

Les polymères en 2020

Chiffres, challenges et innovations pour une économie circulaire

Résumé Les polymères progressent dans tous les secteurs de l'économie et contribuent à la résolution de nombreux enjeux sociétaux. La perception souvent négative de l'impact des plastiques sur l'environnement ne doit pas occulter les nombreux avantages qu'ils apportent. Le défi est aujourd'hui de placer les polymères au cœur d'une nouvelle économie circulaire, ce qui implique d'améliorer notablement les circuits de collecte et de recyclage. Les bioplastiques, bien que plébiscités par les consommateurs et mis en avant par le marketing, ne représentent que 1 % de la consommation des plastiques. La chimie reste un élément clé pour réduire les impacts négatifs, tant en développant des matériaux performants qu'en améliorant le recyclage. Enfin, la réduction des impacts environnementaux passe nécessairement par une vision globale des problèmes, qui tient compte de l'intégralité des cycles de vie et de la réalité scientifique.

Mots-clés Polymères, plastiques, bioplastiques, recyclage, développement durable, économie circulaire, valorisation énergétique.

Abstract Polymers in 2020: figures, challenges and innovations for a circular economy

Polymers advance in all sectors of the economy and they participate in solving major societal issues. The often negative perception of the impact of plastics on the environment should not eclipse their many advantages. The challenge is now to place polymers at the heart of a new circular economy, which would favor the collection and recycling circuits. Bioplastics, although approved by consumers and promoted by marketing, represent only 1% of the plastic market. Chemistry remains a key element in reducing the negative impacts, both in developing high-performance materials and in improving recycling. Finally, reducing environmental impacts necessarily requires a global vision of the problems, which takes into account the whole life cycles and the scientific reality.

Keywords Polymers, plastics, bioplastics, recycling, sustainability, circular economy, energy recovery.

Les matières plastiques connaissent un développement foudroyant, sans comparaison avec celui des autres matériaux, et sont devenus incontournables de par leur accessibilité, leur polyvalence et leur faible prix. Elles contribuent autant à relever les grands défis sociétaux et environnementaux – développement des énergies renouvelables, accès à l'eau potable, préservation des aliments –, qu'à améliorer la vie quotidienne de tout un chacun – santé, habitation, mobilité, habillement, sport... [1].

En 2018, la production mondiale de plastiques atteignait 359 millions de tonnes (279 Mt en 2011), dont 62 Mt en Europe [2]. La demande européenne est de 51,2 Mt, qui se répartit principalement entre les domaines de l'emballage (40 %) et de la construction (20 %), suivis par l'automobile (10 %) et les équipements électriques et électroniques (6 %) ; ces deux derniers marchés affichant les plus grandes marges de progression. Elle est concentrée sur quelques polymères dits « standards » dont font partie le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) qui représentent près de 50 % de la demande globale, suivis par le poly(chlorure de vinyle) (PVC), les polyuréthanes (PUR) et le poly(téréphtalate d'éthylène) (PET) (figure 1). L'industrie des plastiques française est en troisième position sur le marché européen ; elle compte 3 725 entreprises et emploie 108 000 personnes pour un chiffre d'affaires de 32 milliards d'euros en 2018 [2-3].

Cependant, comparés aux autres matériaux, les plastiques souffrent d'une mauvaise image auprès des consommateurs, qui ne voient souvent que la partie négative de leur impact sur l'environnement, en particulier à cause de la pollution visuelle criante des plastiques qui échappent aux collectes de déchets. En outre, leur durée de vie très largement supérieure à celle

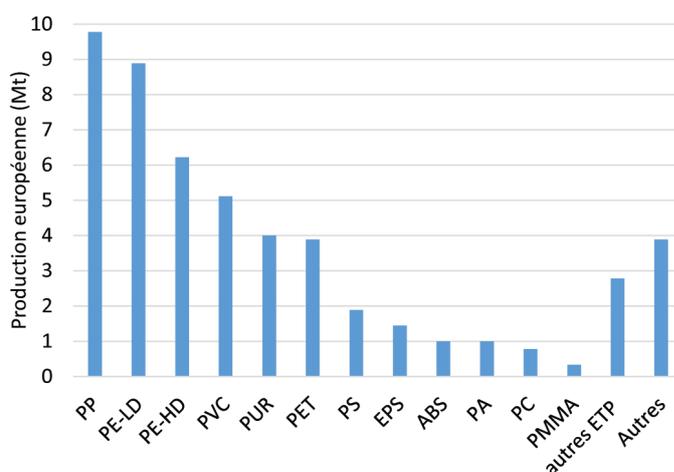


Figure 1 - Demande européenne des polymères (ETP : « engineering thermoplastics »).

de leur utilisation contribue à la genèse d'une pollution multi-échelle, depuis le visible, avec par exemple les sachets et bouteilles plastiques, jusqu'à l'invisible, avec les micro- et nanoparticules. Les microplastiques présentent des particules de tailles comprises entre 5 mm et 1 µm ; en-dessous de 1 µm se trouvent les nanoplastiques [4] (notons que le lavage des textiles synthétiques et l'usure des pneus représentent plus de 60 % de l'origine des microplastiques). D'autre part, leur synthèse consomme des ressources pétrosourcées et rejette des polluants. Mais l'analyse réelle de l'impact environnemental des plastiques doit se faire dans le cadre d'une véritable approche holistique qui intègre l'environnement dans toutes les étapes du cycle de vie de ces matériaux, de la conception

Tableau I - Densités et températures de mise en œuvre de quelques matériaux usuels.

Matière	Densité	Température de fusion ou de mise en œuvre (°C)
Acier	7,8	1 400 – 1 500
Aluminium	2,7	660
Verre	2,5	1 400
PE-LD, PE-HD	0,92 – 0,96	160 – 200 (extrusion, soufflage)
PP	0,9	200 – 280 (injection, moulage)
PET	1,35 – 1,4	280 – 320

à la fin de vie, et en considérant les effets autant négatifs que positifs de l'essor des polymères sur le développement de nos sociétés.

Cet article présente quelques données relatives au marché européen des matières plastiques, en se focalisant sur deux mots-clés qui font leur actualité, à savoir le recyclage et les bioplastiques, aujourd'hui plébiscités par les consommateurs et par les industriels sensibles au développement durable, et en pointant quelques freins pour aller vers une économie pleinement circulaire. Les données exposées ici sont issues des publications des grandes associations de producteurs et utilisateurs de matières plastiques et de bioplastiques, de l'ADEME, du Sénat et de publications scientifiques. Les lectrices et lecteurs intéressés pourront approfondir le sujet en consultant le numéro spécial de 2017 de *L'Actualité Chimique*, « Polymères de demain, boosters d'innovations » [1], l'ouvrage édité par le GFP sur l'impact environnemental des matières plastiques [5], ou les documents du Chemical Sciences and Society Summit (CS3) [4] et de la Fondation Ellen MacArthur [6].

L'impact environnemental doit se mesurer en considérant l'intégralité du cycle de vie

Tous les plastiques ne sont pas produits de la même manière, n'ont pas le même cycle de vie et ne participent pas de la même façon dans les matériaux d'usage. Dans certains cas, le plastique constitue l'essentiel, voire la totalité de la structure même du matériau (bouteilles en PET, sachets en PE, bouchons en PP...). Dans d'autres cas, il n'est que l'un des éléments constitutifs de l'objet considéré (cartes électroniques, matériaux composites...). En fin de vie, ces matériaux deviennent des déchets qui doivent être collectés, triés et traités selon leur nature (recyclage, valorisation énergétique, enfouissement), en sachant que les quantités de plastiques collectées ne sont pas en relation directe avec la demande en plastique observée sur la même échelle de temps.

Les plastiques ne consomment que 5 % de la production mondiale de pétrole et leur utilisation permet d'en économiser une quantité bien plus importante. Les procédés de production et leur utilisation ont le plus souvent des impacts positifs. Ainsi, l'énergie de transformation et de mise en œuvre des plastiques est très inférieure à celle des métaux, verres et céramiques. Par ailleurs, leur plus faible densité allège notablement les structures (tableau I). Un allègement de 10 % des véhicules conduit à une diminution de consommation de 5 à 6 %, mais on pourra noter que malgré les avancées réalisées sur les matériaux de structure des véhicules, leur masse moyenne ne diminue pas (véhicules vendus plus imposants en moyenne). Les avions récents utilisent plus de 50 %

de matériaux composites polymères-fibres de carbone qui réduisent la consommation de kérosène. Plusieurs études effectuées en tenant compte de ces paramètres ont montré que l'impact de l'utilisation des plastiques sur les ressources énergétiques et le changement climatique est globalement positif. Il en résulte que l'impact réel des plastiques ne peut être discuté en ne considérant que leur seule fin de vie, mais en considérant une démarche globale qui intègre aussi leur origine, le procédé de production et les utilisations, autrement dit, raisonner en termes d'unité fonctionnelle et d'écoconception.

Il existe de nombreuses possibilités pour diminuer les impacts environnementaux des plastiques et rentrer plus avant dans une économie circulaire [7-8]. Les premières possibilités sont basées sur le développement du recyclage, impliquant la mise en œuvre de matériaux recyclables, leur collecte et leur tri. La valorisation énergétique des déchets non recyclables constitue une alternative à la mise en décharge des matériaux non recyclables. Les autres possibilités font appel à la chimie qui peut nous aider à comprendre et donc à limiter certains impacts négatifs. En amont du cycle de vie des polymères se place l'utilisation de produits biosourcés principalement issus de l'agriculture (amidon, lignocellulose, huiles végétales...), mais qu'il est nécessaire de transformer. La polymérisation et/ou la modification chimique des polymères doivent respecter au mieux les principes de la « chimie verte » et utiliser dans la mesure du possible les molécules plateformes biosourcées [9]. En fin de cycle de vie, les matériaux biodégradables représentent une solution possible pour diminuer l'impact des matériaux non recyclables et/ou non collectés, à condition toutefois que les processus de dégradation soient effectifs dans les conditions réelles d'utilisation [10]. Dans tous les cas, le traitement des déchets est grandement tributaire des politiques gouvernementales et des consommateurs [11].

Recyclage vs. valorisation énergétique

En 2018, 21,9 Mt de plastiques (42,8 % de la demande) ont été collectés en Europe (Union européenne, Norvège et Suisse) pour être recyclés (32,5 %), incinérés (42,5 %) ou mis en décharge (25 %) [2]. Le recyclage et la valorisation énergétique augmentent d'année en année (figure 2). Ainsi, les plastiques deviennent une source de plus en plus importante de nouvelles matières premières et d'énergie, ce qui nécessite des circuits de collecte et de tri sélectif appropriés. La France

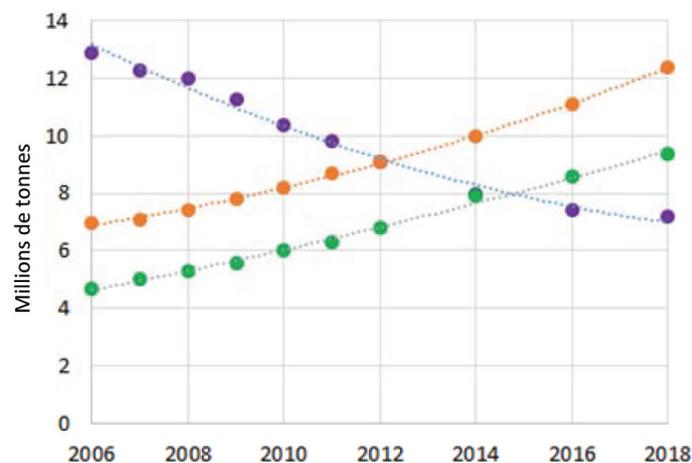


Figure 2 - Évolution de la fin de vie des plastiques en Europe : mise en décharge (●); valorisation énergétique (●); recyclage (●).

ne recycle que 24 % de ses matières plastiques collectées ; elle n'est qu'en 24^e position en Europe et descend même en avant-dernière position si l'on ne considère que les emballages. Par ailleurs, les déchets exportés hors de l'Union européenne ont diminué de 39 % en trois ans.

Recyclage mécanique et chimique

Le recyclage mécanique transforme les déchets sans changer la structure chimique du produit. Après tri et lavage, le broyage mécanique donne une nouvelle matière première. L'éventuelle perte de qualité est corrigée si besoin par addition de polymère vierge et d'additifs de performance (compatibilisants, stabilisants...). Ce type de recyclage représente plus de 99 % des grands thermoplastiques recyclés en Europe. On retiendra que les débouchés pour les granulés recyclés dépendent étroitement du prix des matières vierges et des contraintes réglementaires. Par exemple, le prix de vente du PET vierge est habituellement de l'ordre de 1 000 € la tonne à comparer avec les 1 200 € pour le PET recyclé, dont le prix est affecté par le coût des phases de collecte, tri, lavage et dépollution, « recompoundage ». Les contraintes législatives imposant un taux d'incorporation contribuent ainsi à assurer certains débouchés de ces polymères recyclés. Plusieurs actions sont en cours pour augmenter la circularité des polyoléfines (PureCycle Technologies [12]) et des dérivés styréniques (Polystyvert Technology, PolyStyreneLoop [13]). L'apport de propriétés mécaniques élevées impose souvent la mise en œuvre de thermodurs de type époxy ou polyester, dont le recyclage implique un broyage qui conduit à des charges utilisables pour d'autres applications. Il en est de même pour les élastomères. Par exemple, un nouveau matériau combinant 0,5 % de caoutchouc et 99,5 % de béton recyclé a été récemment présenté comme une alternative 100 % recyclée, qui offre une nouvelle façon de réutiliser les pneus et les déchets de construction.

Le recyclage peut se faire par dissolution sélective du polymère d'intérêt, suivie de la précipitation de ce polymère après séparation des impuretés. Le procédé VinyLoop développé par Solvay pour le recyclage du PVC en est un exemple connu. Cependant, la séparation finale des phtalates du PVC souple pour respecter la réglementation REACH rend le procédé économiquement non viable, lequel doit être remplacé par le procédé Texyloop® d'ici 2022.

Le recyclage chimique a souvent pour objet la dépolymérisation des macromolécules pour retrouver les monomères de départ. Leur polymérisation subséquente redonne un nouveau polymère dont les propriétés sont naturellement identiques aux polymères issus des monomères pétrosourcés. Les exemples connus sont la dépolymérisation du PET et du poly(méthacrylate de méthyle) (PMMA). Le recyclage chimique offre aussi une alternative quand le recyclage mécanique ne permet pas de revenir à une matière « neutre », par exemple dans le cas de mélange de produits colorés [14]. Mais lui aussi doit être abordé avec une analyse de cycle de vie complète qui peut amener à repenser les produits et leurs applications. IFPEN développe un procédé de glycolyse qui permet de récupérer les monomères à partir de PET coloré ou opaque [15]. Le groupe canadien Loop™ Industries vient d'annoncer la création en Europe, en partenariat avec le groupe Suez, d'une usine recyclant l'ensemble des PET, quelle que soit leur origine, pour donner un PET de qualité alimentaire, à partir du diméthyl téréphtalate et de l'éthylène glycol ainsi récupérés. La société française Carbios a annoncé récemment

le développement d'une hydrolase permettant la dépolymérisation de 90 % du PET en monomères en dix heures ; la mise en opération d'un pilote est prévue pour 2021 [16-17]. La résine thermoplastique Elium® photopolymérisable proposée par Arkema permet de fabriquer des composites avec les mêmes procédés que ceux utilisés pour les thermodurcissables [18]. En fin de vie, après broyage, les granulats sont dépolymérisés à chaud et les fibres de verre ou de carbone peuvent être réutilisables. INEOS Styrolution annonce la création en France d'une usine de recyclage chimique par dépolymérisation du polystyrène à l'horizon mi-2023 [19]. La scission de certaines liaisons covalentes « fragiles » offre une autre stratégie de valorisation des thermodurs [20]. Les matériaux réticulés thermoréversibles qui utilisent les concepts de « click chemistry » sont aujourd'hui bien connus [21-22]. L'introduction de fonctions éther de silyle vient récemment d'être proposée [23].

La gazéification et la pyrolyse des polymères produisent des fractions liquides et un gaz de synthèse (CO + H₂) utilisable comme agent de réduction, mais les bilans énergétiques et environnementaux de la pyrogazéification restent toutefois mitigés, d'autant plus que les résidus issus de la pyrogazéification restent des déchets qu'il faudra mettre en décharge [24].

Valorisation énergétique

L'augmentation programmée des taux de recyclage augmentera significativement les opérations de collecte et de tri et conduira automatiquement à un accroissement de la quantité des produits refusés. Une plus grande valorisation des déchets plastiques non recyclables passe donc par une diminution drastique, voire l'arrêt total de leur mise en décharge au profit de leur valorisation énergétique [8]. Cette action est soutenue par la politique nationale de prévention et de gestion des déchets qui vise un objectif de réduction du stockage des déchets non dangereux de 50 % d'ici 2025, par rapport aux tonnages de 2010.

L'incinération de combustibles solides de récupération (CSR), préparés à partir de déchets non recyclables et non dangereux, permet de récupérer une énergie de substitution aux énergies fossiles. Les déchets d'emballage plastiques ont un pouvoir calorifique élevé, de même ordre de grandeur que les sources d'énergie traditionnelles (tableau II). Le plastique permet aussi d'améliorer la combustion des ordures ménagères et donne moins d'imbrûlés. En outre, les CSR sont aussi utilisés par de nombreuses industries gourmandes en énergie comme les cimenteries et les aciéries. Un rapport du Sénat sur le recyclage et la valorisation des déchets ménagers indique que la combustion du plastique dans les

Tableau II - Pouvoirs calorifiques des polymères comparés aux autres combustibles.

*PCI (pouvoir calorifique inférieur) : quantité totale de chaleur dégagée par la combustion, n'incluant pas la condensation de la vapeur d'eau contenue dans les fumées.

Matériau	PCI* polymère (MJ/kg)	PCI déchets emballage	Matériau	PCI
PE	43 - 46	22	Fuel	44
PP	44	24	Bois	16
PS - PSE	40	22	Charbon	29
PVC	20	12	Papier carton	17
PET	22 - 45	13	Ordures ménagères	8

	Pétrosourcé	Partiellement pétrosourcé	Biosourcé
Biodégradable en conditions de compostage industriel	PBS, PCL, PBSA	Mélanges à base d'amidon avec des polymères biodégradables pétrosourcés	Mélanges à base d'amidon avec des polymères biodégradables biosourcés Cellulose régénérée PLA, PHA et mélanges
Non biodégradable	PE, PP PET, PBT PA 6, PA 6,6 PVC	Mélanges à base d'amidon avec des polyoléfinés pétrosourcés PET à base EG biosourcé PTT, PBT	Bio-PE, bio-PP PA 6, PA 11, PA 4,10 Bio-PET, PBT, PEF

usines d'incinération d'ordures ménagères équipées d'un système de récupération de chaleur permettrait d'économiser chaque année 300 000 tonnes d'équivalent pétrole [25]. Cette valorisation permettrait de générer 300 TWh supplémentaires d'électricité et de chaleur chaque année [26].

Le cas des emballages plastiques illustre bien la problématique du recyclage et de la valorisation énergétique : 50 % des produits en Europe sont emballés dans du plastique – PE et PS expansé sont deux exemples bien connus du grand public. L'utilisation de plastique diminue le poids des emballages : emballer 1 kg de produit demande en moyenne 22 g de plastique pour 88 g d'un autre matériau d'emballage [7-8]. De même, utiliser uniquement des emballages plastiques permet de diminuer de 5 kg les émissions de CO₂ aux 100 km parcourus. En 2018, 17,8 Mt de déchets d'emballages ont été collectés. Bien que le recyclage soit a priori la meilleure solution, il existe un seuil optimal de recyclage, principalement conditionné par la taille des emballages, qui se situe actuellement en Europe entre 35 et 50 %. Même collectés, les emballages de petit format sont peu recyclés car difficiles à trier. PlasticsEurope estime ainsi que ces emballages ne présentent aucun potentiel de recyclage : « *Aller au-delà est trop coûteux ou sans intérêt pour l'environnement* ». La valorisation énergétique devient alors une alternative très intéressante pour ces déchets plastiques [8]. La loi relative à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire de 2020 inscrit néanmoins dans le code de l'environnement « *tendre vers l'objectif de 100 % de plastique recyclé d'ici le 1^{er} janvier 2025* ».

Il reste enfin à considérer la part importante des déchets non collectés. Même si le pourcentage de plastiques récupérés augmente régulièrement (plus de 19 % en douze ans de 2006 à 2018), force est de constater que plus de la moitié des plastiques se retrouve encore dans l'environnement. Si le rôle du politique est d'assurer autant que faire se peut la collecte, le tri et le recyclage, la responsabilité individuelle est en amont de toute la chaîne de recyclage.

Le marché des bioplastiques

Derrière l'appellation « bioplastiques »

Les bioplastiques apparaissent aujourd'hui pour beaucoup comme une réponse aux consommateurs sensibles au développement durable, le préfixe « bio » étant souvent à tort ou à raison synonyme de respect de la nature et impliquant d'office une production 100 % naturelle, sans apports d'origine pétrosourcée, ni OGM. On met aussi en avant le fait que les bioplastiques permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre, n'utilisent pas de combustible fossile et peuvent éventuellement utiliser les ressources locales [27]. On parle ainsi de plastiques 100 % biosourcés, à ne pas

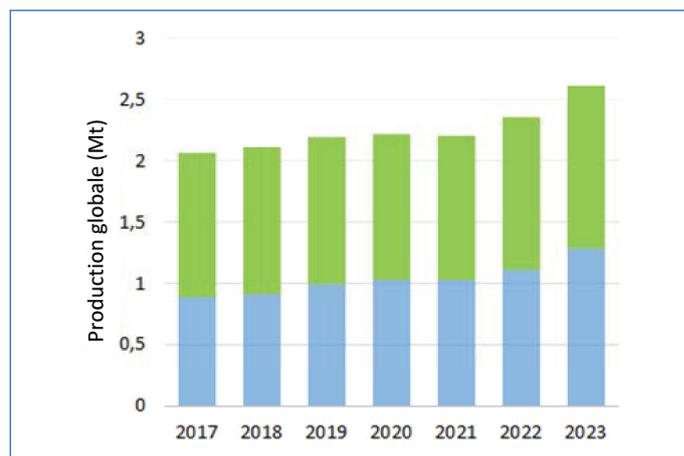


Figure 3 - Évolution de la part des bioplastiques (en millions de tonnes) biosourcés (■) et biodégradables (■) ; valeurs à comparer avec les 359 Mt de la production mondiale en 2018 (les données des années 2019 et suivantes sont estimées).

confondre avec 100 % recyclés. On communique aujourd'hui sur le polyéthylène végétal.

L'appellation « bioplastiques » recouvre deux concepts différents. Les polymères biosourcés font référence à l'origine naturelle du polymère (biomasse renouvelable telle que le blé, le maïs, l'huile de ricin ou la canne à sucre). Les plastiques biodégradables font référence à leur fin de vie : le matériau peut se dégrader en présence de micro-organismes sous certaines conditions. Ces deux familles peuvent se recouper, mais biosourcé n'implique pas biodégradable et réciproquement. Les plastiques biodégradables peuvent être issus de ressources fossiles, et les plastiques biosourcés ne sont pas tous biodégradables (tableau III).

Selon les scénarios et les projections envisagés à partir des données de 2009, la production mondiale des plastiques biosourcés était estimée entre 2 et 4,5 millions de tonnes [28]. L'association des producteurs et utilisateurs de bioplastiques a publié récemment de nouvelles données, portant sur 2,1 Mt de bioplastiques, dont seulement 0,9 Mt de biosourcés, sur les 359 Mt de matières plastiques produites mondialement, soit seulement 0,6 % du marché mondial (figure 3). Les mélanges à base d'amidon représentent la plus grande part du marché des bioplastiques (figure 4), suivis par le poly(acide lactique) (PLA), le bio-PE et les polyesters à base d'acide téréphtalique, biodégradables ou non [29-30]. Les polymères biosourcés sont en croissance régulière et la R & D s'attache à mettre au point d'autres familles de polymères issus des végétaux.

Selon son origine et sa structure, chaque bioplastique présente des avantages et des inconvénients. Le syndicat Allizé-Plasturgie (Lyon), devenu Polyvia en novembre 2020,

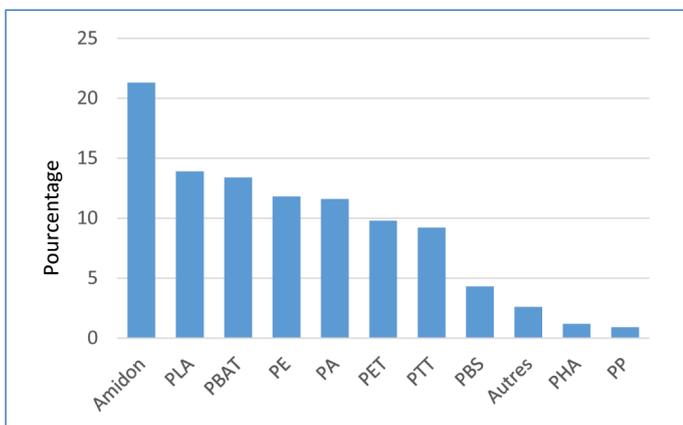


Figure 4 - Le marché des bioplastiques, biosourcés et/ou biodégradables en 2019. Amidon : mélanges à base d'amidon. Autres : autres polymères biosourcés et biodégradables.

propose une analyse SWOT [31] de plusieurs bioplastiques [30]. Les bioplastiques présentent de nombreux avantages en termes de marketing car ils contribuent à renforcer l'attractivité du produit et donc l'image de marque de l'entreprise [32] et deviennent un nouvel outil de communication : l'entreprise s'engage dans une démarche de développement durable et le fait savoir, à tel point que l'ADEME propose un guide pour éviter les dérives possibles vers le « greenwashing » [33].

Cependant, les plastiques biosourcés sont issus de ressources agricoles et dépendent aussi des ressources fossiles et de la pétrochimie, tant pour leur production (agrochimie, extraction des molécules d'intérêt) et leur mise en forme que pour leur transport et leur recyclage. À titre d'exemple, la figure 5 compare l'utilisation des ressources pour la production d'une bouteille en PET pétrosourcée ou en PLA biosourcé [34]. Il apparaît que si le PLA a un impact sur les ressources fossiles plus faible que le PET, ses impacts sont plus élevés sur la consommation et la pollution de l'eau [35]. On notera aussi que si l'augmentation de la mise en concurrence des terres arables ou la diminution de l'habitat des espèces animales doit être également évoquée pour la production de l'huile de palme, on en parle moins quand il s'agit des plastiques biosourcés, même si la hausse de la demande conduira aux

mêmes effets. Enfin, l'impact environnemental global des nouveaux bioplastiques est encore à préciser et nécessite une analyse complète sur l'ensemble du cycle de vie.

Les plastiques biodégradables

Les plastiques biodégradables sont des matériaux pouvant être dégradés sous l'action de micro-organismes en eau, CO₂ ou CH₄, sels minéraux, avec l'apparition d'une nouvelle biomasse. La biodégradabilité constitue une des fins de vie possibles des polymères, si la structure chimique et la morphologie le permettent. Ainsi, le PET est peu biodégradable de par la stabilité chimique des esters aromatiques, son hydrophobie et sa cristallinité, d'où le développement de nouveaux polyesters comme le poly(butylène adipate co-téréphtalate) (PBAT), le poly(butylène succinate) (PBS) et le PLA.

On confond souvent matériaux biodégradables et compostables ; les conditions nécessaires à la biodégradation ne sont pas toujours réalisables dans les conditions naturelles [10]. Les normes ISO 14855 et EN 13432:2000 précisent que 90 % de biodégradation aérobie doit être observée en moins de six mois dans les conditions de compostage contrôlé à 58 °C, conditions non remplies lorsque le plastique est rejeté dans un milieu naturel. Ainsi, mentionner sur les sacs qu'ils sont bons pour la nature induit souvent le consommateur en erreur.

La confusion existe aussi avec les sacs biofragmentables, constitués par exemple d'amidon biodégradable et d'un autre composant non dégradé. La biofragmentation de ces sacs génère autant de microplastiques invisibles ; on transforme ici une pollution visuelle en une pollution plus sournoise. Les polymères biofragmentables sont à distinguer des polymères oxodégradables qui nécessitent l'addition de sels métalliques favorisant leur photo-oxydation. Ces sels se retrouvent dans le sol après dégradation du polymère et rendent les sacs inaptes au recyclage. Ces polymères ne sont pas biodégradables car leur dégradation ne nécessite pas de micro-organismes. Les seuls sacs qui ne présenteraient aucun danger sont les sacs certifiés « OK compost Home » qui peuvent être compostés aussi bien dans des installations industrielles que dans des composteurs domestiques.

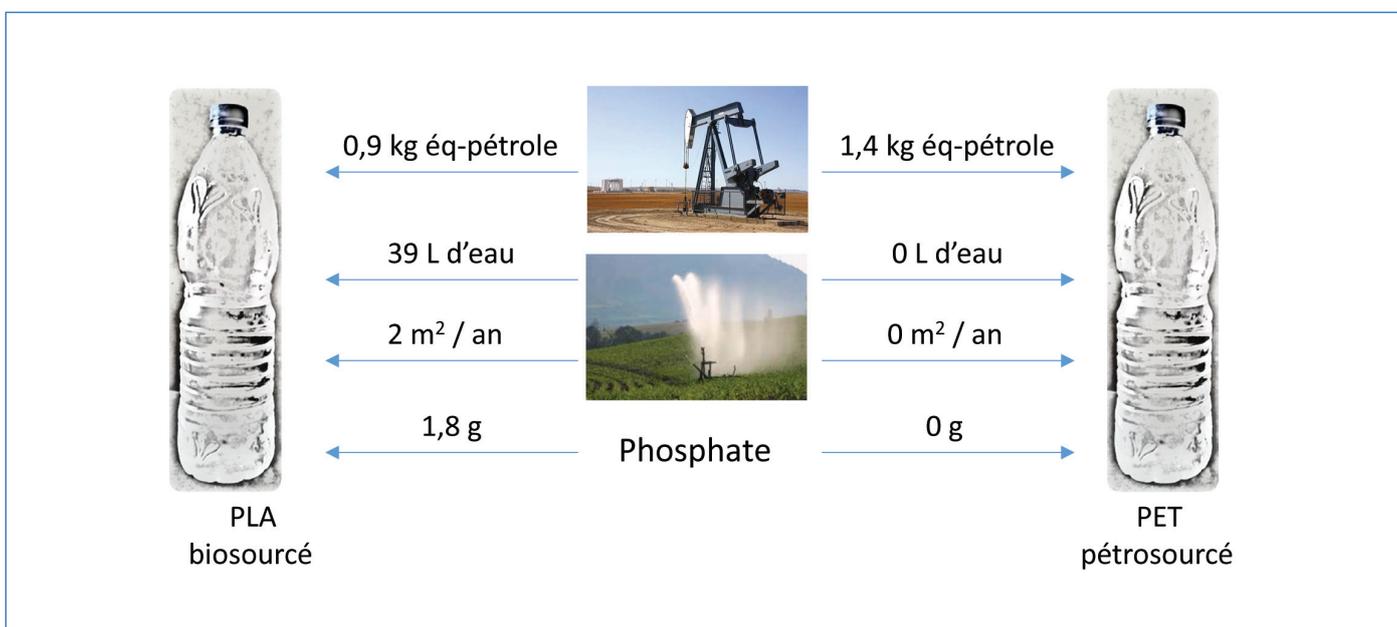


Figure 5 - Comparaison des ressources utilisées pour la production d'une bouteille en PET pétrosourcé et en PLA biosourcé (valeurs indiquées pour 1 kg de matière).

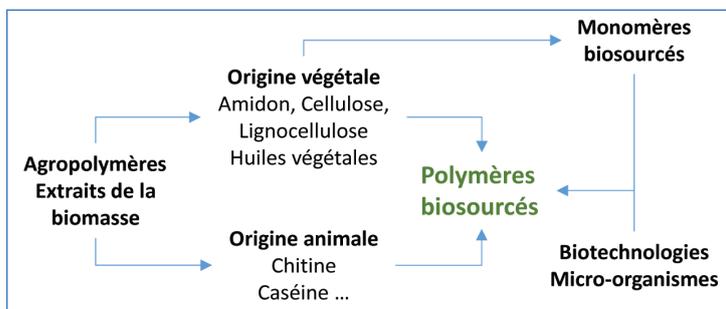


Figure 6 - Origines des polymères biosourcés.

Les plastiques biosourcés

La principale source des polymères biosourcés vient des agropolymères extraits de la biomasse (figure 6), soit par la mise en œuvre des polymères après extraction, purification et si besoin modifications chimiques, soit comme origine de monomères biosourcés.

Les mélanges à base d'amidon représentent la plus grande part du marché des bioplastiques. Le cycle de vie des polymères issus d'agroressources présente un bel exemple d'économie circulaire si le matériau remplit effectivement les conditions de compostage [36]. L'amidon natif doit être déstructuré et plastifié (amidon thermoplastique TPS). L'hydrophilie marquée de ces TPS et les propriétés mécaniques médiocres nécessitent des modifications chimiques et des mélanges par extrusion réactive avec mise en œuvre de compatibilisants pour pallier la non-miscibilité des constituants. La biodégradabilité de ces mélanges dépend alors du constituant additionnel (cf. par exemple les sacs biofragmentables).

Dans le domaine de la cellulose, le procédé Lyocell, qui utilise la *N*-méthylmorpholine-*N*-oxyde (NMMO), a permis le développement de nouvelles fibres textiles, a priori plus respectueuses de l'environnement que le procédé viscose (procédé xanthate avec CS₂) [37]. Les matériaux cellulosiques ont été parmi les premiers matériaux polymères (celluloïd, 1856) avant d'être supplantés par les polymères de synthèse ; ils sont aujourd'hui en pleine renaissance. Leur modification chimique conduit à des matériaux de haute performance [38-40]. Les biocomposites – utilisation de matrices et/ou de renforts biosourcés – sont maintenant en plein essor.

La biomasse est aussi source de monomères biosourcés dont la (co)polymérisation conduit à des polymères totalement ou partiellement biosourcés. Ces polymères biosourcés reposent sur la synthèse des monomères qui peut comporter un certain nombre de réactions chimiques. Le PA 11 est souvent donné comme exemple d'un polymère biosourcé issu de l'huile de ricin, mais sa synthèse passe par cinq intermédiaires réactionnels avant la polymérisation. La structure chimique de ces polymères peut être strictement identique à celle des polymères d'origine fossile, auquel cas les caractéristiques physico-chimiques et les filières de tri et de recyclage sont identiques (PE, PET par exemple). Les monomères biosourcés peuvent aussi conduire à des structures chimiques différentes et à des polymères innovants. L'isosorbide en est un exemple bien connu [41]. Des thermodurs 100 % biosourcés ont été obtenus à partir d'huiles végétales époxydées et d'alcool furfurylique [42].

Le bio-PE est obtenu par polymérisation du bioéthylène, issu du bioéthanol, lui-même issu du sucre de canne. Ce bio-PE possède naturellement les mêmes caractéristiques et donc les mêmes propriétés qu'un PE pétrosourcé, mais il n'est pas

biodégradable. La compagnie brésilienne Braskem commercialise le bio-PE « l'm green™ » [43], mettant en avant le fait que la croissance de la canne à sucre contribue à la réduction du réchauffement climatique de par l'absorption du CO₂ de l'atmosphère : 1 t de bio-PE capture 2,5 t équivalent CO₂ ; il est précisé que l'eau nécessaire à l'irrigation vient du climat tropical. Les conséquences socioéconomiques et environnementales inhérentes à l'augmentation de la surface des terres agricoles et à leur exploitation ne sont pas comptabilisées. D'un point de vue marketing, le bio-PE est devenu le polyéthylène végétal. Par exemple, un groupe industriel a fait le choix de remplacer le polyéthylène fossile par du polyéthylène végétal pour l'ensemble de ses produits. On n'hésite pas à parler d'innovation technologique. Le groupe Lego® a mis sur le marché des pièces fabriquées en polyéthylène végétal : « *Bien qu'obtenu à partir de canne à sucre, ce n'est pas pour autant que ce plastique est comestible ou qu'il a un goût sucré* », prend soin de préciser le groupe [44].

Le PLA est un polymère synthétique biosourcé et biodégradable. Il est synthétisé par polycondensation directe de l'acide lactique (procédé Mitsui) ou par polymérisation par ouverture de cycle du lactide. Le procédé Cargill, exploité par NatureWorks, est un procédé complet constitué de l'hydrolyse de l'amidon, la fermentation du glucose, la synthèse du lactide suivie de sa polymérisation. De par sa biodégradabilité affichée, son impact environnemental le démarque des autres plastiques. Facilement injectable, il est proposé comme alternative pour la production de vaisselle jetable transparente. La production du PLA a augmenté de 41 % en six ans, pour atteindre 293 290 tonnes en 2019, avec un objectif de 317 000 tonnes en 2024. Bien que potentiellement biodégradable, il n'est cependant compostable qu'en milieu industriel. Enfin, au même titre que le bio-PE, l'essor du PLA sera accompagné de la mise en concurrence des terres agricoles et des impacts environnementaux associés déjà évoqués précédemment [45].

La société Coca-Cola® communique aujourd'hui sur une bouteille en PET 100 % biosourcé. S'il est facile d'obtenir un PET affichant 30 % de matière biosourcée à partir de bioéthylène glycol, l'élaboration d'un PET 100 % biosourcé implique un acide téréphtalique biosourcé, généralement obtenu à partir du paraxylène (PX) biosourcé. Parmi les voies d'accès au bio-PX, on retiendra le procédé Bioforming de Virent qui permet de l'obtenir à partir de sucres conventionnels et cellulosiques en combinant une étape de reformage en phase aqueuse et une étape de conversion catalytique. Ce procédé, qui rentre en phase commerciale, permet de réduire de 70 % les émissions de CO₂ par rapport au PX pétrosourcé [46].

L'hydroxyméthyl-5-furfural (5-HMF) est une molécule plate-forme très intéressante et constitue une autre voie d'accès au bio-PX (figure 7). Le même 5-HMF conduit aussi à l'acide téréphtalique via l'acide furane dicarboxylique (FDCA). Une autre alternative consiste à remplacer l'acide téréphtalique par le FDCA. On obtient ainsi le poly(furanoate d'éthylène) (PEF), dont plusieurs caractéristiques sont supérieures à celles du PET. La mise sur le marché du PEF est annoncée pour 2023.

Diversifier les ressources et optimiser leurs fins de vie : une utilisation durable des plastiques

Le marché des plastiques est soutenu par une demande importante qui concerne principalement les secteurs de

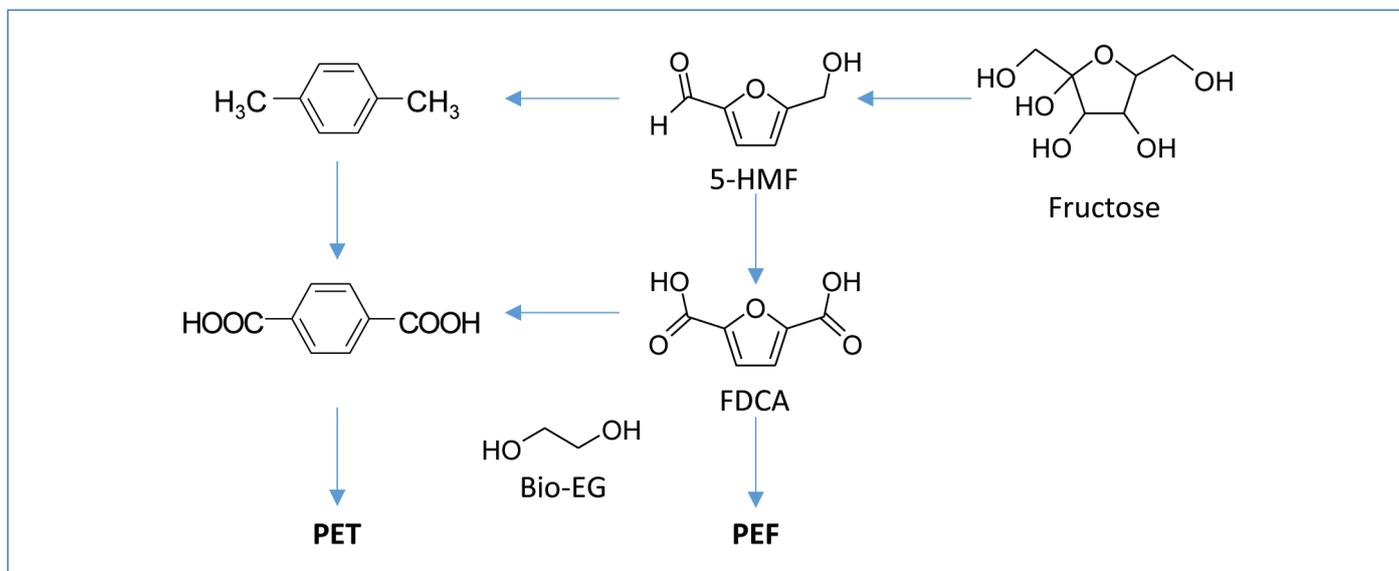


Figure 7 - Vers le bio-PET et le PEF.

l'emballage et de la construction. Les deux secteurs de l'automobile et des équipements électriques et électroniques affichent les plus grandes marges de progression. D'autres secteurs de performance, moins importants en volumes mais à plus forte valorisation, connaissent aussi une croissance forte : les applications médicales, l'aérospatial, les énergies nouvelles, la mobilité durable... Ils concentrent les efforts de R & D les plus élevés et contribuent aux progrès sociétaux.

La vision souvent négative de l'impact des plastiques sur l'environnement ne doit pas occulter les nombreux avantages qu'ils apportent. La solution idéale serait de placer les plastiques au cœur d'une nouvelle économie circulaire, en lieu et place de la traditionnelle économie linéaire, où l'ensemble des déchets plastiques serait collecté, puis réinjecté dans les circuits de recyclage et de valorisation énergétique, pour éviter qu'ils ne se soient rejetés dans l'environnement.

Cette solution idéale reste cependant très difficile à mettre en œuvre si l'on considère que moins de la moitié des plastiques sont actuellement collectés en Europe dont seulement un tiers est recyclé. Plus de trente organisations se sont regroupées en une « Circular Plastics Alliance » afin de créer les conditions pour recycler et trouver des débouchés pour au moins 10 Mt de plastiques d'ici 2025.

Les bioplastiques, plébiscités par les consommateurs et mis en avant par le marketing, constituent l'un des éléments de la solution. Ils présentent un réel intérêt, à condition d'être correctement utilisés et rentables écologiquement parlant. Les polymères biodégradables ne le sont effectivement que dans certaines conditions physico-chimiques. En amont de la chaîne de valeur, les polymères biosourcés représentent moins de 1 % de la consommation des plastiques et leur production repose souvent sur une agriculture intensive, en contradiction avec les principes de l'écologie. Les marchés visés sont en priorité la fabrication d'objets durables comme les emballages réutilisables. Une demande croissante ainsi que le développement de solutions plus sophistiquées devraient entraîner l'augmentation des capacités de production, avec un objectif affiché de 2,6 Mt par an en 2023.

La chimie reste un élément clé pour réduire le nombre d'impacts négatifs. Nécessaire pour la synthèse et la modification des polymères biosourcés capables de répondre aux

cahiers des charges, ainsi que pour le développement de molécules biosourcées en remplacement des molécules pétrosourcées, elle fournit de nombreuses solutions innovantes qui permettent la mise en œuvre de réactifs moins dangereux et le développement de matériaux toujours plus performants. Il en est de même des procédés de polymérisation et de mise en œuvre des polymères. L'extrusion réactive et l'impression 3D en sont deux exemples particulièrement remarquables. Allizé-Plasturgie (aujourd'hui Polyvia) a mis en place une plateforme d'accompagnement dédiée à la fabrication additive.

La chimie est également une des solutions pour développer le recyclage. C'est une nouvelle opportunité de collaboration pour la recherche publique et privée. En complément du recyclage mécanique, des progrès sont accomplis dans la déconstruction en monomères ou en oligomères et la reconstruction des polymères. Des progrès en catalyse de réaction, en structure de chaîne, sont attendus pour explorer des voies à faible énergie, viables économiquement.

La chimie permet de mettre en œuvre de nouveaux procédés de recyclage et de nouveaux polymères qui contribuent ainsi à « refermer le cycle de vie » des matières plastiques. L'économie des polymères n'est donc clairement plus linéaire mais circulaire, et contribue à limiter tant la consommation que le gaspillage des ressources pétrosourcées et de l'eau.

La réduction des impacts environnementaux passe certes par les choix de politiques publiques, mais aussi par la responsabilité individuelle et les initiatives personnelles pour éviter que nos déchets se retrouvent dans l'environnement. Quoique les plastiques soient une source d'inquiétudes légitimes pour la société, de gros efforts sont à mener pour évaluer l'ensemble des impacts sur l'environnement, éduquer et communiquer sur les impacts tant négatifs que positifs. Une vision d'ensemble des problèmes est fondamentale, qui tient compte de l'intégralité des cycles de vie et de la réalité scientifique.

Les sites Internet ont été consultés en octobre 2020.

[1] « Polymères de demain, boosters d'innovations », T. Hamaide, H. Cramail (coord.), *L'Act. Chim.*, **2017**, 422-423.

[2] Plastics - the facts 2019: an analysis of European plastics production, demand and waste data, **2019**, PlasticsEurope, www.plasticseurope.org/application/files/1115/7236/4388/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf

- [3] R. Samso, L'industrie plastique en France: faits et chiffres, **2019**, Statista, <https://fr.statista.com/themes/3177/l-industrie-plastique-en-france>
- [4] Science to enable sustainable plastics: a white paper from the 8th Chemical Sciences and Society Summit (CS3), Royal Society of Chemistry, **2020**, [rsc.li/progressive-plastics-report](https://www.rsc.li/progressive-plastics-report)
- [5] *Impact environnemental des matières plastiques: solutions et perspectives*, T. Hamaide, R. Deterre, J.F. Feller (eds), Lavoisier, **2014**.
- [6] The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics & catalysing action, Fondation Ellen MacArthur, **2017**, www.ellenmacarthurfoundation.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics-catalysing-action
- [7] The circular economy for plastics: a European overview, PlasticsEurope, **2019**, www.plasticseurope.org/en/resources/publications/1899-circular-economy-plastics-european-overview
- [8] Recyclage et valorisation énergétique, PlasticsEurope, www.plasticseurope.org/fr/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery
- [9] J.J. Bozell, G.R. Peterson, Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates: the US Department of Energy's "Top 10" revisited, *Green Chem.*, **2010**, *12*, p. 539-554.
- [10] Biodegradable polymers in various environments, **2020**, <https://bioplasticsnews.com/wp-content/uploads/2020/02/Biodegradable-Polymers-in-Variou-Environments.pdf>
- [11] F.R. Wurm, S. Spierling, H.-J. Endres, L. Barner, Plastics and the environment: current status and challenges in Germany and Australia, *Macromol. Rapid Commun.*, **2020**, *41*, 2000351.
- [12] <https://purecyclotech.com>
- [13] www.polystyvert.com/fr/technologie; <https://polystyreneoop.com>
- [14] Plastiques: un grand pas vers l'économie circulaire, *Plastics le mag*, **2019**, <http://plasticlemag.com/Recyclage-chimique--le-chainon-manquant>
- [15] Recyclage des plastiques: nos solutions, IFPEN, www.ifpen.fr/innovation-et-industrie/nos-expertises/climat-et-environnement/recyclage-des-plastiques/nos-solutions
- [16] V. Tournier *et al.*, An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles, *Nature*, **2020**, *580*, p. 216-219.
- [17] F. de Vaugelas, Recyclage enzymatique: Carbios lance une augmentation de capital de 20 M€, *Formule Verte*, **2020**, www.formule-verte.com/recyclage-enzymatique-carbios-lance-une-augmentation-de-capital-de-20-me
- [18] www.arkema.com/fr/produits/product-finder/detail-de-gamme/Resines-Elium
- [19] S. Latiéule, Ineos choisit la France pour sa première unité de recyclage de polystyrène, *Info Chimie*, **2020**, www.info-chimie.fr/ineos-choisit-la-france-pour-sa-premiere-unite-de-recyclage-de-polystyrene, 109199
- [20] S. Ma, D.C. Webster, Degradable thermosets based on labile bonds or linkages: a review, *Prog. Polym. Sci.*, **2018**, *76*, p. 65-110.
- [21] S. Magana, A. Zerroukhi, C. Jegat, N. Mignard, Thermally reversible crosslinked polyethylene using Diels-Alder reaction in molten state, *React. Funct. Polym.*, **2010**, *70*, p. 442-448.
- [22] X. Li *et al.*, Tuning the thermoreversible temperature domain of PTMC-based networks with thermosensitive links concentration, *Soft Matter*, **2020**, *16*, p. 2815-2828.
- [23] J.A. Johnson *et al.*, Cleavable comonomers enable degradable, recyclable thermoset plastics, *Nature*, **2020**, *583*, p. 542-547.
- [24] Pyrolyse et gazéification, ADEME, www.ademe.fr/expertises/dechets/passer-a-l'action/valorisation-energetique/dossier/pyrolyse-gazeification/principes-pyrolyse-gazeification, **2019**; Le point sur les technologies gazéifications de déchets hétérogènes, ADEME, **2019**, www.ademe.fr/technologies-gazeifications-dechets-heterogenes
- [25] G. Miquel, Recyclage et valorisation des déchets ménagers, Rapport 415 (1998-1999), Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Sénat, **1999**, www.senat.fr/rap/098-415/098-415_mono.html; Les plastiques, *ibid.*, www.senat.fr/rap/098-415/098-41524.html; M. de Cidrac, Projet de loi relatif à la lutte contre le gaspillage et à l'économie circulaire, Rapport 727 (2018-2019), **2019**, www.senat.fr/rap/18-727-1/118-727-1.html
- [26] La vraie vie des plastiques, PlasticsEurope, www.plasticseurope.org/fr/resources/publications/268-la-vraie-vie-des-plastiques
- [27] Les avantages environnementaux des bioplastiques, NaturePlast, <http://natureplast.eu/le-marche-des-bioplastiques/avantages-des-bioplastiques/avantages-environnementaux-des-bioplastiques>
- [28] L. Shen, J. Haufe, M.K. Patel, Product overview and market projection of emerging bio-based plastics - PRO-BIP 2009, **2009**, www.plastice.org/fileadmin/files/PROBIP2009_Final_June_2009.pdf
- [29] www.european-bioplastics.org/market; www.bio-based.eu/markets; www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials
- [30] www.allize-plasturgie.org/fr/economie-circulaire/bioplastiques-production-mondiale
- [31] Selon la Commission européenne, l'analyse ou matrice SWOT (« Strengths Weaknesses Opportunities Threats ») est « un outil d'analyse stratégique [qui] combine l'étude des forces et des faiblesses d'une organisation, d'un territoire, d'un secteur, etc. avec celle des atouts et des menaces de son environnement, afin d'aider à la définition d'une stratégie de développement. »
- [32] Les avantages en termes de marketing et de communication, NaturePlast, <http://natureplast.eu/le-marche-des-bioplastiques/avantages-des-bioplastiques/les-avantages-marketing-et-communication-des-matieres-bioplastiques>
- [33] http://antigreenwashing.ademe.fr/sites/default/files/docs/ADEME_GREENWASHING_GUIDE.pdf
- [34] Biobased plastics in a circular economy: policy suggestions for biobased and biobased biodegradable plastics, CE Delft, **2017**, www.cedelft.eu/publicatie/biobased_plastics_in_a_circular_economy/2022
- [35] Le fait de diminuer un impact environnemental et d'en augmenter un ou plusieurs autres en conséquence s'appelle le transfert d'impact environnemental. Il est facile d'imaginer qu'il n'est pas simple de trancher pour déterminer laquelle des deux solutions est la « moins impactante » pour l'environnement.
- [36] Économie circulaire des bioplastiques: valorisation des produits biosourcés et biodégradables, www.bioplastiques.org/leconomie-circulaire
- [37] L. Shen, E. Worrell, M.K. Patel, Environmental impact assessment of man-made cellulose fibres, *Resour. Conserv. Recycl.*, **2010**, *55*, p. 260-274.
- [38] D. Klemm, B. Heublein, H.-P. Fink, A. Bohn, Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2005**, *44*, p. 3358-3393.
- [39] E. Kontturi *et al.*, Advanced materials through assembly of nanocelluloses, *Adv. Mater.*, **2018**, *30*, 1703779.
- [40] C. Chaoji *et al.*, Structure-property-function relationships of natural and engineered wood, *Nat. Rev. Mater.*, **2020**, *5*, p. 642-666.
- [41] F. Fenouillot, A. Rousseau, G. Colomines, R. Saint-Loup, J.-P. Pascault, Polymers from renewable 1,4:3,6-dianhydrohexitols (isosorbide, isomannide and isoidide): a review, *Progr. Pol. Sci.*, **2010**, *35*, p. 578-622.
- [42] J.-M. Pin, N. Guigo, L. Vincent, N. Sbirrazzuoli, A. Mija, Copolymerization as a strategy to combine epoxidized linseed oil and furfuryl alcohol: the design of a fully bio-based thermoset, *ChemSusChem*, **2015**, *8*, p. 4149-4161.
- [43] www.braskem.com/usa/news-detail/braskem-america-lanches-im-green-recycled-polypropylene
- [44] L. Marchand, Lego lance ses premiers blocs écolos en canne à sucre, *Les Échos*, **2018**, www.lesechos.fr/12/08/2018/lesechos.fr/0302096858324_lego-lance-ses-premiers-blocs-ecolos-en-canne-a-sucres.htm
- [45] C. Robert, Polymères bio-sourcés ou issus de ressources fossiles, MIAO, <https://miao.ensad.fr/2018/08/21/polymeres-bio-sources-quels-defis>
- [46] www.virent.com/technology/sustainability

Thierry HAMAIDE¹,

Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon 1, président de la Commission Enseignement du Groupe Français d'études et d'applications des Polymères (GFP) et membre de la division Enseignement-Formation de la Société Chimique de France.

Guillaume SUDRE¹,

Maitre de conférences, Université Claude Bernard Lyon 1, IMP.

Jean-Marc PUJOL²,

Directeur adjoint VP Affaires externes R & D, Solvay Recherche et Innovation, Saint-Fons.

¹ Université Claude Bernard Lyon 1, Laboratoire Ingénierie des Matériaux Polymères (IMP), Villeurbanne.

thierry.hamaide@univ-lyon1.fr; guillaume.sudre@univ-lyon1.fr

² jean-marc.pujol@solvay.com