Plastiques et bioplastiques : retour sur 200 ans d’histoire de recherche et développement

written by Aurore Richel



□□□□ The English version is available by clicking here □□□□

Pas le temps de tout lire ? Un résumé flash en cliquant sur ce lien ou en scannant le QR code suivant avec votre smartphone.

Avancés par la société et les pouvoirs publics comme solutions aux problèmes environnementaux, les bioplastiques seraient des alternatives innovantes sur lesquelles il faut investir. Saviez-vous cependant que les bioplastiques ne sont pas aussi récents dans l’histoire de l’industrie qu’on ne le croit et que ces matériaux polymères existaient déjà il y a près de deux siècles ?

Produits dès la moitié du 19ème siècle, ces bioplastiques ont progressivement été détrônés par des plastiques issus de ressources fossiles comme le pétrole. Mais pour quelles raisons ?

C'est un retour sur deux cents ans de recherche et innovation dans le domaine de l'industrie des matières plastiques que nous vous proposons aujourd'hui.

Note : cet article est la conclusion d'une présentation que j'ai réalisée en Février 2021 à Liège Créative et disponible via ce lien.

Préambule

De tous temps, l'Homme a cherché à façonner la matière et à lui donner des propriétés uniques lui permettant d'atteindre des applications spécifiques. Parmi ces matières, les plastiques sont apparus dès le 19ème siècle comme des matériaux de choix, pouvant prétendre à des propriétés fonctionnelles variées qu'elles soient, entre autres, mécaniques, thermiques, ou acoustiques.

Les plastiques sont des **matières organiques** (c'est-à-dire composées de molécules organiques) pouvant être produites à partir de ressources naturelles renouvelables (comme les matières végétales ou animales) ou non renouvelables (comme le pétrole, le gaz naturel, le charbon). Différents additifs (organiques ou minéraux) sont très souvent inclus dans la formulation d'un objet en matière plastique, lui permettant d'atteindre des propriétés plus affirmées ou différenciées. Le terme plastique est donc un terme très générique et globalisant, faisant référence à une large gamme de matériaux synthétiques, ou semi-synthétiques, exploitables pour un panel d'applications de notre quotidien.

Le terme **plastique** est en réalité un adjectif spécifiant que le matériau en question peut être fondu et moulé pour atteindre des formes, des designs et donc des applications souhaitées. Rigoureusement, il convient donc de parler de **matières plastiques** (que les scientifiques préfèrent encore désigner sous la terminologie correcte de **matériaux polymères**).

Ces matériaux plastiques sont souvent assimilés à des matières modernes en lien avec des éléments de notre quotidien tels que nos emballages (alimentaires ou non), les composants de nos voitures ou avions, les semelles de nos chaussures, etc. Force est de constater qu'il n'existe plus un seul secteur de notre vie qui échappe aux

matières plastiques. En 2018, on estimait que la production annuelle mondiale de matières plastiques, toutes catégories confondues, s'est élevée à 359 millions de tonnes. Elle représentait environ 64 millions de tonnes en Europe en 2018 (valeur qui semble plus ou moins constante sur les 20 dernières années). Cette production en matières plastiques se destine à près de 40% au secteur des emballages (alimentaires ou non alimentaires), suivi par le secteur de la construction (19,8%), des transports et de l'automobile (9,9%) et de l'électronique (6,2%) (**Figure 1**).[1]

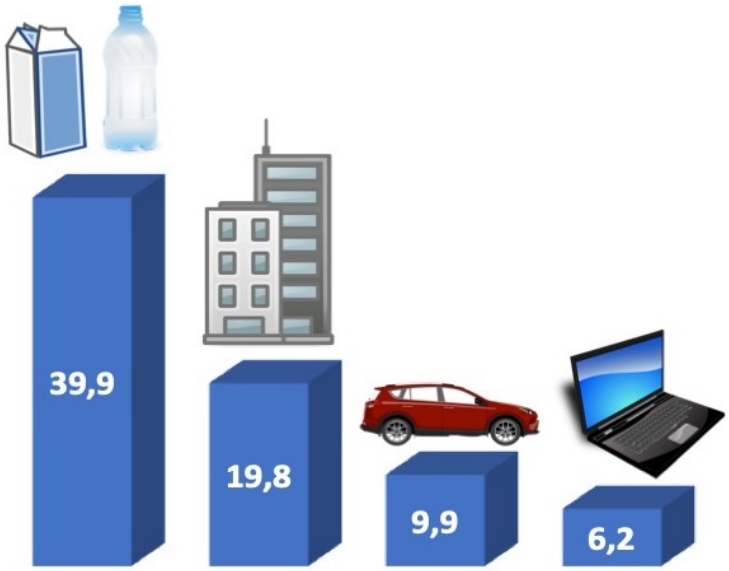


Figure 1. Répartition de la production en matières plastiques sur les 4 plus grands segments de marché (année de référence 2018).

La production cumulée de matières plastiques depuis l'avènement de l'industrie des plastiques (datant des années 50) atteindrait le **chiffre record de 8,3 milliards de tonnes** !! Sur ces 8,3 milliards de tonnes de matières plastiques générées depuis les années 50, on estime que près de 2,5 milliards de tonnes (soit 30%) sont encore « en usage », dans notre quotidien, nos villes ou nos industries. Cela concerne, entre autres, sans être exhaustif, des matériaux plastiques utilisés dans la construction, l'automobile, dans la production de certains objets usuels (pièces de mobilier, etc.) (**Figure 2**).[2]

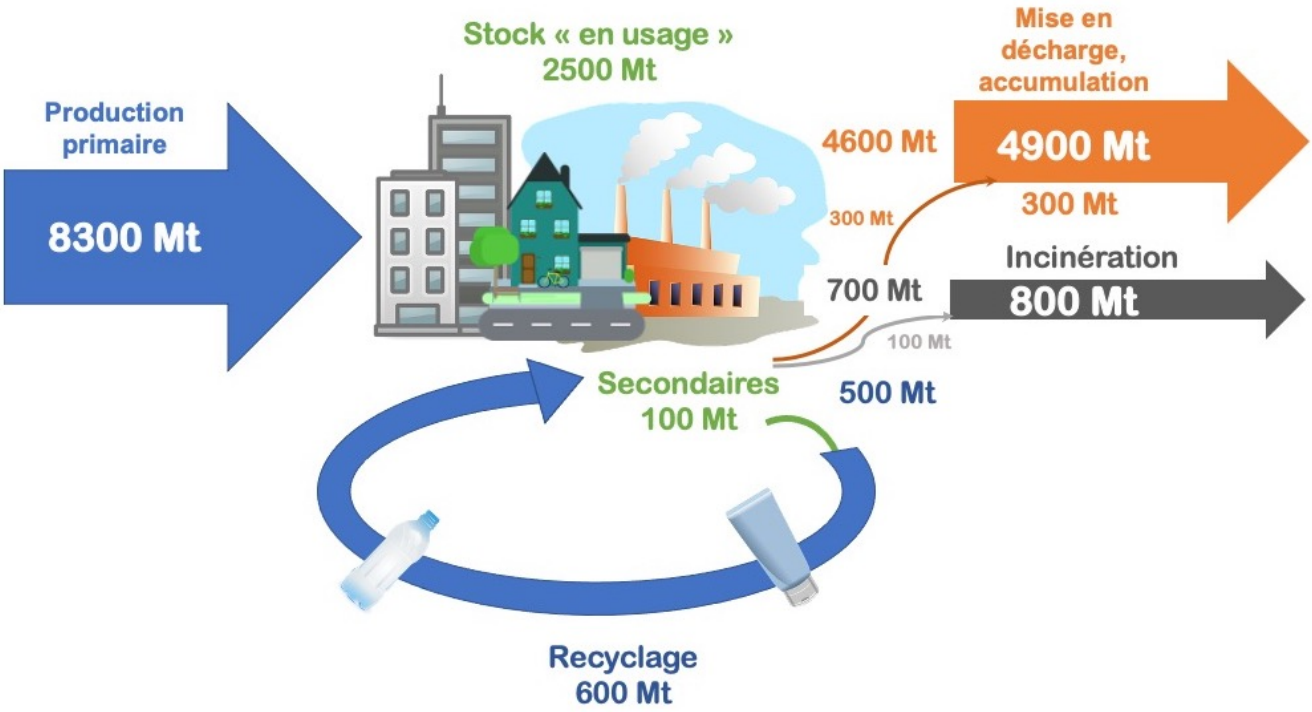


Figure 2. Illustration du devenir des matières plastiques depuis leur production industrielle de masse dans les années 50.

La majeure partie de cette production (soit 70%) a cependant évolué vers des fins de vie distinctes parmi lesquelles on retrouve l'incinération pour la production d'énergie, la mise en décharge et/ou le traitement de ces matières en fin de vie via des filières de recyclage appropriées. Si la mise en décharge et/ou l'accumulation dans l'environnement reste une des voies de fin de vie qui semble la plus marquée pour les matières plastiques, il convient de mentionner que c'est parce que l'incinération et le recyclage sont deux outils beaucoup plus récents dans l'histoire du traitement des déchets plastiques (années 1980). Les chiffres alarmistes de traces de matières plastiques dans l'environnement (incluant les microplastiques) sont donc basés partiellement sur des vestiges de matières plastiques « pré-années 80 » (qui se retrouvent encore dans les écosystèmes ; les plastiques les plus anciens, non souvent biodégradables, mettraient plusieurs décennies ou siècles à se dégrader).

Les premières matières plastiques étaient conçues à partir de ressources renouvelables

Face aux éléments factuels et données chiffrées présentées dans la **Figure 2**, et compte tenue de la demande croissante des consommateurs pour des produits plus respectueux de

l'environnement, les recherches (tant en universités qu'en industries) se sont orientées depuis les années 2000 vers la conception de matériaux plastiques produits à partir de matières végétales, renouvelables, en substituts aux intrants fossiles dont le pétrole.[3]

Si cette option semble attractive sur le papier, il convient de mentionner que l'usage de ressources renouvelables pour synthétiser des plastiques remonte à plusieurs siècles. Déjà au 15ème siècle av. J.-C., les Égyptiens produisaient de manière empirique des agents collants à partir de gélatine ou d'albumine, deux protéines issues de ressources renouvelables (respectivement animales et végétales). Les Méso-Américains, quant à eux, exploitaient déjà le caoutchouc naturel, extrait de l'hévéa, pour la conception de statuettes religieuses. L'usage des cornes de bovin, traitées par une base forte, est quant à lui mentionné au Moyen-Âge pour la production de certaines pièces de conception des lanternes.

Alors que cet usage des ressources renouvelables pour la production de matériaux plastiques est de vigueur depuis des siècles, le tournant dans la « chimie des matériaux polymères » va se positionner dans la première moitié du 19ème siècle avec Charles Goodyear (**Figure 3**). Ce chimiste américain va inventer, de manière complètement fortuite, le procédé de **vulcanisation** qui permet de réticuler le **caoutchouc naturel** liquide pour le transformer en un matériau plastique stable et solide. Cette invention marque le début de la production de matériaux stables dans le temps, fonctionnels et avec des propriétés améliorées.[4]

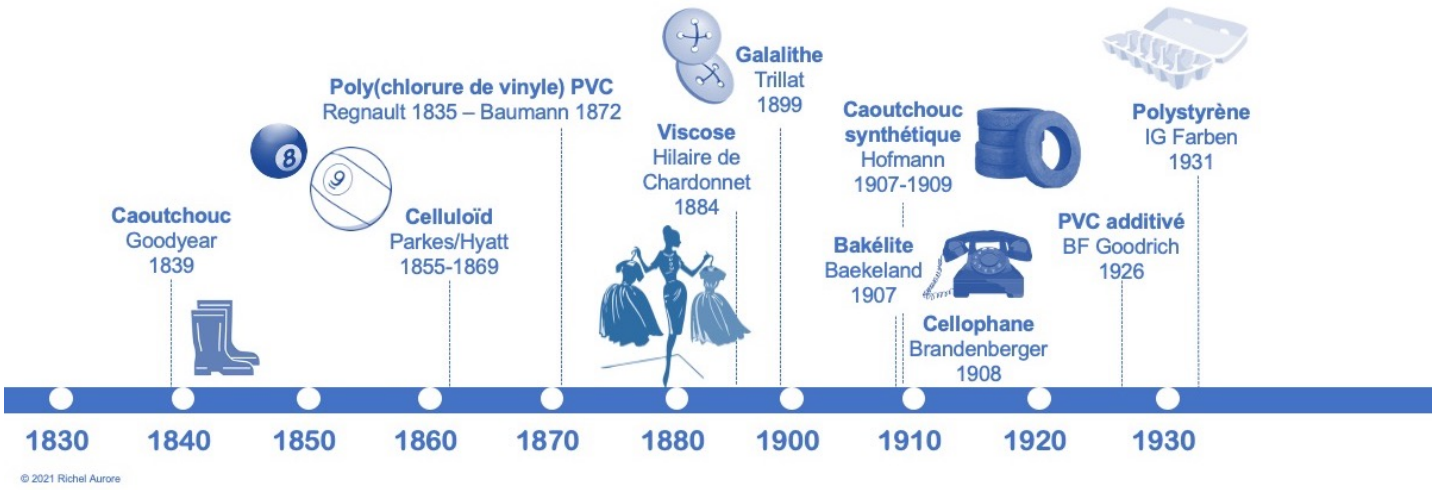


Figure 3. Les premières matières plastiques (19ème siècle et début du 20ème siècle)

Le second fait marquant dans ces débuts de la production des matières plastiques est dû à John Wesley Hyatt en 1855. Cet inventeur a mis au point un substitut synthétique à l'ivoire (dont l'approvisionnement avait été bloqué en raison de la guerre de sécession) en utilisant de la **cellulose** (une molécule constituant tous les végétaux) modifiée chimiquement. Cette cellulose modifiée et stabilisée a été commercialisée sous le nom de Celluloïd dès 1869, marquant ainsi la première fabrication industrielle de matières plastiques (destinées à des usages variés allant de la manufacture de boules de billard à la production de pellicules photographiques).

Outre le celluloïd, la cellulose est également la matière première exploitée pour la production d'un autre matériau polymère encore en usage aujourd'hui dans le secteur textile, à savoir **la viscose**. Obtenue en 1884 par Hilaire de Chardonnet, cette matière se voulait être un substitut plus « économique » à la soie naturelle. La galalithe, matière plastique produite à partir de caséine (une protéine extraite du lait) et servant à la production de boutons, fait aussi partie de ces matériaux plastiques issus de matières premières renouvelables. Sans mettre de mot bien défini sur ces matières plastiques, **les premiers chimistes et industriels synthétisaient déjà des bioplastiques**, c'est-à-dire des plastiques issus de matières végétales (ou animales) renouvelables.

C'est à un **chimiste Belge**, Léo Baekeland, que l'on doit le basculement des matières plastiques vers une **ère plus industrielle et plus maitrisée**. En exploitant la combinaison des phénols avec du formaldéhyde, Baekeland produisit ainsi en 1907 un plastique moulable, pouvant prendre des formes définies dans une presse dont on contrôle la pression et la température. Cette matière va être commercialisé sous le nom de **bakélite**. Combinée avec des charges comme du bois ou de l'amiante, la résine de bakélite (se présentant sous forme de feuilles) pouvait ainsi être fondue et moulée rapidement, ce qui **réduisait les temps de fabrication**. Les pièces moulées étaient lisses, résistantes à la chaleur, aux chocs, de

même qu'à la plupart des solvants. Grâce à sa faible conductivité, la bakélite a été utilisée pour ses propriétés isolantes dans la fabrication de téléphones, d'interrupteurs, de postes radios, etc.

Cette amélioration des options de moulage – et donc de définition de formes, de textures et d'applications possibles des matières plastiques – va s'accompagner au début du 20ème siècle d'un autre fait majeur : **l'utilisation du pétrole comme intrant de choix dans les schémas de production industriels**.

Le pétrole : la révolution de l'industrie des matières plastiques ?

Le développement des techniques d'extraction du pétrole (forage), associé à l'ouverture de nouveaux marchés dont principalement le carburant pour automobile, induit dans les années 1920 le positionnement du pétrole comme une matière première de choix pour l'industrie. L'amélioration des techniques de raffinage du pétrole permet alors d'utiliser certaines fractions du pétrole comme carburants, tandis que d'autres sont alors investiguées pour d'autres usages. Parmi ces usages, l'utilisation des fractions plus légères (gazeuses), dont l'éthylène, pour la production de **polyéthylène** va figurer au tableau des premières initiatives industrielles en la matière dès les années 30 (**Figure 4**). **Les matières plastiques qui vont être développées au 20ème siècle seront, pour la plupart, produites à partir de fractions raffinées de pétrole**. On considère que 4% d'un baril de pétrole étaient destinés il y a encore 10 ans à la production de matières plastiques ; le secteur des carburants, du chauffage et de l'énergie représentant quant à lui environ 86% des usages.

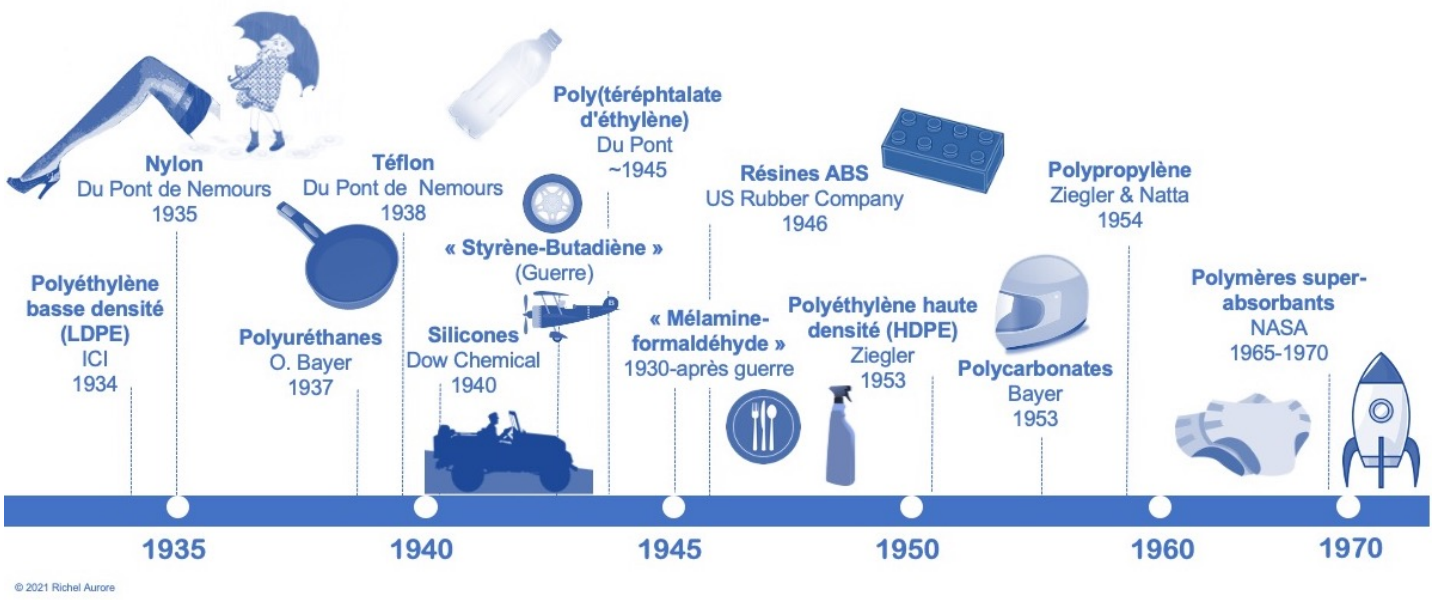


Figure 4. Faits marquants dans l'industrie des matières plastiques du 20ème siècle

Le **nylon, les polyuréthanes et le téflon** font également partie des matières plastiques développées dans la première moitié du 20ème siècle, juste avant la seconde guerre mondiale. Imperméable, résistant aux frottements et élastique, le nylon va progressivement s'implanter dans l'industrie textile. Pouvant être moulé, tissés, le nylon va trouver de multiples applications au cours du temps allant de la confection textile (bas, imperméable, etc.) à la production de gainages et de câbles. Les polyuréthanes quant à eux vont permettre la conception de matériaux (souvent présentés sous la forme de mousses ou de colles) pour des applications qui vont progressivement s'orienter vers le secteur de la construction, de l'ameublement et de l'isolation. Le Téflon, marque commerciale déposée pour le polytétrafluoroéthylène, sera utilisé pour ses propriétés de résistance thermique et d'anti-adhérence comme revêtement des éléments de cuisson.

Les années de guerre seront marquées par le développement d'un matériau clé, à savoir **les résines styrène-butadiène (SBR)**. En plein embargo sur les matières premières, dont le caoutchouc naturel utile pour la fabrication des pneus, les États-Unis mettront au point cette matière plastique très résistante à l'abrasion et au vieillissement et pouvant être utilisée pour la conception de pneumatiques.

Après la Libération en 45, et avec les années 50, la consommation dite « de masse » et la diversification des usages des matières plastiques créent une explosion de la demande. L'amélioration des techniques de catalyse chimique et des procédés industriels associés va permettre l'obtention de nouveaux matériaux (dont le polyéthylène haute densité ou le polypropylène) toujours de plus en plus bon marché et disponibles en large quantité. L'industrie des plastiques finit progressivement par supplanter des industries plus traditionnelles comme celle du papier, du verre ou du bois pour des applications qui relèvent du quotidien. Légers, souples, maniables, pouvant être colorés, les matières plastiques deviennent alors des éléments clés dans le secteur des emballages ou bien s'orientent vers des applications plus 'high-tech' comme l'électronique, l'aéronautique ou le médical.

La **Figure 5** illustre cette flambée de production des matières plastiques depuis les années 50. On note ainsi à l'échelle mondiale une production qui est passée de 1,35 millions à la fin de la seconde guerre mondiale à près de 50 millions de tonnes dans les années 70. Cette production n'a cessé d'augmenter depuis les années 80 en raison de l'essor démographique, de la demande mondiale en matières plastiques qui ne cesse de croitre (et ce, malgré les préoccupations environnementales) et de l'ouverture vers de nouveaux marchés. **En 2020, on estime que plus de 97% des matières plastiques générées dans le monde sont issues de ressources fossiles (dont majoritairement le pétrole). Les bioplastiques ne représentent quant à eux que 3% de l'offre en matières plastiques.**

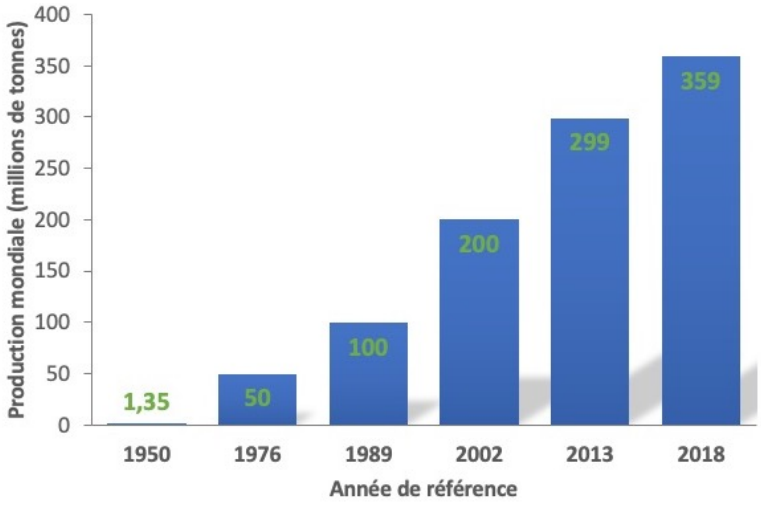




Figure 5. Évolution de la production mondiale en matières plastiques entre 1950 et 2018. [5]

La prise de conscience des empreintes environnementales de certains matériaux polymères, soit dans leur phase de production à partir de ressources fossiles (émissions de gaz à effet de serre), soit dans leur fin de vie mal gérée (microplastiques, notamment) a positionné progressivement les industries et les académies sur des volets de recherche visant à concevoir des matériaux issus de ressources renouvelables et/ou biodégradables (ou compostables). Cette démarche d'éco-design permet également d'élargir l'offre en matières plastiques vers des alternatives jugées plus « écologiques » par les consommateurs, et de faire face aux pressions sur les flux de matières premières, dont le pétrole, et à la volatilité des prix associée.

Les années 2000 : nouvel envol pour les bioplastiques ?

Les matières plastiques qui sont issues de ressources renouvelables, et qui étaient déjà connues depuis le 19ème siècle, semblent donc revenir sur le devant de la scène, soutenus par des initiatives tant économiques que politiques. Ces matières plastiques issues de ressources renouvelables (comme les matières végétales, alimentaires ou non, les déchets organiques ou le dioxyde de carbone) sont désignées sous le terme générique de **bioplastiques**. Positionnés comme des alternatives aux plastiques pétrosourcés, ces bioplastiques peuvent être biodégradables, mais cette fin de vie n'est pas obligatoire pour qu'une matière plastique puisse bénéficier de l'appellation de bioplastique.

Attention en effet, autour de cette définition de « bioplastique » plane divers sous-entendus qui compliquent le débat.

Selon la définition officielle, des bioplastiques sont des matières plastiques, **produites en tout ou en partie à partir de ressources renouvelables, et/ou pouvant être biodégradables**. Ceci implique que des **matériaux plastiques pétrosourcés mais étant biodégradables tombent aussi dans la définition d'un bioplastique…**

Aujourd'hui, la communauté scientifique reconnait donc 3 grandes classes de bioplastiques. Ces classes sont illustrées dans la

Figure 6 (en vert) et sont positionnées par rapport aux matériaux plastiques « traditionnels » (en bleu sur le schéma) qui sont issus de ressources fossiles et qui ne sont pas biodégradables. Les efforts de recherche s'orientent de manière assez inégale entre ces 3 catégories de bioplastiques et sont liés essentiellement à des effets de mode, de stratégies commerciales et/ou d'incitants législatifs variables.

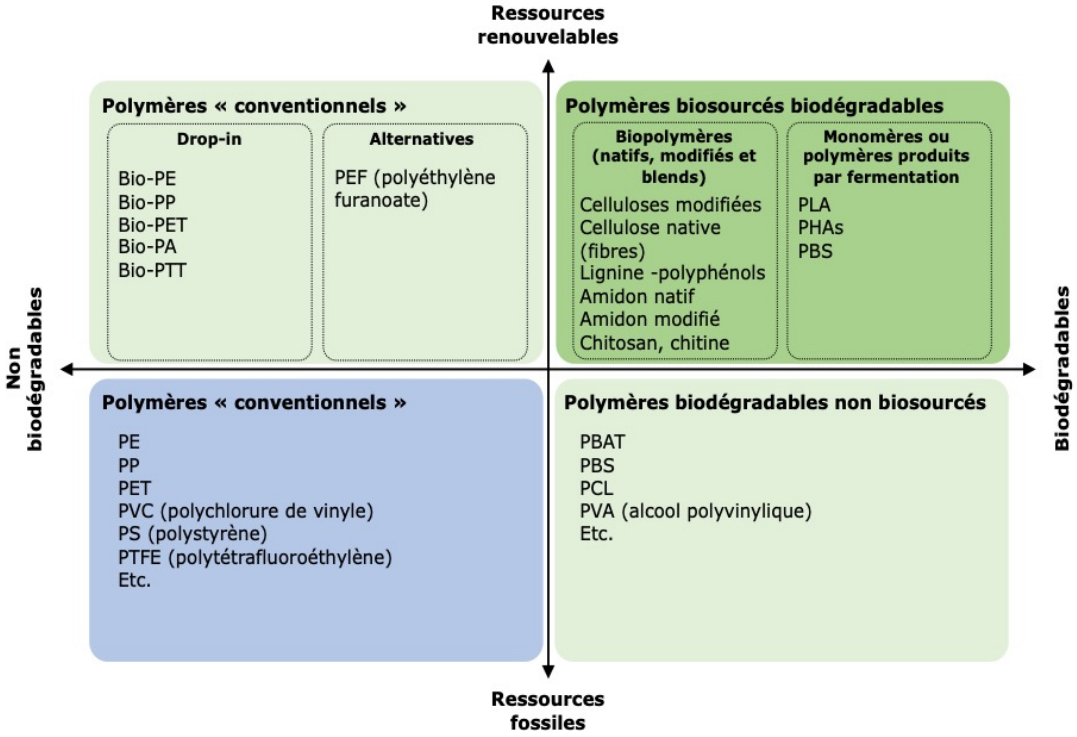


Figure 6. Principales classes de bioplastiques en fonction de leur origine (renouvelable ou non) et de leur fin de vie (biodégradables ou pas). Les matériaux issus de ressources renouvelables uniquement apparaissent donc en haut du schéma.

Les bioplastiques biodégradables (en haut à droite) sont parmi les bioplastiques les plus « anciens » (ces matériaux sont ceux qui étaient déjà synthétisés au 19ème siècle). Ces matériaux sont obtenus soit par extraction directe des molécules présentes dans les végétaux et puis modification chimique (comme c'était déjà le cas avec la cellulose pour la production de celluloïd) soit par fermentation (et polymérisation) de composants fermentescibles contenus dans les ressources renouvelables végétales (souvent riches en sucres).[6] Ces bioplastiques sont donc souvent produits à partir de ressources renouvelables riches en glucides comme

l’amidon, la cellulose, le saccharose, ou le glucose. En 2015, les bioplastiques à base d’amidon représentaient à eux seuls près de 50% de l’offre totale en bioplastiques, suivi par le PLA (acide polylactique), un biopolymère compostable industriellement.

Les plastiques à base de protéines végétales (soja, protéines de blé, de pois) sont également repris dans cette catégorie.

Les matériaux issus de la fermentation directe de glucides comme les PHA (polyhydroxyalcanoates) sont aussi concernés. Leur production industrielle date des années 70, suivant le choc pétrolier de 1973, et ces PHA potentiels se veulent être des substituts à certains plastiques pétrochimiques comme le polypropylène.[7]

Si ces matériaux présentent de multiples avantages aptes à séduire le consommateur, telle qu’une bonne biodégradabilité (certains de ces bioplastiques sont même aptes à se décomposer sur un compost domestique), certaines performances techniques sont encore inférieures aux plastiques conventionnels pour des applications plus spécifiques. Qui plus est, le coût de production de ces bioplastiques et/ou les coûts liés aux matières premières positionnent encore ces bioplastiques comme plus chers que leurs homologues pétrosourcés.[8]

Les bioplastiques issus de ressources renouvelables mais non biodégradables sont ceux qui ont connus le plus d’efforts de recherche sur les 10 dernières années. Ces bioplastiques n’étant pas biodégradables, leur fin de vie est donc strictement analogue aux matériaux pétrosourcés conventionnels, c’est-à-dire d’une part que leur persistance dans l’environnement est identique, mais que d’autre part ces bioplastiques peuvent intégrer les filières de recyclage traditionnelles.

Le bio-polyéthylène (aussi désigné sous le terme de polyéthylène renouvelable) est un polyéthylène fabriqué à partir de bioéthanol, qui devient de l’éthylène après un processus de déshydratation. Il peut être fabriqué à partir de diverses matières premières, notamment la canne à sucre ou certaines céréales. Le PEF, dont nous vous parlions déjà dans un article précédent, appartient aussi à cette catégorie. Le polypropylène (PP) biosourcé connait aussi un

essor fulgurant avec le développement de nouvelles méthodes de production sur les 5 dernières années combinant fermentation et conversion chimique. En 2019, le PP biosourcé est entré sur le marché à une échelle commerciale et sa capacité de production est supposée quadrupler en 2025 en raison des larges champs applicatifs du PP.

En 2020, la production en bioplastiques biodégradables (issus de ressources renouvelables ou de pétrole) a atteint 1,227 millions de tonnes, pour 884 000 tonnes de bioplastiques biosourcés mais non biodégradables. Le secteur des emballages (flexibles et non flexibles) constitue le marché le plus large pour les bioplastiques avec une production annuelle en 2020 qui s'élevait à 998 000 tonnes, suivi par le secteur des biens domestiques (238 000 tonnes) et des textiles (241 000 tonnes). Les bioplastiques tels que le PLA, le bio-polypropylène et les PHA continuent à afficher le taux de croissance le plus élevé parmi tous les bioplastiques.

Que des avantages pour les bioplastiques ?

Si ces bioplastiques restent attractifs sur le papier, leur impact environnemental n'est pas systématiquement amélioré par rapport aux matières plastiques traditionnelles. Celui-ci se doit d'être évalué au cas par cas, sur l'ensemble de la chaine de valeur par une analyse de cycle de vie appropriée.

Une étude récente a par exemple démontré que la production d'une bouteille d'eau de 500 mL en bio-PET (issu de ressources renouvelables) permettait une réduction des gaz à effet de serre de 12% et une diminution de 82% de la consommation en énergie fossile. Par contre, près de 2 litres d'eau sont nécessaires pour produire une bouteille en bio-PET alors que l'eau n'intervient presque pas dans la production du PET « classique » (pétrosourcé) ou recyclé (**Figure 7**).[9]

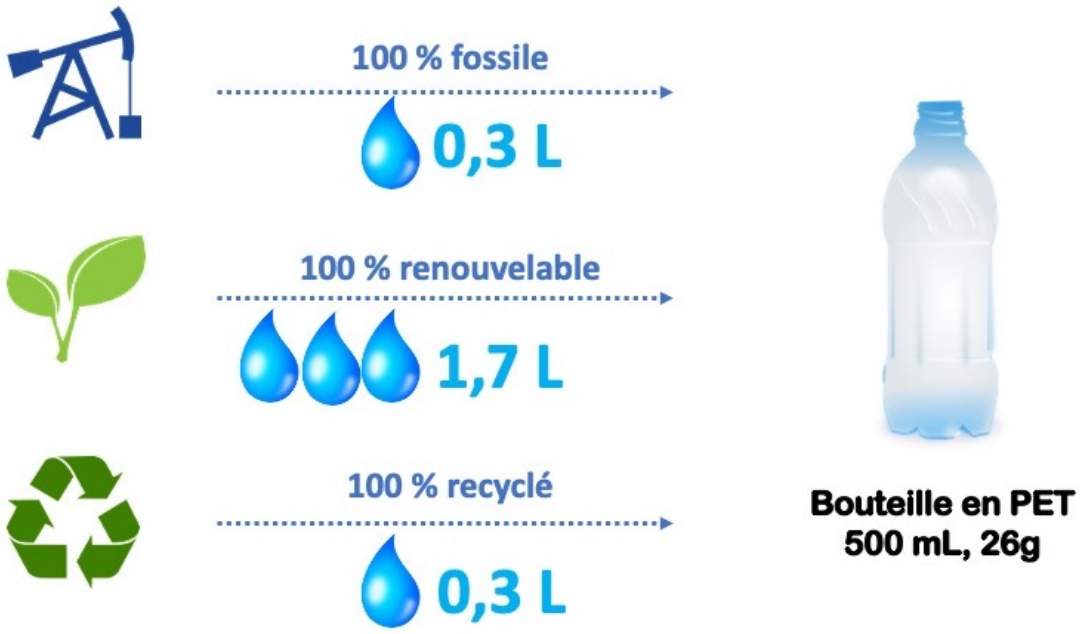


Figure 7. Comparaison de la demande en eau pour la production d'une bouteille en PET de 500 mL en fonction de l'origine de la matière première.

Le **prix des bioplastiques** mis sur le marché reste également plus élevé que ceux des alternatives pétrochimiques. Les multiples étapes de production (dont les rendements sont encore faibles), le prix inhérent des matières premières végétales, de même que le déploiement de nouvelles filières logistiques sont les principaux responsables de ces différences de prix.

Enfin, le développement de filière de bioplastique se heurte à la mise en place plus affirmée et plus soutenue des filières de recyclage conventionnelles. De nombreux scientifiques étudient donc l'intérêt de produire de nouveaux bioplastiques biodégradables si on peut réutiliser des plastiques recyclés.

Ce qu'il faut retenir

Les bioplastiques sont, même s'ils font l'objet de recherches innovantes, des matières dont les origines (même industrielles) remontent au 19ème siècle.

Si ces bioplastiques sont souvent issus de ressources renouvelables, des **flous dans la définition** officielle de ces matières sont notés. Des matériaux plastiques produits à partir de ressources fossiles comme le pétrole sont par définition aussi des

bioplastiques.

Tous les bioplastiques ne sont pas biodégradables. Certains sont en tous points analogues à leurs équivalents pétrosourcés. Le bénéfice sur l'environnement de ces matériaux se doit d'être évalué au cas par cas et sur l'ensemble de la chaine de valeur. La quantité en eau à utiliser pour produire un bioplastique est également une composante à prendre en considération. Si l'eau intervient peu (ou pas) dans la synthèse de matières plastiques pétrosourcées, elle intervient grandement dans la production des alternatives biosourcées.

Les bioplastiques ne représentent en 2020 que près de **3% de la production globale** en matières plastiques. Le coût de production de ces bioplastiques reste élevé et les performances techniques se doivent d'être améliorées. Ce point doit être soutenu plus largement par nos pouvoirs publics afin de permettre aux industries, académies et centres de recherche d'offrir des solutions qui seront compétitives et pérennes.

Plus d'informations ?

N'hésitez pas à me contacter via l'adresse email suivante: a.richel@uliege.be ou via le formulaire disponible en cliquant ici

Notes et références

[1] Source : Plastics Europe, 2019.

[2] Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L. Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made. Sci. Adv. 2017, 3 (7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782.

[3] Meikle, J. L. (1995). American plastic: a cultural history. Rutgers University Press.

[4] GUISE-RICHARDSON, CAI. "Redefining Vulcanization: Charles Goodyear, Patents, and Industrial Control, 1834-1865." Technology and Culture, vol. 51, no. 2, 2010, pp. 357–387. JSTOR, www.jstor.org/stable/40647103. Accessed 9 Mar. 2021.

[5] Source : Plastics Europe, 2020

[6] J. Gonzalez-Gutierrez, P. Partal, M. Garcia-Morales, C. Gallegos, Development of highly-transparent protein/starch-based bioplastics, Bioresource Technology, Volume 101, Issue 6, 2010, Pages 2007-2013, ISSN 0960-8524,

[7] Meereboer, K. W.; Misra, M.; Mohanty, A. K. Review of Recent Advances in the Biodegradability of Polyhydroxyalkanoate (PHA) Bioplastics and Their Composites. Green Chem. 2020, 22 (17), 5519–5558. https://doi.org/10.1039/D0GC01647K.

[8] Narancic T, Cerrone F, Beagan N, O'Connor KE. Recent Advances in Bioplastics: Application and Biodegradation. Polymers (Basel). 2020;12(4):920. Published 2020 Apr 15. doi:10.3390/polym12040920

[9] Benavides, P. T.; Dunn, J. B.; Han, J.; Biddy, M.; Markham, J. Exploring Comparative Energy and Environmental Benefits of Virgin, Recycled, and Bio-Derived PET Bottles. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2018**, *6* (8), 9725–9733.