biosourcés sont une petite partie de ce qu'on appelle la bioéconomie<sup>7</sup>. La production de produits chimiques ou de polymères biosourcés ne représente qu'une toute petite fraction de la bioéconomie : 0,05 milliard d'euros à comparer à 2,5 milliards d'euros pour le total (2018). Cette proportion tend à évoluer. On produit actuellement au niveau mondial environ 4 millions de tonnes de polymères biosourcés par an, à comparer au moins de 400 millions de tonnes de matières plastiques. Cela correspond donc à environ 1 % de polymères biosourcés, et ceci à partir d'environ 5 millions de tonnes de biomasse valorisés dans ce contexte par an. La marge potentielle de progression reste importante,

7. La bioéconomie regroupe l'ensemble des activités de production, valorisation et de transformation de la biomasse.

			
Biosourcé à hauteur de 20 à 40 %	Biosourcé entre 40 et 60 %	Biosourcé entre 60 et 80 %	Biosourcé au-dessus de 80 %

**Figure 3**

Logos et classification des polymères biosourcés en fonction de leur teneur en biosourcé, selon une communication de TUV (Autriche).

la limite étant la biomasse mobilisable. Il s'agit aussi de ne pas rentrer en compétition avec l'alimentaire. Mais on en est très loin ! La mobilisation des terres arables pour la production des polymères biosourcés n'est environ que de 0,01 % (Figure 4). On ne va donc pas affamer la planète en produisant des polymères biosourcés ! De plus, la plupart des projets industriels qui émergent prennent bien garde de ne pas valoriser des biomasses qui pourraient rentrer en compétition avec l'alimentaire.

#### 1.4. Ressources pour les polymères biosourcés

Les polymères biosourcés ont différentes origines issues de différentes bioressources. On trouve de grands gisements tels que la cellulose ou l'hémicellulose, obtenus à partir de productions comme les forêts, la paille, etc. Dans ce domaine, il existe d'autres ressources

exploitables telles que la lignine et les tannins<sup>8</sup>. Ces composés sont très importants car ce sont des composés aromatiques<sup>9</sup> et il y a actuellement un manque d'aromaticité sur ces ressources fossiles en raison des évolutions dans le raffinage du pétrole vers le gaz, avec la production des BTX (benzène, toluène, xylène).

On peut valoriser aussi des ressources telles que les amidons, voire les protéines, issus de grandes cultures. On a également les dérivés de l'oléochimie, liée à la valorisation principalement d'huiles végétales dans laquelle la France est bien positionnée.

De manière générale, on peut utiliser les biotechnologies blanches sur différents types de biomasses. Il s'agit de tout un ensemble de molécules

8. Composés chimiques polyphénoliques portant des groupements –OH présents aussi naturellement dans le vin ou le thé par exemple.  
9. Composés non aliphatiques.

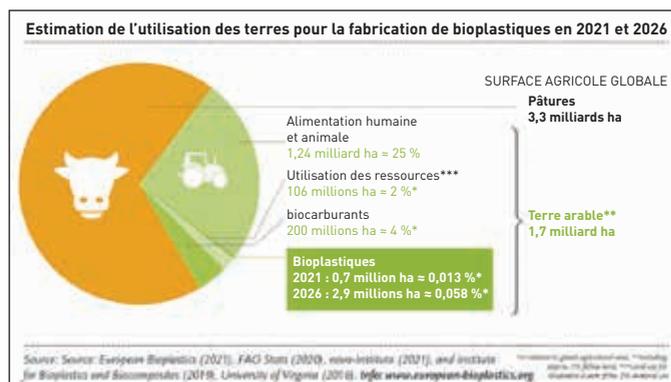


Figure 4

Part de l'utilisation de terres arables pour différents secteurs dont les polymères biosourcés en 2021 et l'estimation pour 2026, selon une communication de Nova-Institute (Allemagne).

et de polymères produits par fermentation tels que par exemple les polymères bactériens (polyhydroxyalcanoates) obtenus par cultures bactériennes. On va aussi produire un grand nombre de synthons<sup>10</sup>, des briques (« Lego® ») qui permettront de construire des polymères, tels que des diols ou des diacides carboxyliques.

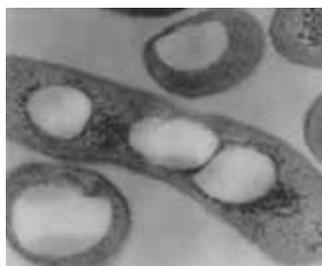
## 2 Applications à plus ou moins long terme des polymères biosourcés

Le secteur des polymères biosourcés s'inscrit dans deux grandes familles de matériaux :

– polymères biosourcés et biodégradables pour des applications à court terme, principalement pour les secteurs du packaging, de l'agriculture (films de paillage<sup>11</sup>...),

10. Molécules de base qui permettent de former d'autres molécules en les assemblant telles que des monomères.

11. Bâche posée dans les champs pour conserver l'humidité du sol, empêcher l'herbe de pousser, éviter le refroidissement du sol...



**Figure 5**

Accumulation du PHA au sein de bactéries.

l'hygiène (cotons-tiges...) et le biomédical ;

– polymères biosourcés durables (non biodégradables) avec des applications à long terme : par exemple dans la construction, l'automobile, etc. Le terme durable a ici un double sens : « qui va durer dans le temps » mais aussi le sens de « développement durable ».

### 2.1. Polymères biodégradables et biosourcés

#### 2.1.1. L'exemple des polyhydroxyalcanoates (PHA)

Comme exemple de polymères biodégradables et biosourcés, on a les PHA, une famille de polymères (polyesters) bactériens. La **Figure 5** montre l'accumulation du PHA (amas blancs) au sein de bactéries. Le PHA est une famille de polymères de réserve pour ses bactéries. En fonction du couple bactérie et alimentation, on obtiendra des architectures macromoléculaires différentes, ce qui est un gros avantage par rapport à la synthèse chimique classique.

On peut aussi produire des polymères biosourcés en utilisant des plantes transgéniques, une technique que Monsanto (USA) a employée dès les années 1990 pour la production de PHA par des plantes telles que le tabac ou le maïs (**Figure 6**).

Les PHA étant des polyesters, on a donc toutes les applications classiques des polyesters dans les domaines de l'emballage, du textile, agricole... De nombreuses applications de ces produits ont été développées dès la fin des années 1990.

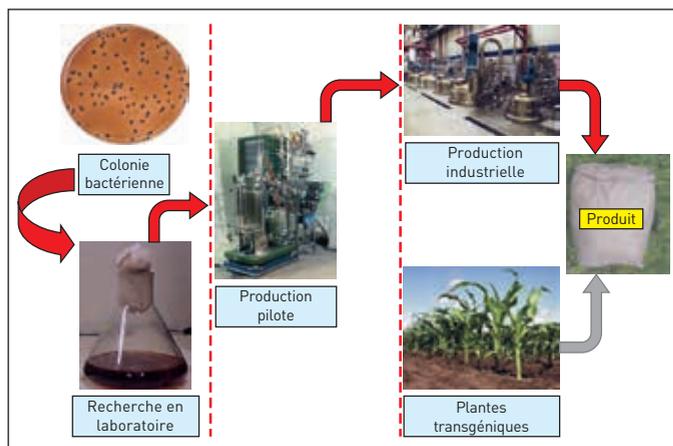


Figure 6

Processus de production du PHA par les biotechnologies blanches (flèches rouges) ou à partir de plantes OGM (flèche grise).

### 2.1.2. L'exemple de l'acide polylactique (PLA)

Un autre exemple de polymère à la fois biodégradable et biosourcé est le PLA. Il est obtenu par fermentation (lacto-fermentation), soit à partir de polysaccharides, soit à partir de sucre. Après une première étape d'hydrolyse

enzymatique<sup>12</sup>, on obtient la dextrose (ou le glucose) à partir de laquelle l'acide lactique pourra être obtenu (Figure 7). Le PLA est produit

12. Clivage d'une molécule à l'aide d'eau et d'enzymes (molécules catalyseurs accélérant la vitesse des réactions biochimiques).

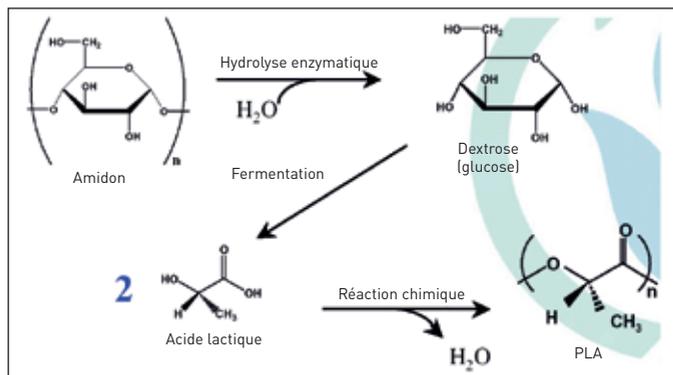


Figure 7

Procédé de synthèse du PLA à partir de l'amidon, selon une communication de NatureWorks (USA).

actuellement à partir de l'acide lactique aux alentours de 200 000 à 300 000 tonnes par an.

Pour sa synthèse, on passe généralement par un composé intermédiaire à partir du prépolymère obtenu par polycondensation directe. Il s'agit de lactides. Le PLA est ensuite obtenu par polymérisation par ouverture de cycle de lactides. Cela permet ainsi d'obtenir un polymère de masse molaire très élevée<sup>13</sup> (Figure 8).

La production de PLA est relativement importante avec de nombreuses applications dans le monde : dans le textile, le packaging, le domaine agricole, l'automobile, le bâtiment, le loisir, l'hygiène, etc.

13. Plus la masse molaire du polymère est importante, plus les chaînes formées sont longues.

Toutes les voies de recyclage connues pour les polyesters sont applicables au PLA. Le choix que l'on fera en fin de vie du matériau devra être fondé sur l'analyse du cycle de vie du matériau : que ce soit une biodégradation en compost industriel ou encore un recyclage très conventionnel, le recyclage thermomécanique ou le recyclage chimique.

### 2.1.3. Problématiques de circularité liées à l'utilisation de nouveaux polymères biosourcés

Le recyclage des objets d'usage peut poser des problèmes que l'on a du mal à anticiper avec de potentielles réactivités chimiques entre les composants mis en présence.

Un exemple illustrant ceci est donné par le recyclage thermomécanique des bouteilles de polyesters. Pour fabriquer

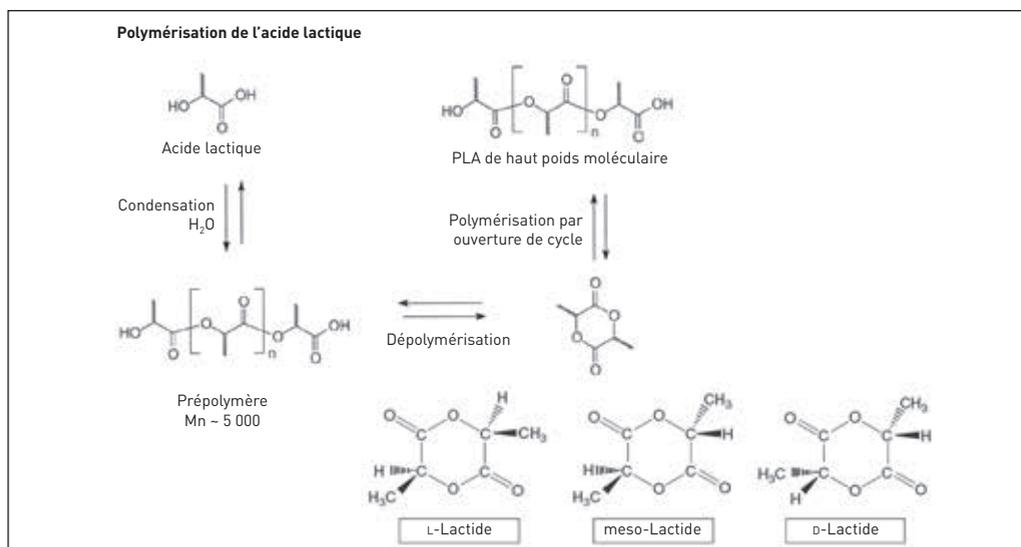


Figure 8

Polymérisation de l'acide lactique pour produire du PLA en passant par des lactides comme intermédiaire, selon une communication de NatureWorks (USA).

les bouteilles, on peut remplacer le PET par le PLA, cela se fait depuis fort longtemps. Mais si quelques bouteilles de PLA se retrouvent mélangées par erreur avec des bouteilles de PET dans les lots destinés au recyclage, on génère des réactions chimiques lors du recyclage matière. Des réactions de transestérification<sup>14</sup> entre le PLA et le PET vont avoir lieu avec *in fine* la perte des propriétés finales du PET récupéré.

Pour éviter cet inconvénient, il faudrait faire un tri en amont des déchets. Il faut dans ce cas disposer d'une technique adaptée, comme le triage automatique par infrarouge des bouteilles en PLA et de PET. Au niveau des filières de recyclage, ce procédé coûteux n'est pas pour le moment à l'ordre du jour.

#### 2.1.4. L'évolution des applications du PLA : du court au long terme

À son origine dans les années 1990, le PLA était synthétisé pour faire des polyesters biodégradables, compostables, etc. Mais maintenant, et pour suivre l'évolution des demandes, on développe de plus en plus des matériaux durables biosourcés et non biodégradables, avec des tenues long terme. C'est ainsi que l'on fabrique à partir de PLA, des « blends », des mélanges de PLA avec d'autres composés non biodégradables comme le PLA/Plexiglass® ou le PLA/Polycarbonates. On va ainsi avoir des matériaux à base de

PLA qui sont biosourcés pour des applications durables dans l'automobile par exemple. Le PLA est aussi utilisé comme un polyol<sup>15</sup> pour synthétiser des polyuréthanes biosourcés pour des applications durables par exemple dans le bâtiment<sup>16</sup>.

### 2.2. Polymères biosourcés durables

Abordons maintenant spécifiquement les matériaux polymères qui ont des applications à long terme. L'exemple le plus classique est le polyéthylène (PE). On peut faire industriellement du PE biosourcé avec une voie très simple. C'est une production qui vient largement de la société brésilienne Braskem. On part de canne à sucre, on obtient de l'éthanol par fermentation puis l'éthylène par déshydratation de l'éthanol : on peut introduire cet éthylène dans des unités de production de PE, qu'il soit biosourcé ou fossile (**Figure 9**). La seule différence entre ces deux origines concernera les teneurs en carbone 14, mais en termes de propriétés, ce seront exactement les mêmes. Mais son gros avantage est son « empreinte carbone » réduite car étant produit à partir de biomasse. Ce PE a une empreinte carbone plus faible que celle du PE conventionnel. L'exemple du PE n'est pas anecdotique car il compte pour près de la moitié de la production totale mondiale en matières plastiques.

15. Molécule comportant au moins deux groupes -OH.

16. Polymère utilisé notamment pour fabriquer des mousses souples ou rigides.

14. Mécanisme d'échange entre groupements esters, qui modifie leurs propriétés finales.

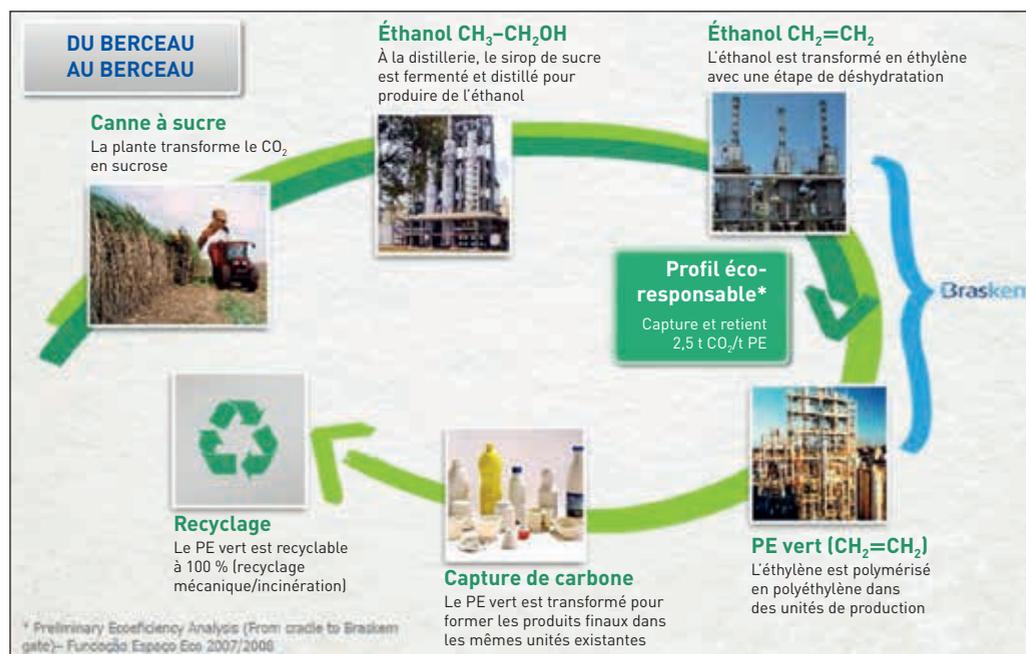


Figure 9

Processus global de la synthèse du PE et de son utilisation, selon une communication de Braskem (Brésil).

### 2.3. Au-delà du biosourcé : vers des matériaux plus « verts », durables et moins toxiques

Les grandes tendances sur les propriétés en relation avec les attentes des polymères biosourcés sont en évolution. **Le fait de montrer qu'un matériau est biosourcé n'est plus suffisant.** On doit maintenant améliorer différentes propriétés telles que la durabilité, la toxicité ou encore l'aspect « vert » de ces matériaux.

#### 2.3.1. Diminution de la toxicité : l'exemple des polyuréthanes biosourcés (PU)

On va diminuer la toxicité en jouant sur le design<sup>17</sup> des matériaux. Plus précisément,

on modifie la composition du polymère éliminant les causes de toxicité. L'exemple des polyuréthanes biosourcés (PU) va illustrer cette approche. Originellement, les PU sont obtenus par réaction entre des polyisocyanates<sup>18</sup> et des polyols, mais la toxicité des isocyanates pose un gros problème car ils sont très toxiques, réactifs et cancérigènes.

Pour contourner cet obstacle, on remplace cette réaction par une réaction entre des polycyclocarbonates<sup>19</sup> et des polyamines. *In fine*, on obtient un PU possédant un groupement -OH, un polyhydroxyuréthane et globalement on

18. Polymères comportant des groupes isocyanates -N=C=O.

19. Molécules cycliques comportant le motif -O-C(=O)-O-.

17. Conception.

parlera de **Nonisocyanate PolyUrethane<sup>20</sup> (NIPU)**.

Cependant ces polymères ne possèdent pas tout à fait les mêmes structures propriétés que ceux qui sont obtenus par des voies conventionnelles. Les masses molaires vont être plus réduites et la cinétique moins rapide. Néanmoins, ce type de développement existe et se révèle performant, notamment sur des applications avec des masses molaires limitées, comme les adhésifs.

### 2.3.2. Amélioration de la durabilité : vers des matériaux plus « verts »

Pour obtenir des matériaux plus verts, il faut prendre totalement en compte la fin de vie des matériaux, notamment au travers de problématiques de « circularité » qui prend en compte les différents procédés par lesquels les matériaux en fin de vie sont collectés et introduits dans une nouvelle chaîne de fabrication. Le néologisme « bioéconomie circulaire » met l'accent sur la double préoccupation à prendre en compte : « ressource » et « fin de vie ».

Illustrons ici la problématique de la prise en compte de la fin de vie des polymères avec 2 exemples récents et différents :

- 1) les réseaux covalents adaptables ;
- 2) le recyclage enzymatique (biorecyclage).

#### 1) Les réseaux covalents adaptables (CAN<sup>21</sup>) : faciliter

20. Polyuréthane sans isocyanate.  
21. *Covalent Adaptable Networks* : Réseaux covalents adaptables.

la déconstruction et le remodelage en fin de vie

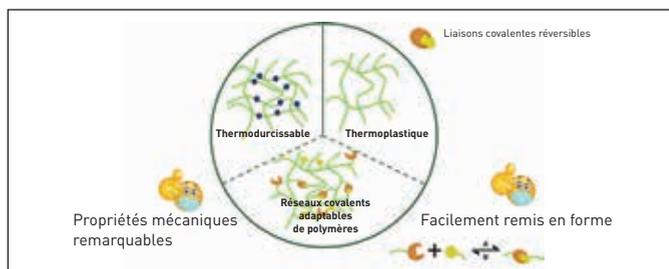
Dans le domaine des matières plastiques, on distingue deux grandes familles : les thermoplastiques, facilement recyclables mais avec des propriétés mécaniques limitées, et les thermodurcissables, qui sont performants mais que l'on ne peut pas facilement recycler et qui sont infusibles et insolubles.

Depuis une dizaine d'années a été développée une troisième famille de matériaux polymères, des réseaux covalents adaptables, une famille dans laquelle on va notamment trouver les « matériaux vitrimères<sup>22</sup> » (**Figure 10**). Les CAN sont à base de réactions covalentes réversibles, par exemple entre des diènes<sup>23</sup> et des diénophiles<sup>24</sup>, comme dans

22. Matériaux pouvant être refondus et remoulés comme le verre tout en conservant des propriétés mécaniques supérieures aux thermoplastiques.

23. Molécules comportant deux groupements alcène conjugués (du type  $-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-$ ).

24. Molécules comportant souvent un groupement alcène et réagissant avec un diène.



**Figure 10**

Illustration des CAN comme un nouveau type de polymères qui ont à la fois les avantages des thermoplastiques et des thermodurcissables.

le cas de la réaction de Diels Alder<sup>25</sup>.

On peut par exemple utiliser des furanes, des composés obtenus par fermentation de cellulose ou d'hémicellulose, pour réaliser une chimie clic<sup>26</sup> (une technique récemment récompensée par le prix Nobel) où l'on va « clicker » un diène avec un diéophile et former un adduit<sup>27</sup>. La température de la réaction conditionne la structure du produit de la réaction : on réalise ici une réaction de Diels-Alder de l'ordre de 60 °C. À une température un peu plus importante (de l'ordre de 120 °C), c'est la réaction inverse qui se produit avec une réaction dite de rétro-Diels-Alder (**Figure 11**). Ces stratégies pourront être

utilisées pour faire et défaire des structures avec des stimuli en fin de vie par exemple. On parle ici de stimuli thermiques mais ils peuvent être pH-métriques, photométriques, etc.

Tout cela ouvre des possibilités de déconstruction du matériau en fin de vie. Ces architectures vont contribuer à faciliter la circularité.

## 2) Développement du recyclage enzymatique

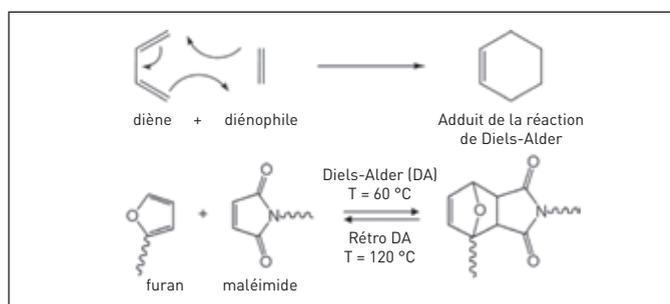
Il existe un certain nombre de types de recyclages (recyclage matière). Aux recyclages classiques, on peut aussi ajouter le recyclage biochimique avec une dégradation enzymatique contrôlée de la matière plastique en fin de vie, de manière à obtenir des synthons valorisables.

Prenons l'exemple d'un polyuréthane (PU) : il contient un certain nombre de fonctions différentes que l'on peut casser en fonction du type d'enzyme utilisé. Par exemple, avec un estérase on casse le groupement ester, en combinant l'amidase et l'estérase, on cassera le groupement

25. Réaction entre un diène et un diéophile pour former un cycle, réversible selon la température.

26. « Chimie clic » : type de réaction très sélective qui permet à deux molécules de se lier facilement (le terme clic évoque le bruit imaginaire du clipsage des deux molécules).

27. Adduit : produit unique d'une réaction d'addition entre deux molécules qui comporte tous les atomes initiaux mais liés différemment.



**Figure 11**

Réaction de Diels-Alder réversible selon la température.

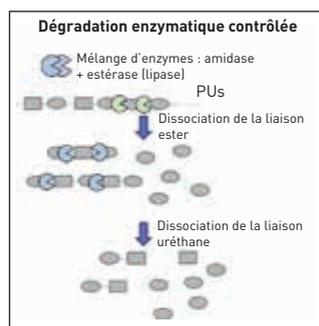
uréthane<sup>28</sup>, qui est pourtant un groupement chimique très robuste (ce qui est d'ailleurs une des raisons de son utilisation) (**Figure 12**).

Ces approches de dégradation enzymatique permettent d'envisager de déconstruire des produits compliqués tels que les mousses de polyuréthane qui sont infusibles et insolubles. On va faire une première étape avec des biotechnologies en utilisant des enzymes ciblées sur certaines fonctions des architectures polymères mais en préservant le groupement uréthane. Ceci va permettre d'obtenir un certain nombre

de molécules (de synthons) qui seront utilisées au cours d'une seconde étape de synthèse chimique pour fabriquer une seconde génération de polymères, par exemple ici des PU thermoplastiques. Ce procédé permet de préserver les groupements uréthanes sur les molécules afin d'obtenir une seconde génération de PU sans ajout d'isocyanate toxique dans un cycle durable (**Figure 13**).

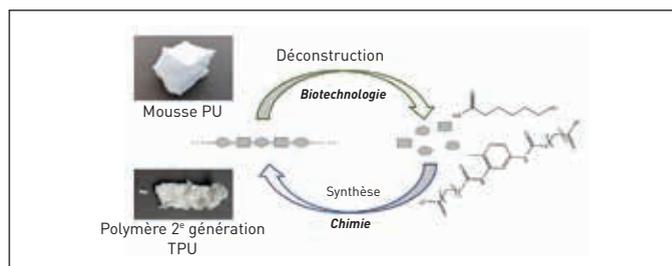
Ces approches mixtes, combinant biotechnologie et chimie sont de plus en plus développées, notamment pour traiter la fin de vie des matériaux particulièrement résistants ou de mélanges de matières plastiques dans les déchets.

28. Groupement  $\text{-NH-C(=O)-O-}$ .



**Figure 12**

Action de l'estérase et de l'amidase sur le PU.



**Figure 13**

Processus et cycle biochimico-chimique de déconstruction-reconstruction du PU.

## Conclusion : nouveaux besoins éthiques, nouvelle chimie et réponses aux attentes sociétales

Naguère portés au pinacle pour leurs incomparables propriétés et praticités, dénoncés ensuite pour leur incompatibilité avec l'environnement, les polymères sont l'exemple emblématique des rapports entre chimie et société. Par l'évoca-

tion de quelques exemples, ce chapitre montre quelques réponses du monde de la chimie dans le domaine des polymères : des inventions et avancées scientifiques adaptées aux dernières évolutions et attentes sociétales et environnementales.

Ce chapitre montre l'importance attachée aux polymères biosourcés. On a vu que des polymères issus de la biomasse peuvent remplacer ou s'associer aux matériaux fossiles existants. Ils peuvent aussi apporter de l'innovation avec de nouvelles architectures chimiques.

La nature biosourcée des matériaux n'est plus suffisante. Il s'agit aussi par exemple de limiter la toxicité des composés utilisés. Il faut aussi prévoir dès le design, dès l'origine du matériau, son adaptation aux attentes de « circularité ».

Ces approches restent ouvertes. Recherches fondamentales et appliquées permettent de développer des matériaux nouveaux tout en préservant l'environnement et la santé des consommateurs. Les polymères sont ici exemplaires d'une démarche qui concerne toute la chimie au service des citoyens pour un futur plus durable.