Quel devenir pour les déchets plastiques ?

Résumé Les matières plastiques connaissent depuis les années 1950 une progression remarquable en termes de production et d'utilisations. Si elles possèdent des propriétés très intéressantes et recherchées, il y a cependant un vrai questionnement sur le traitement de leurs déchets. Ceci a conduit à un changement dans leur utilisation et la gestion de leur fin de vie. Les industriels de la chaine de valeur du recyclage des plastiques investissent pour intensifier la valorisation. La France, qui n'était pas dans le peloton de tête du recyclage des déchets plastiques, rattrape son retard d'autant que le gouvernement a fixé un objectif ambitieux de 100 % de valorisation pour 2025. Divers procédés sont mis en œuvre par des sociétés spécialisées dans le recyclage et la régénération. Les défis posés sont d'ordres technique, économique et réglementaire.

Mots-clés **Matières plastiques, production, applications, additifs, recyclage, valorisation.**

Abstract **What future for plastic wastes?**
Since the 50s there has been an impressive increase of the production and applications of plastic materials. If their properties are very interesting and sought, the treatment of their wastes raised an important question. This led to a change in their use and management of end of life. Industrial value chain of plastics recycling invests to enhance the valorization. France was not in the leading group for recycling the plastic wastes but is now catching up as the Government fixed an ambitious target to achieve 100% valorization by 2025. Several processes are developed in specialized companies. Answering a lot of technical, economical, regulatory challenges is needed.

Keywords **Plastics, production, uses, additives, recycling, valorization.**

État des lieux : chiffres clés, techniques, secteurs et objectifs

En 2015, 8 300 millions de tonnes (Mt) de matières plastiques ont été mondialement produites depuis 1950, ce qui représente 7 800 Mt de résines, auxquelles il faut adjoindre 500 Mt d'additifs. Sur ces 8 300 millions de tonnes, on estime que 30 % sont encore utilisés (2 500 Mt) et que 5 800 Mt issues de plastiques vierges sont maintenant devenues des déchets [1-2] (dont 700 Mt de fibres polyamides et polyacryliques [3]). Les techniques de valorisation (recyclage et incinération) n'ayant été mises en œuvre que récemment, seuls 9 % ont été recyclés – ce qui représente environ 500 Mt de déchets plastiques déjà recyclées – et 13 % incinérés, alors que 78 % ont été enfouis, soit environ 4 900 Mt représentant 60 % de la production globale mondiale ! Un objectif de 100 % de valorisation des déchets plastiques (incluant recyclage et traitement thermique) exige donc un changement profond des mentalités.

On observe toujours une progression de la demande et de la production, celle-ci ayant atteint mondialement 407 Mt en 2015 (382 Mt de résines et 25 Mt d'additifs) [1], dont près de 300 Mt pour les thermoplastiques, principalement concernés par le recyclage [4]. À titre indicatif, la production mondiale de résines n'était que de 46 Mt en 1975 [2-3], ce qui montre leur progression importante.

Les matériaux polymères ont désormais des applications multiples, non seulement dans les thermoplastiques (pour l'emballage, les transports, le bâtiment et les équipements divers), mais aussi pour les fibres synthétiques, les mousses, les revêtements, les adhésifs… Les propriétés, notamment mécaniques, des polymères étant sans cesse améliorées, ils sont aujourd'hui utilisés pour remplacer des pièces métalliques dans l'automobile ou l'aéronautique, permettant ainsi des gains de poids et donc des économies d'énergie et d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Ces matériaux ont aussi conquis d'autres secteurs aux exigences très strictes comme celui des applications médicales (prothèses).

© Can Stock Photo/XXL Photo.

Le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) sont les plastiques les plus utilisés dans le monde (57 %) [2, 5-6] ; ces polymères ne sont pas biodégradables compte tenu de leur nature chimique, tout comme beaucoup d'autres plastiques classiques (PET, PS, PVC*...). En revanche, les matériaux plastiques se dégradent sous l'effet des rayons lumineux et de l'oxydation à l'air, provoquant une fragmentation en particules microscopiques qui impactent, s'ils sont laissés à l'abandon, l'environnement terrestre mais aussi aquatique. On parle alors de macro-, puis de microplastiques. Outre l'absorption de macroplastiques par des animaux marins tels que les tortues, avec la mortalité souvent décrite qui en résulte, les microplastiques (tailles inférieures à 5 mm) peuvent perturber le système circulatoire des mollusques [7-9]. Ces microparticules peuvent également devenir les vecteurs d'autres pollutions [10]. En effet, les polluants peuvent s'adsorber sur les microparticules ; ceux-ci vont ensuite être relargués dans l'organisme lors de l'ingestion par une espèce, quelle qu'elle

soit : vers de terre, poissons, crustacés, voire mammifères marins. Cette pollution va ensuite s'accumuler dans la chaine trophique.

Ainsi, le polyéthylène totalise 36 % de la production mondiale, suivi du polypropylène (21 %) et du polychlorure de vinyle (PVC) (12 %), tandis que le polyéthylène téréphtalate (PET), les résines polyuréthanes (PUR) et le polystyrène (PS) représentent moins de 10 % chacun [1-2, 5-6]. Les autres polyesters, les polyamides et les acryliques complètent le panorama. Il faut aussi noter que les matières plastiques contiennent en moyenne 7 % d'additifs divers, dont la présence peut compliquer le recyclage.

La répartition de la production de résines polymères (hors fibres qui concernent exclusivement les textiles) dans les principales régions industrielles du monde est la suivante [2, 5-6] :

- 45 % pour l'emballage (principalement PE, PET, PP et PS) ;
- 19 % pour le bâtiment (PVC, PE, PUR, PS…) ;
- 7 % pour le transport (PP, PUR, divers) ;
- 4 % pour les équipements électriques (ABS*, HIPS* et PP…) ;
- 25 % dans des secteurs divers (équipements sportifs, matériels de bricolage, de jardin, ameublement…).

En France, la demande en thermoplastiques est de 4,9 Mt/an, soit 10 % de la demande européenne. Le secteur de l'emballage est aussi le plus important (45 %), principalement concerné par les PE, PP, PET, suivi par le bâtiment (18 %) et l'automobile (9 %) [4], la progression actuelle de ces deux derniers secteurs accompagnant la reprise économique. Dans le bâtiment, le polymère le plus utilisé est le PVC, alors que dans l'automobile, c'est le polypropylène qui domine. Enfin, dans le domaine des équipements électriques et électroniques, plusieurs résines sont importantes comme l'ABS, le HIPS (aussi appelé PS choc) et le PP.

La durée de vie des produits est l'un des facteurs importants concernant le recyclage. Dans l'emballage, la durée de vie moyenne est de l'ordre de quelques mois, alors qu'elle est d'environ trente ans pour le bâtiment, de dix-sept ans dans l'automobile, et qu'elle peut varier de un à quinze ans dans les équipements électriques et électroniques [6, 11-14]. Cela se traduit clairement dans la répartition des déchets plastiques où 60 % sont issus de l'emballage et 8 % sont des déchets électriques et électroniques. Viennent ensuite les secteurs de l'automobile, les plastiques agricoles et les plastiques du BTP (chacun 5 %). Il faut aussi ajouter 18 % qui représentent tous les autres secteurs (jouets, articles de sport, mobilier…).

Ainsi, si 407 Mt de plastiques ont été mondialement produites en 2015, il est estimé qu'en contrepartie 302 Mt de déchets ont été générées, laissant donc 105 Mt supplémentaires en cours d'utilisation [15]. Il faut noter que les fibres synthétiques en fin de vie, qui ont représenté 700 Mt depuis 1950, ne sont pas recyclées mais incinérées et mises en décharge.

En Europe, pour un tonnage de déchets plastiques de 26 Mt/an (chiffre 2014), le taux de valorisation est de 69 %, à savoir 29,5 % de recyclage et 39,5 % de valorisation énergétique. La France, avec 3,3 Mt de déchets plastiques, en est à 63,5 % de valorisation (22 % de recyclage et 41,5 % d'incinération). Le gouvernement français a annoncé un objectif de « 100 % des plastiques recyclés à l'horizon 2025 ». Cet objectif est extrêmement ambitieux et peu réaliste. Avec 36,5 % de déchets plastiques encore mis en décharge, la progression attendue reste importante, comparativement à l'Allemagne, les Pays-Bas mais aussi la Suisse qui sont proches de 100 % de valorisation, ayant interdit la mise en décharge de ces matériaux. Un objectif qui semble plus réaliste serait « 100 % des plastiques valorisés à l'horizon 2025 », ce qui sous-entend un mix entre le recyclage et la valorisation énergétique par traitement thermique au détriment de l'enfouissement, ainsi qu'une amélioration des filières de collecte.

Afin d'aider au recyclage, le Syndicat national des Régénérateurs de matières Plastiques (SRP) peut maintenant décerner des certificats d'économie carbone aux transformateurs utilisant des plastiques recyclés pour valoriser l'engagement dans une économie plus circulaire et plus économe en ressources.

Lexique

Les polymères cités dans l'article et les termes suivis d'un astérisque sont définis ci-dessous.*

ABS : copolymère acrylique/butadiène/styrène.
BHA : hydroxyanisole butyle.
DBP : phtalate de dibutyle.
DEHP : phtalate de bis(2-éthylhexyle).
DINCH : cyclohexanoate de diisononyle.
DINP : phtalate de diisononyle.
HIPS : polystyrène choc.
MAM : méthacrylate de méthyle.
ORPLAST : Objectif Recyclage PLASTiques (ADEME).
PE : polyéthylène, haute densité (HD), basse densité (BD) et linéaire basse densité (BDL).
PET : polyéthylène téréphtalate.
PMMA : polyméthacrylate de méthyle.
PP : polypropylène.
PS : polystyrène.
PUR : résines polyuréthanes.
PVC : polychlorure de vinyle.
REACH : Registration, Evaluation, Authorisation and restriction of CHemicals (enRegistrement, Evaluation et Autorisation des produits CHimiques).
TGAP : Taxe Générale sur les Activités Polluantes.

La valorisation des déchets plastiques

La valorisation des déchets plastiques peut passer par différentes techniques comme le recyclage mécanique, le recyclage chimique ou la valorisation énergétique [16].

Lorsque le recyclage se fait pour une application identique à l'application initiale, on parle alors de recyclage en boucle fermée. C'est par exemple le cas des bouteilles plastiques en PET ou des pare-chocs de voitures [16]. Mais souvent ce recyclage en boucle fermée n'est pas possible et les plastiques recyclés vont alors trouver des applications dans d'autres domaines. Ainsi, les bouteilles de détergents en PEHD* vont devenir des tuyaux pour le bâtiment. Le recyclage est alors dit en boucle ouverte. Souvent, ces plastiques recyclés sont utilisés dans des applications de valeur ajoutée plus faible qu'à l'origine. En effet, les polymères initiaux auront été souillés et vieillis durant leur première vie et même si les étapes de recyclage vont permettre de séparer les différents plastiques et de les nettoyer, il peut rester certains contaminants qui limitent les propriétés du plastique, donc sa valeur d'usage initiale [16-17], à moins de mettre en œuvre des technologies plus coûteuses telles que le recyclage chimique.

Actuellement, quelques débouchés originaux sont proposés, comme l'utilisation en Inde de déchets plastiques dans l'asphalte pour la construction de routes [18]. Mais cette

© Can Stock Photo/lightkeeper.

application a une durée de vie limitée et peut générer des nuisances.

Les plastiques sont des matériaux organiques – donc composés majoritairement de carbone, d'hydrogène et d'oxygène – dont le pouvoir calorifique est important. Le traitement thermique n'a de sens que si on récupère l'énergie au lieu de réaliser ce traitement en brûlant un autre combustible [19-20]. En termes d'impact environnemental, ce combustible de substitution aura déjà eu une première vie et aura donc déjà été utile. Cependant, il est important de noter que sa dégradation thermique doit se faire dans des conditions strictes. En effet, la combustion non contrôlée des déchets peut dégager des produits toxiques (halogènes, dioxines, gaz acides [17, 21]) et il convient d'opérer dans des équipements adaptés tels que, par exemple, des fours de cimenteries équipés de technologies spécifiques de traitement des fumées ou des incinérateurs de dernière génération.

Dans certains cas, le polymère peut régénérer son précurseur monomère par un processus thermique de dépolymérisation. C'est par exemple le cas du polystyrène et du polyméthacrylate de méthyle (PMMA). Ce dernier est un polymère industriel de spécialité (donc à haute valeur ajoutée) dont la production mondiale est de 1,4 Mt/an (320 kt/an en Europe). Ses marchés applicatifs concernent le bâtiment (30 %), les enseignes lumineuses (22 %), l'automobile (20 %), l'électronique, l'aéronautique et divers autres secteurs (28 %). Ainsi, les feux arrière des voitures sont en PMMA. Un champ d'application s'ouvre pour le monomère MAM* recyclé, mais la difficulté du procédé de récupération est liée à la présence de contaminants (pigments, colorants, fibres composites…).

Quelle que soit la voie de valorisation choisie, des exigences réglementaires et techniques sont nécessaires pour s'assurer de la conformité et de l'innocuité des matériaux, tant pour la santé humaine (par exemple les jouets pour les enfants ou l'agrément alimentaire non respecté pour certains emballages) que pour l'environnement [22-23].

Il y a en France quelque soixante-dix sociétés traitant du recyclage des plastiques. De capacités diverses (de mille à cent mille tonnes par an), elles sont situées un peu partout dans le pays. D'une façon générale, les principaux polymères recyclés sont le PE, le PP, le PS, le PVC… Les techniques utilisées passent par des étapes de collecte, tri, lavage et broyage, suivies de formulation et granulation en extrudeuse. Le groupe Paprec est – avec Veolia – le leader du recyclage ; nous décrivons à titre d'exemple dans l'*encadré* p. 36 les technologies de valorisation que cette entreprise met en œuvre dans le domaine des emballages.

Les freins au recyclage : prix du pétrole, fin des exportations, additifs et emballages complexes

Les prix des principaux plastiques vierges sont très dépendants du cours du pétrole. D'une façon générale, les prix des plastiques recyclés sont déterminés par la concurrence des résines vierges et doivent présenter une décote pour être économiquement acceptables par les donneurs d'ordres et les fabricants de produits plastiques ; ils sont donc indirectement dépendants des prix pétroliers.

Le recyclage est une activité qui coûte cher et les coûts de collecte, de préparation de tri et de main d'œuvre sont souvent supérieurs aux revenus générés par les ventes. L'aspect de l'agrément au contact alimentaire est aussi à prendre en compte pour le recyclage dans l'emballage.

Une partie des déchets plastiques mondiaux était, jusqu'à il y a peu, exportée hors de l'Union européenne vers l'Asie et notamment la Chine (près de 8 Mt en 2013). Les coûts plus bas de main d'œuvre expliquent en partie cela, malgré un long transport maritime. Cependant, depuis le début 2018, la Chine a décidé de stopper ces importations, ce qui rebat les cartes. Aujourd'hui, certains pays et recycleurs européens qui étaient très dépendants de l'export doivent entièrement revoir leur stratégie et des investissements vont être nécessaires pour recycler ou valoriser les déchets plastiques qui ne peuvent plus être exportés.

Les matières plastiques contiennent en moyenne 7 % d'additifs divers, qui font partie d'un large panel d'additifs [24-25] :

- des additifs dits « fonctionnels », par exemple des stabilisants, notamment anti-UV tels que les HALS (« hindered amines light stabilizers », piégeurs de radicaux) [26], des plastifiants (spécialement dans le PVC) [27], des retardateurs de flamme (auparavant surtout halogénés ou organophosphorés mais dont la dangerosité nécessite d'envisager la substitution), des antioxydants (le BHA, hydroxyanisole butyle, aussi largement utilisé comme conservateur alimentaire, et la famille des Irganox®, par exemple dans les cas du PP et du PEBD) [28], des agents antistatiques, des biocides… ;
- des colorants ou des pigments ;
- des charges (talc, carbonates de calcium…) ;
- des renforts, par exemple dans les matériaux composites (fibres de verre et/ou de carbone).

Ces additifs peuvent donner lieu à des phénomènes de migration [26, 29], notamment par diffusion vers la surface du polymère, qui conduisent parfois à leur interdiction. C'est ainsi le cas de phtalates largement utilisés comme plastifiants du PVC. Certains, tels que le DBP* et le DEHP*, sont fortement mis en question et des directives européennes ont réglementé leur usage (directives 2005/84/EC et 2007/19/EC). Les producteurs de PVC les substituent par le DINP*, qui est un phtalate assez proche, et plus favorablement par le DINCH*, dont la structure cycloaliphatique ne pose pas de problème [30]. Des adipates sont également utilisés.

D'une façon générale, la toxicité éventuelle des additifs peut être problématique dans les opérations de recyclage.

Paprec, un leader du recyclage

Le meilleur déchet est celui qu'on ne produit pas, mais viser zéro déchet semble bien utopique. C'est ainsi que de grandes entreprises du recyclage comme Paprec ont investi des millions d'euros pour remettre sur le marché des matériaux recyclés en leur donnant une seconde chance.

Dans le domaine de l'emballage, Paprec sera en mesure de valoriser 700 kt de déchets par an (*figure 1*). Si l'on considère la production moyenne annuelle par habitant en France de déchets recyclables collectés, estimée à 47 kg par l'ADEME dans son dernier rapport en 2017, cela représente le traitement des déchets de quinze millions d'habitants. Malgré cela, du fait d'erreurs de tri ou d'emballages non recyclables, 25 % de ce qui est collecté et trié terminent encore dans un incinérateur ou dans un centre d'enfouissement. Dans les 75 % effectivement valorisés, on trouve tout ce que la société consomme : bouteilles, flacons, pots et barquettes, fibreux (PET, PEHD*, PEBD*, PP, PS, aluminium, fer, carton, papier).

Les techniques de tri sont de plus en plus complexes, automatisées et coûtent cher. Parmi les technologies développées, on peut citer le tri optique, mais aussi les séparateurs balistiques (*figure 2a*) qui permettent de séparer par gravité les bouteilles plastiques et les papiers/cartons, et « l'overband » (*figure 2b*), une machine équipée d'un aimant pour capter les métaux ferreux. « Le courant de Foucault » (*figure 2c*) est utilisé dans des machines générant un courant de répulsion pour valoriser l'aluminium. Toutes ces techniques (compter plus de 20 à 25 M€ d'investissements pour un centre de tri de 60 kt/an) permettent d'extraire les produits majoritaires simples, les monomatériaux. Certains représentent des volumes importants largement traités (bouteilles en PET pour l'eau, bouteilles en PEHD), mais d'autres monomatériaux dont les volumes prévisionnels sont en phase de croissance ne trouvent pas encore d'exutoire stable. C'est par exemple ce qui s'est passé avec le PET opaque en 2016-2017. Ce nouveau plastique, à base de PET opacifié à l'aide de dioxyde de titane notamment, a fortement progressé dans le marché de l'emballage. À moins de 10 % dans le PET coloré, il n'y avait pas d'impact majeur pour le recyclage, mais au-delà, il devenait impossible de repréparer des fibres polyesters à partir de ce flux de plastiques recyclés. Pour pouvoir conserver leurs débouchés, les régénérateurs de PET coloré ont éliminé ce PET opaque par une étape de tri supplémentaire, ce qui a déstabilisé un peu plus l'équilibre économique déjà fragile de la filière.

Un cas similaire s'est produit avec le développement des films biodégradables qui a déstabilisé la filière du recyclage des films PEBD.

Des partenariats avec des industriels du secteur de l'emballage devront permettre de trouver des solutions économiquement viables pour les matériaux composant ces flux de plastiques en mélange. Les éco-organisations poussent notamment à développer le tri pour que de nouvelles filières se mettent en place.

L'industrie doit s'organiser pour créer des boucles vertueuses et cadrant avec le principe de circularité. C'est ainsi que, par exemple, le recyclage des dalles de sol en PVC complexe a été rendu possible avec la création d'une solution technique de déstructuration et valorisation au travers d'une joint-venture Paprec/Gerflor début 2017.

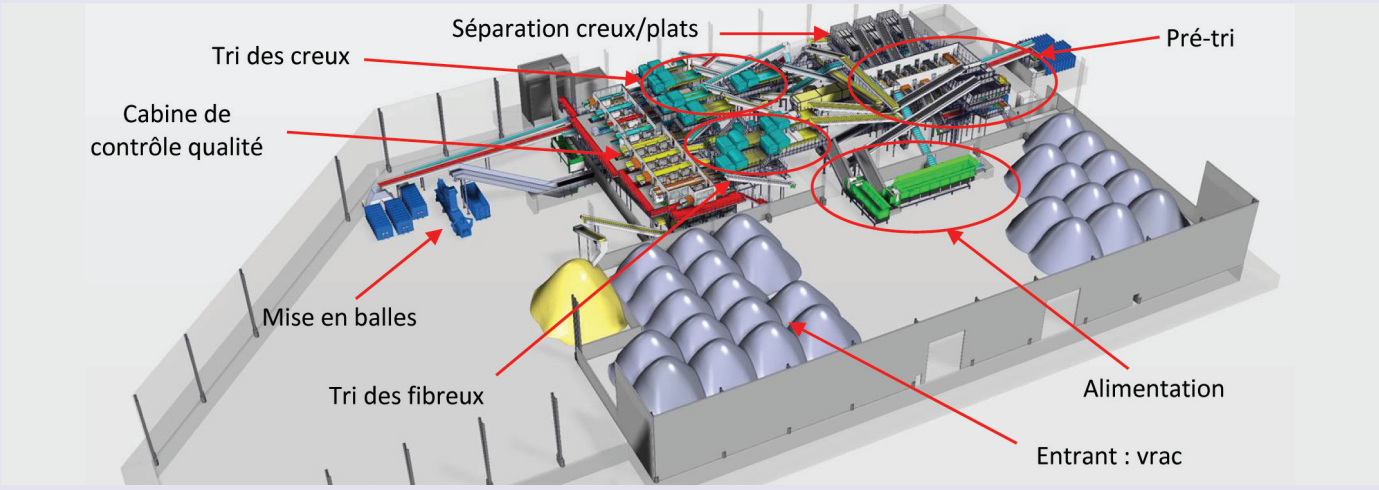

Figure 1 - Centre de tri de collecte sélective de grande capacité.

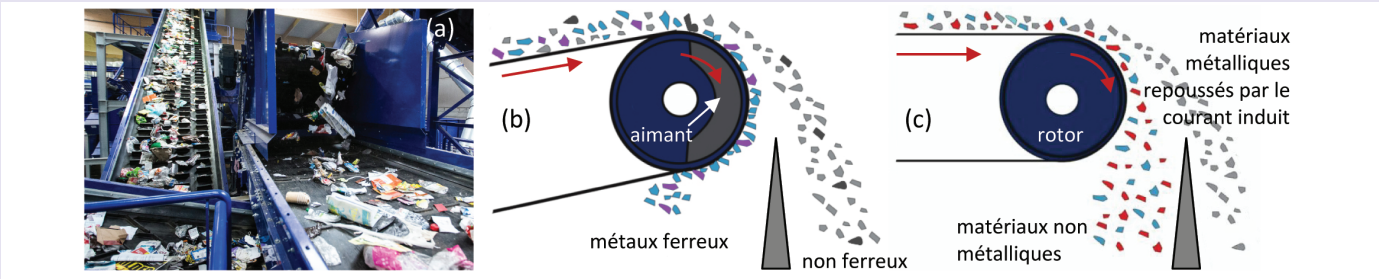

Figure 2 - Différentes technologies développées pour le tri : séparateur balistique (a) pour séparer corps « creux » et corps « plats » par un système de mise en mouvement des matériaux ; séparateur magnétique overband (b) ; séparateur à courant de Foucault (c) ((a) : © Paprec ; (b) et (c) d'après CeAl, ceal-aluquebec.com).

Il faut noter que les polymères biodégradables ne sont pas exempts de risques, comme par exemple l'acide polylactique (PLA), polyester biosourcé maintenant largement utilisé en impression 3D, qui renferme des additifs (pigments, traces de catalyseurs…) susceptibles d'être relargués pendant le process ou le recyclage.
Afin de répondre aux exigences de l'économie circulaire et à l'optimisation des analyses de cycles de vie, il est nécessaire d'aller vers l'utilisation d'additifs répondant aux critères de la chimie durable. Il faut notamment être particulièrement vigilants quant à l'utilisation de matières plastiques non produites en Europe et ne répondant pas nécessairement aux critères fixés par REACH*.
Dans les centres de tri, on trouve toujours des emballages non valorisables (barquettes multicouches, films non PE, barquettes ou pots PVC…) et, pire encore, on voit apparaitre de nouveaux emballages issus de certains applicateurs de plus en plus imaginatifs pour faire doper leurs ventes… au détriment d'une recyclabilité ; ce sont des produits « complexes ». C'est ainsi que l'on trouve par exemple des aérosols en aluminium entièrement recouverts de peintures en PET, des cannettes en PET avec un fond en aluminium, des bouteilles de PET avec une étiquettes en PVC recouvrant entièrement la bouteille, des boites d'emballages en carton avec des inserts en plastique (voir *figure*)… Non seulement ces emballages ne sont donc pas recyclables, mais ils perturbent le processus de tri (et de régénération) et doivent absolument être enlevés à la main en phase finale de contrôle qualité avant la mise en balles.
Si aujourd'hui nos centres de tri sont en mesure de valoriser les plus grands types d'emballages, tous les « exotiques » termineront en incinération ou en enfouissement. Il est primordial de travailler plusieurs fronts en parallèle en développant l'innovation technologique qui permet de trier et recycler, mais aussi l'écoconception et la simplification des emballages.
Dans le secteur des déchets industriels, les plastiques techniques composites apparaissent, permettant d'incorporer des matières premières secondaires (issues d'un premier processus de recyclage). Mais quel est le devenir de ce nouveau matériau composite s'il n'a pas été pensé pour être revalorisé ?

Penser au recyclage dès la création

Le développement de la filière des plastiques passe aujourd'hui par plusieurs défis. En effet, comme cela a déjà été évoqué dans cet article, les défis sont d'ordres techniques, économiques, réglementaires et organisationnels.
Au niveau technique, beaucoup de travail reste à réaliser pour permettre aux plastiques recyclés d'accéder à des applications à plus haute valeur ajoutée. Par exemple, si le PET issu de bouteilles peut retrouver une application au contact alimentaire, ce n'est pas le cas des bouteilles ou pots et barquettes en PEHD ou en PP. D'autres contraintes techniques comme le relargage d'odeurs ou des problématiques d'aspect (couleurs, surface…) sont aussi à lever. Pour cela, des innovations dans les techniques de tri et de régénération sont attendues. Les recyclages chimiques, thermochimiques, voire biotechnologiques font partie des technologies qui peuvent permettre au recyclage de faire un bond vers le haut, mais à condition que le modèle économique soit à l'équilibre.
Pour sécuriser le modèle économique du recyclage et entrer dans un cercle vertueux, il est nécessaire de trouver de

Exemples de produits complexes non recyclables.

nouveaux modes de financement du recyclage et de le rendre compétitif par rapport aux autres voies (incinération et enfouissement). La feuille de route pour l'économie circulaire prévoit une réforme de la taxe générale sur les activités polluantes (TGAP) – qui s'applique à la fois au recyclage et à l'incinération –, avec une augmentation progressive de celle-ci. Le développement des filières à responsabilité élargie du producteur (REP) a aussi permis de structurer et de financer la collecte et le tri. Malgré ces financements, l'étude sur l'analyse de la chaine de valeur des plastiques a montré que la filière du recyclage des plastiques présente un déficit de profitabilité au niveau des maillons recyclage et régénération des plastiques, de l'ordre de 26 €/t de plastiques recyclés. Ce manque de profitabilité limite les investissements dans l'innovation et dans les équipements permettant de faire monter en valeur les plastiques recyclés. La valorisation des bénéfices environnementaux et sociaux du recyclage pourrait être un moyen de stimuler la filière. Le développement de débouchés pour les plastiques recyclés est aussi une voie importante pour l'économie de la filière et la mise en place du dispositif ORPLAST* (appel d'offre de l'ADEME pour le recyclage des plastiques) depuis 2016 doit permettre d'augmenter les volumes de plastiques recyclés utilisés par les plasturgistes.
Des évolutions sont aussi nécessaires à la fois sur les normes, dont certaines interdisent purement et simplement l'utilisation de matières plastiques recyclées, mais aussi au niveau réglementaire. C'est par exemple le cas de l'évolution de la TGAP au niveau français ou de l'interface entre les réglementations substances (règlement européen REACH), produits (emballages, écoconception…) et déchets. En effet, certaines inadéquations entre ces réglementations peuvent poser des problèmes. De même, certains professionnels réclament des minima de teneurs en recyclés.
Enfin, des travaux basés sur l'écoconception des produits avec une prise en compte essentielle de la fin de vie est un sujet majeur. Beaucoup de produits certes dits « écoconçus » posent encore des problèmes en termes de recyclage. Comme nous l'avons vu précédemment, certains nouveaux matériaux peuvent perturber les filières de recyclage existantes. La prise en compte de la fin de vie lors de l'écoconception (« design for recycling ») est un sujet majeur que l'Europe a clairement mis en avant dans sa stratégie plastique. Cela ne veut pas dire que l'innovation dans les nouveaux matériaux est inutile, bien au contraire, mais simplement qu'il faut dès la création de ce nouveau matériau réfléchir en anticipant son introduction sur le marché, sa fin de vie, ses impacts dans les filières existantes, et en particulier son recyclage ou sa valorisation. À défaut, au lieu de créer de la valeur tant économique qu'écologique, le développement de ce matériau sera freiné par des malus comme ce fut le cas pour le PET opaque ou le PLA dans

l'emballage qui perturbent le tri et le recyclage alors qu'ils peuvent présenter des bénéfices environnementaux intéressants.

Les auteurs remercient vivement Arnaud Parenty, spécialiste du recyclage des plastiques, pour sa disponibilité lors des nombreux échanges qu'ils ont eus et ses suggestions très pertinentes.

[1] Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L, Production, use and fate of all plastics ever made, *Sci. Adv.*, **2017**, *3*, p. 1, e1700782.
[2] *Plastics - the facts 2016: an analysis of European plastics production, demand and waste data*, Plastics Europe, **2016**, www.plasticseurope.org/application/files/4315/1310/4805/plastic-the-fact-2016.pdf
[3] *The Fiber Year 2017: World Survey on Textiles & Nonwovens*, The Fiber Year Consulting, **2017**.
[4] Loubry M., Croissance et valorisation des matières plastiques à l'horizon 2020, *L'Act. Chim.*, **2017**, *422-423*, p. 20.
[5] American Chemistry Council (ACC), *Resin Review: The annual statistical report of the North American plastics industry*, **2013**.
[6] Mutha N.H., Patel M., Premnath V., Plastics material flow analysis for India, *Resour. Conserv. Recycl.*, **2006**, *47*, p. 222.
[7] Depledge M.H. *et al.*, Plastic litter in the sea, *Mar. Environ. Res.*, **2013**, *92*, p. 279.
[8] Brouwer R., Hadzhiyska D., Ioakeimidis C., Ouderdorp H., The social costs of marine litter along European coasts, *Ocean Coast. Manage.*, **2017**, *138*, p. 38.
[9] Browne M.A. *et al.*, Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.), *Environ. Sci. Technol.*, **2008**, *42*, p. 5026.
[10] Ziccardi L.M., Eddington A., Hentz K., Kulacki K.J., Kane Driscoll S., Microplastics as vectors for bioaccumulationof hydrophobic organic chemicals in the marine environment: a state of the science review, *Environ. Toxicol. Chem.*, **2016**, *35*, p. 1667.
[11] Davis J. *et al.*, Time-dependent material flow analysis: scrap generation and recycling, *Resour. Conserv. Recycl.*, **2007**, *51*, p. 118.
[12] Kuczenski B., Geyer R., Material flow analysis of PET in the US, *Resour. Conserv. Recycl.*, **2010**, *54*, p. 1161.
[13] Murakami S., Oguchi M., Tasaki T., Daigo L., Hashimoto S., Lifespan of commodities. Part I: The creation of a database and its review, *J. Ind. Ecol.*, **2010**, *14*, p. 598.
[14] Cooper D.R., Skelton A.C.H., Moynihan M.C., Allwood J.M., Components level strategies for exploiting the lifespan of steel in products, *Resour. Conserv. Recycl.*, **2014**, *84*, p. 24.
[15] Jambeck J.R. *et al.*, Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, **2015**, *347*, p. 768.
[16] Hopewell J., Dvorak R., Kosinor E., Plastic recycling: challenges and opportunities, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.*, **2009**, *364*, p. 2115.
[17] UNEP, Stockholm Convention on persistent organic pollutants, UNEP/POPS/COP.7/INF/27, **2015**.
[18] Subramanian S., Plastic roads: India's radical plan to bury its garbage beneath the streets, *The Guardian*, **2016**, www.theguardian.com/sustainable-business/2016/jun/30/plastic-road-india-tar-plastic-transport-environment-pollution-waste.
[19] Al-Salem S.M., Antelava A., Constantinou A., Manos G., Dutta A., A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW), *J. Environ. Manage.*, **2017**, *197*, p. 177.
[20] Anuar Sharuddin S.D., Abnisa F., Wan Daud W.M.A., Aroua M.K., Energy recovery from pyrolysis of plastic waste, *Energy Convers. Manage.*, **2017**, *148*, p. 925.
[21] Weber R., Kuch B., Relevance of BRSs and thermal conditions on the formation pathways of brominated and bromo-chlorinated dibenzodioxins and dibenzofurans, *Environ. Int.*, **2003**, *29*, p. 699.
[22] Chen S.J. *et al.*, Brominated flame retardants in children' toys, *Environ. Sci. Technol.*, **2009**, *43*, p. 4200.
[23] Shaw S., Halogenated flame retardants: do the fire safety benefits justify the risks?, *Rev. Environ. Health*, **2010**, p. 261.
[24] Hahladakis J.N., Velis C.A., Weber R., Iacovidou E., Purnell P., An overview of chemical additives present in plastics: migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling, *J. Hazard. Mater.*, **2018**, *344*, p. 179.
[25] Hansen E., Nillson N., Lithner D., Lassen C., *Hazardous substances in plastic materials*, COWI in cooperation with Danish Technological Institute, **2013**, www.miljodirektoratet.no/old/klif/publikasjoner/3017/ta3017.pdf
[26] Lau O.W., Wong S.K., Contamination in food from packaging material, *J. Chromatogr.*, **2000**, *A 882*, p. 255.
[27] Cano J., Marin M., Sanchez A., Hernandis V., Determination of adipate plasticizers in PVC by microwave-assisted extraction, *J. Chromatogr.*, **2002**, *A 963*, p. 401.
[28] Beldi G., Pastorelli S., Franchini F., Simoneau C., Time- and temperature-dependent migration study of Irganox 1076 from plastics into foods and food simulants, *Food Addit. Contam.*, **2012**, *A 29*, p. 836.
[29] Ferrara G., Bertoldo M., Scoponi M., Ciardelli F., Diffusion coefficient and activation energy of Irganox 1010 in poly(propylene-co-ethylene) copolymers, *Polym. Degrad. Stab.*, **2001**, *73*, p. 411.
[30] Almeras C., Cancan Y., Gereec V., Millet M., Projet PERSAN Les phtalates, École des Hautes Études en Santé Publique, **2010**, p. 9.

Jacques KERVENNAL*,
ancien directeur R & D dans l'industrie chimique.
Olivier PHILIPPÉ,**
responsable Innovation chez Paprec.

* jacques.kervennal@gmail.com
** olivier.philippe@paprec.com