

## L'ESSENTIEL

- > L'utilisation des plastiques est aujourd'hui massive et engendre une quantité énorme de déchets persistants et nocifs.
- > De nombreux travaux visent à développer des matériaux véritablement recyclables et biodégradables pouvant remplacer les plastiques classiques, en particulier pour les emballages.
- > Ces matériaux innovants ne pourront résoudre qu'une petite partie du problème des plastiques.
- > Les efforts doivent surtout porter en amont sur la réduction de la consommation de plastiques non indispensables.

## L'AUTRICE



**NATHALIE GONTARD**  
directrice de recherche à l'Inrae, à Montpellier, au sein de l'unité Iate (Ingénierie des agropolymères et technologies émergentes)

# Que faire des emballages plastiques?

Les plastiques, dont les emballages représentent une forte proportion, finissent pour la plupart en déchets persistants. Une pollution massive qui prend de plus en plus d'ampleur et que l'on tente de juguler en mettant au point des procédés de recyclage et des matériaux biodégradables.

**F**acile à mettre en forme, bon marché, léger, résistant, aisément disponible, le plastique s'est imposé depuis la seconde moitié du xx<sup>e</sup> siècle dans notre quotidien et dans tous les secteurs d'activité: aéronautique, bâtiment, vêtements, sport, automobile, électronique, etc. Pour produire, transporter, conserver et commercialiser nos aliments, l'agriculture et l'industrie agroalimentaire occupent dans ce tableau une place très importante: elles représentent aujourd'hui environ 40% de la consommation de plastique.



© Shutterstock.com/alairinho



Une plage aux Philippines. Les deux tiers des 9 milliards de tonnes de plastiques produits depuis que ces matériaux existent se retrouvent aujourd'hui sous la forme de déchets présents partout sur la planète.

On produit dans le monde près de 400 millions de tonnes de plastiques vierges chaque année. Nous consommons au moins l'équivalent de notre poids corporel par personne et par an de plastique. Et ce n'est qu'une moyenne mondiale. Le chiffre est parfaitement corrélé au PIB d'un pays, ce qui signifie que, par exemple, les Français figurent parmi les plus gros consommateurs de ces matériaux.

Et la production continue d'augmenter. Les chiffres issus des sources les plus fiables, telles que la Banque mondiale, l'Agence européenne pour l'environnement ou encore l'équipe de Jenna Jambeck, à l'université de Géorgie, aux États-Unis, montrent que la production de plastique a été multipliée par vingt au cours des cinquante dernières années, et qu'elle devrait encore doubler dans les vingt prochaines années.

Depuis les années 1950, l'industrie mondiale a ainsi produit plus de 9 milliards de tonnes de plastiques, dont seulement 0,5 milliard ont été incinérées. Qu'est devenu le reste? Plus généralement, que deviennent les plastiques après usage?

## ENVIRON 60% DES EMBALLAGES S'ACCUMULENT DANS L'ENVIRONNEMENT

En Europe, et selon les données de Plastics Europe, l'association européenne des producteurs de matières plastiques, sur les quelque 20 millions de tonnes de plastiques utilisés annuellement pour l'emballage (alimentaire et non alimentaire), 34% sont incinérés et contribuent à la production d'énergie, mais aussi à l'émission de gaz à effet de serre et à la pollution de l'air, 16% sont enfouis sans aucune mesure permettant d'éviter leur dégradation puis leur dispersion dans les sols, 10% ne sont pas répertoriés et probablement perdus dans la nature, 32% sont recyclés vers des objets qui ne seront pas eux-mêmes recyclés ensuite ou qui seront envoyés vers des pays moins regardants, et seront donc jetés à plus ou moins longue échéance et distance de leur lieu de consommation (voir la figure page 49).

Au mieux, seuls 5% des emballages plastiques sont réellement recyclés en «boucle fermée», c'est-à-dire pour produire un objet similaire en tout point à celui d'origine. Le reste, hormis ce qui est incinéré, constitue un vertigineux réservoir de microplastiques et nanoplastiques en devenir.

En effet, le principal problème du plastique, outre celui des additifs potentiellement nocifs qu'il contient et qui sont susceptibles de migrer par exemple dans nos aliments (voir l'article de Jean-Baptiste Fini dans ce numéro), est qu'il ne s'intègre pas dans l'un des grands cycles biogéochimiques de la nature. Il ne se solubilise pas comme le font les métaux, la pierre ou le verre, pour reminéraliser les eaux

et les sols. Il n'est pas non plus digéré par les microorganismes du sol, contrairement aux matériaux d'origine naturelle (papier, carton, coton, cuir...). Le plastique ne fait que se fragmenter peu à peu, en quelques dizaines ou centaines d'années, en microparticules puis nanoparticules.

## DES MICROPARTICULES QUI SERONT DE PLUS EN PLUS ABONDANTES

Ces microdéchets voyagent facilement, se chargent en polluants, s'invitent dans les océans, l'eau de surface, les sols, l'air respiré, les aliments. Cette lente fragmentation est aujourd'hui déjà bien palpable, alors que seule une toute petite partie des déchets plastiques accumulés a eu le temps de se dégrader. On retrouve ainsi des micro- et nanoplastiques jusque dans les zones les plus reculées de la planète, des fosses océaniques aux glaciers de l'Arctique. On les retrouve aussi tout près de nous, dans les eaux courantes ou les aliments, et jusque dans nos organes.

Par exemple, en 2021, Alessandro Svelato, de l'hôpital San Giovanni Calibita Fatebenefratelli, à Rome, et ses collègues ont décelé une contamination aux microplastiques dans quatre des six placentas humains qu'ils ont étudiés. Kieran Cox et ses collègues, à l'université de Victoria, au Canada, ont estimé en 2019 que nous absorbons près de 50 000 microparticules de plastique par an *via* notre alimentation; selon la méta-étude de Thava Palanisami, de l'université de Newcastle, en Australie, et ses collègues, on en absorbe en moyenne jusqu'à 5 grammes par semaine, l'équivalent d'une carte bancaire!



# Chacun absorberait en moyenne jusqu'à 5 grammes de plastique par semaine

Par ailleurs, de nombreuses études ont montré que, en s'accumulant dans un organisme, les microplastiques engendrent des phénomènes inflammatoires, de stress oxydatif et des déséquilibres métaboliques. L'impact

## QUELQUES CHIFFRES

**Production mondiale de plastiques :**  
368 millions de tonnes en 2019, dont environ 40 % pour les emballages (359 millions de tonnes en 2018, 2 millions de tonnes en 1950)

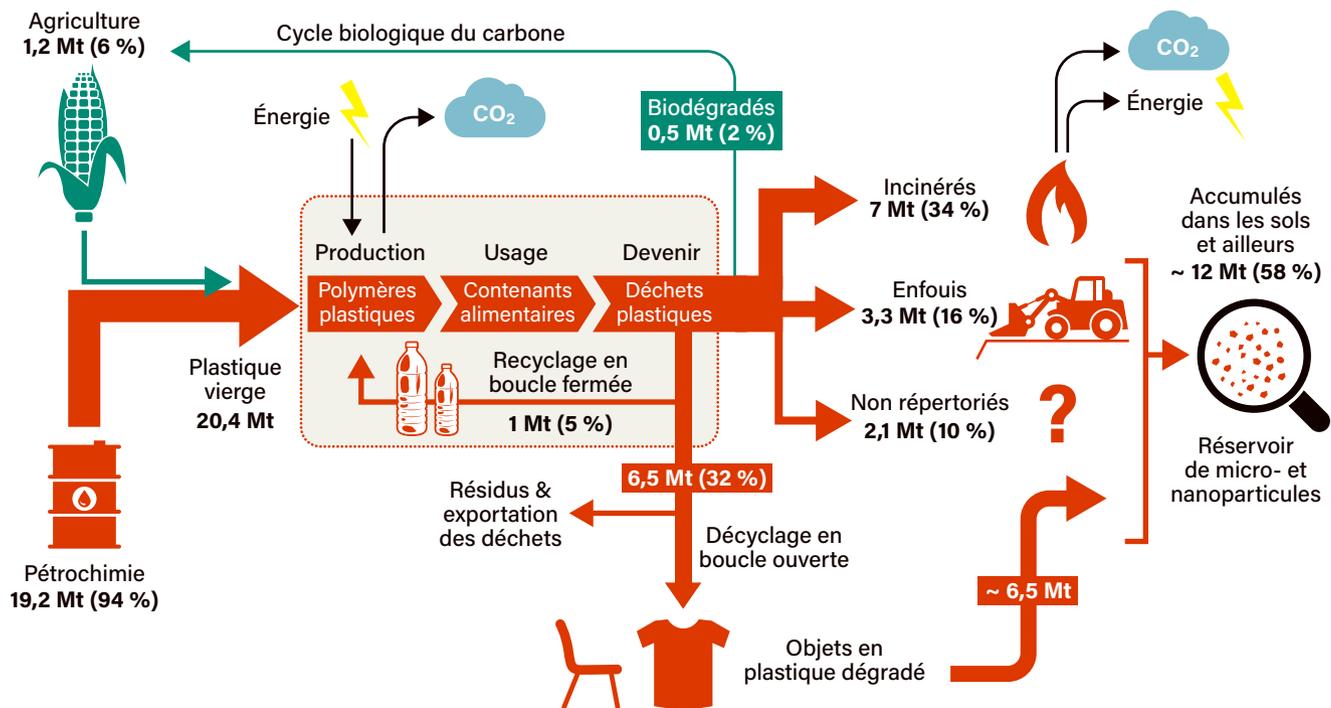
**Production cumulée depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle :**  
9 milliards de tonnes

**Plastiques encore en usage aujourd'hui :**  
2,5 milliards de tonnes

**Cumul des plastiques incinérés (1950-2015) :**  
0,5 milliard de tonnes

**Cumul des déchets plastiques (1950-2015) :**  
6 milliards de tonnes

Sources : Plastics Europe et R. Geyer et al., *Science Advances*, vol. 3, e1700782, 2017



Ce schéma résume d'où proviennent les plastiques des emballages en Europe et ce qu'ils deviennent après usage. Tous les pourcentages sont calculés par rapport à la consommation européenne totale d'emballages plastiques, qui était en 2019 de 20,4 mégatonnes (chiffres de Plastics Europe). Tout le plastique qui n'a pas été incinéré ou recyclé en boucle fermée, soit environ 58% des 20,4 mégatonnes, constitue un réservoir de futures micro- et nanoparticules.

sur la santé est encore mal connu, mais on peut craindre que les microplastiques, qui seront beaucoup plus abondants dans quelques décennies, constituent une bombe à retardement.

La pollution par les déchets en plastique est ainsi un problème grave, auquel le monde de la recherche s'efforce aujourd'hui de trouver des solutions. Notamment, les scientifiques tentent de répondre aux appels à projets liés à la stratégie politique de l'Union européenne, qui vise 100% de plastiques recyclables à l'horizon 2030.

En théorie, le recyclage s'inscrit dans une économie dite «circulaire», qui consiste à régénérer à l'infini et à l'identique un matériau après usage afin de prévenir l'accumulation de ses déchets et l'épuisement des ressources. C'est le cas du verre et des métaux, recyclés à plus de 70% et 50% respectivement en France, ainsi que des matières d'origine naturelle, comme les papiers et les cartons qui, en plus d'être «recyclés» à un taux de 66% selon le site Conso Globe, sont capables d'être régénérés à l'infini *via* le cycle naturel du carbone par biodégradation.

## DU « DÉCYCLAGE » ET NON UN RÉEL RECYCLAGE

Or le recyclage actuel du plastique ne répond pas à cette définition. Le meilleur des recyclages du plastique est le recyclage dit «mécanique» du polytéréphtalate d'éthylène (PET) des bouteilles d'eau, qui consiste essentiellement à le décontaminer des substances

indésirables qu'il a absorbées lors de son utilisation. Il ne s'applique qu'un petit nombre de fois, car le matériau se dégrade, et seulement à une faible proportion des quantités utilisées et qu'il ne peut réduire au mieux que de moitié. En France, la capacité de recyclage mécanique des bouteilles en PET représente 50000 tonnes par an, soit 1% des 5 millions de tonnes de déchets plastiques produits chaque année dans le pays.

Tous les autres prétendus «recyclages» du plastique consistent en de nouveaux usages d'un plastique dégradé que l'on stocke ainsi dans des objets tels que vêtements, cintres, pots de fleurs, bancs publics, revêtements routiers, etc., en remplacement de matériaux traditionnels capables, eux, de réintégrer l'un des grands cycles biogéochimiques naturels. Les recyclages de ce type sont à proprement parler des «décyclages», qui ne font pas disparaître le plastique en tant que déchet. Surtout, ils encouragent sa consommation, car, en le faisant disparaître de notre vue, ils nous déculpabilisent. Il ne s'agit donc pas du tout d'économie circulaire, mais d'une économie de type «tire-bouchon» où l'on continue d'extraire des ressources et d'accumuler des déchets plastiques persistants.

Ainsi, au cours des dix dernières années, l'Europe a globalement doublé son taux de recyclage des plastiques (de 5 à 10 millions de tonnes), mais sans avoir diminué sa consommation de plastique vierge, qui a bien au contraire augmenté de 20% et qui continue d'augmenter (chiffres de Plastics Europe).

La recherche s'active donc pour inventer des procédés de «vrai recyclage» du plastique. Plusieurs entreprises développent ainsi de nouvelles technologies fondées sur la solubilisation puis le nettoyage des chaînes de polymères à l'aide de solvants (cas de Pure Cycle Technologies, aux États-Unis). D'autres déconstruisent les chaînes de polymères par voie chimique (Ioniqa aux Pays-Bas, Jeplan au Japon, Loop Industries au Canada) ou enzymatique (Garbo en Italie, Carbios en France) afin de séparer les impuretés et récupérer les monomères avant de les repolymériser. D'autres, enfin, poussent la déconstruction du déchet plastique un peu plus loin, toujours par voie chimique, thermique ou biologique, afin de produire une gamme de petites molécules utilisables soit pour des carburants (Pyrowave en France, PK Clean et Agilyx aux États-Unis), soit pour la régénération de monomères puis de polymères (Fuenix Ecology aux Pays-Bas).

Cependant, toutes ces technologies innovantes présentent encore de fortes contraintes et limites, en termes de nature et de qualité des polymères pouvant être traités, de vitesse de traitement, de devenir des réactifs et des solvants, de rendements, de mise en place de filières industrielles et, *in fine*, de coûts environnementaux, économiques et sociétaux.

Les recherches portent aussi sur les bioplastiques, terme imprécis qui regroupe plusieurs catégories de matériaux. La plupart des bioplastiques développés ne sont que des plastiques biosourcés, c'est-à-dire issus de la biomasse. Leur seul intérêt est de remplacer le pétrole par des ressources agricoles et renouvelables (sucre, maïs) pour obtenir des matériaux de type polyéthylène (PE) ou PET (bio-PE ou bio-PET) strictement identiques aux plastiques d'origine pétrochimique, dont les déchets présentent par conséquent la même dangerosité.

## UN ESPOIR : LES PLASTIQUES BIODÉGRADABLES

L'avenir se joue avec une autre catégorie de bioplastiques : celui des plastiques biodégradables en conditions naturelles, qui sont capables de réintégrer en totalité le cycle naturel du carbone et donc de participer à une véritable économie circulaire. Les vrais biodégradables se distinguent par le label «OK compost Home» (certifié par l'entreprise internationale TÜV Austria), qui garantit que les plastiques disparaissent bel et bien en conditions domestiques comme n'importe quelle feuille végétale.

Par exemple, la société Novamont, en Italie, développe des plastiques biodégradables tels que les sacs doux au toucher des rayons de fruits et légumes des supermarchés, constitués en partie d'amidon de pomme de terre et en partie



d'un polymère biodégradable issu du pétrole (le polybutyrate adipate téréphtalate).

On cherche par ailleurs des substituts au plastique. Les exemples sont nombreux. L'université de Bretagne et l'entreprise Eranova misent sur l'utilisation d'algues locales telles qu'*Ulva armoricana* pour remplacer une partie du plastique. Dans la région de Grenoble, les chercheurs de l'université et du Centre technique du papier travaillent à améliorer les propriétés barrières des papiers et des cartons, sans altérer leur biodégradabilité naturelle, pour concurrencer les plastiques d'emballage. Plusieurs sociétés (L'embellage, Cirophane, Abeego...) commercialisent des tissus enduits de cire d'abeille lavables et réutilisables pour emballer nos aliments à domicile. En Thaïlande, la chaîne de supermarchés Rimping emballer tous ses fruits et légumes dans des feuilles de bananier, parfaitement biodégradables.

Dans notre unité de recherche, à l'Inrae de Montpellier, et en collaboration avec de nombreux partenaires à l'étranger, nous nous focalisons sur les plastiques destinés à l'agriculture et aux emballages alimentaires. Ces derniers ont un rôle essentiel dans la réduction des pertes alimentaires en isolant l'aliment et en créant une atmosphère favorable à sa conservation. Ils évitent sa contamination par des microorganismes ou des substances indésirables qui détériorent ses qualités ou le rendent impropre à la consommation.

Nous cherchons à optimiser la balance «bénéfices-coûts» des emballages en suivant quatre lignes directrices : éviter l'usage du matériau ou réduire sa consommation au strict nécessaire ; favoriser sa réutilisation ; favoriser son recyclage ; enfin, le plus important, veiller

La barquette entièrement biosourcée et biodégradable développée à l'Inrae de Montpellier par l'autrice et ses collègues. Elle est fabriquée à partir de PHA (polyesters synthétisés par des bactéries) et de paille de blé. La main montre des granules de PHA et de la paille de blé réduite en poudre.



### À LIRE

**NATHALIE GONTARD** a récemment publié, avec Héléne Seingier, **Plastique, le grand emballage** (Stock, 2020). Cet ouvrage, fruit de trente ans de travaux et de réflexions sur les plastiques, s'adresse au grand public afin de fournir à chacun les connaissances essentielles sur ces matériaux et leurs problèmes, condition nécessaire pour faire des choix éclairés.

à ce que le matériau soit capable de réintégrer l'un des cycles biogéochimiques naturels. En d'autres termes, nous cherchons d'une part à mieux comprendre et maximiser le rôle positif des plastiques, qui est de réduire les pertes et gaspillages de denrées alimentaires ainsi que les risques sanitaires, et d'autre part à minimiser leurs impacts à long terme sur la santé et l'environnement.

Par ailleurs, avec tous les acteurs de la chaîne alimentaire et en collaboration avec une équipe spécialisée en intelligence artificielle, nous avons développé des outils d'aide à la décision, qui permettent d'anticiper et de comparer les avantages d'un emballage par rapport à un autre. Ils sont accessibles, dans leur version de base, sur la plateforme Plasticnet (<http://plasticnet.grignon.inra.fr/IateTools/>). Nous cherchons maintenant à traduire les informations fournies par nos outils en indicateurs synthétiques, qui offriraient aux acheteurs un diagnostic écologique simple pour chaque emballage disponible, établi sur les trois phases de son cycle de vie (son élaboration, son usage et son devenir après usage, y compris à long terme).

## UN MATÉRIAU POUR BARQUETTE ÉCOLOGIQUE

Dans le cadre de trois grands projets européens que nous avons coordonnés, nous avons développé, en prenant appui sur nos outils de modélisation et d'aide à la décision, une barquette écologique à usage alimentaire (voir la photo page ci-contre). Cette barquette est fabriquée à une échelle préindustrielle par injection et moulage d'un matériau composite à base de polyhydroxycarboxylates, ou PHA (des polyesters synthétisés par des bactéries). La réduction globale de son coût de production est aujourd'hui entre les mains des industriels.

Ces PHA sont obtenus à partir d'effluents liquides issus de l'agriculture ou de l'industrie alimentaire, tels que des eaux usées d'huileries ou de fromageries, et de cultures microbiennes adaptées. Aux PHA on ajoute ensuite des poudres obtenues à partir de sous-produits solides tels que de la paille de blé ou des sarmants de vigne. L'ajout de ces résidus agricoles non utilisés pour l'alimentation humaine ou animale réduit le coût économique et environnemental des PHA tout en optimisant les propriétés fonctionnelles du matériau composite, sans compromettre sa biodégradabilité.

Cette barquette de nouvelle génération utilise uniquement des ressources renouvelables qui n'entrent pas en compétition avec les usages alimentaires. Elle est réutilisable et, après usage, entièrement biodégradée en quelques mois par les microorganismes du sol. Nous nous concentrons à présent sur la dernière phase du cycle de vie de cet

emballage en essayant de développer un procédé de recyclage et de décontamination adapté à la sensibilité thermique des PHA, ainsi qu'une valorisation biologique en fin de vie par méthanisation avec production de biogaz et de fertilisant.

Nous avons aussi développé des additifs nanostructurés à base d'argiles lamellaires et de nanobilles de fer, spécialement conçus pour renforcer les propriétés «barrière à l'oxygène» de nos matériaux lorsqu'ils sont destinés à emballer des aliments très sensibles à l'oxydation.

## ÉLIMINER LES PLASTIQUES INUTILES

Ces exemples de travaux et d'innovations montrent qu'il est possible de développer des matériaux recyclables et biodégradables capables de remplacer les plastiques classiques dans un certain nombre d'applications. Mais il est important de souligner qu'il n'existe aucune solution miracle. Même si toutes les innovations technologiques en cours sont mises bout à bout, elles ne couvriront jamais qu'une partie de l'étendue immense du problème posé par les plastiques et ne permettraient que de maintenir le débit actuel, sans le réduire efficacement, d'émission massive de microplastiques dans l'environnement.

Alors, ne faut-il pas fermer autant que possible le robinet avant de se jeter sur les serpilières pour éponger une maison inondée? En amont, des efforts sont en effet consentis pour éliminer les plastiques inutiles. Ceux dits «à usage unique» ont été les premiers visés, et nous nous passons à présent très bien des sacs de sortie de caisse ou des cotons-tiges en les remplaçant par leurs équivalents biodégradables en coton ou en carton. De même, la vente en vrac de certains aliments se développe et bon nombre de fruits et légumes frais devront bientôt se passer de leurs habits de plastique (loi Agec – antigaspillage pour une économie circulaire – et Plan national santé-environnement 4 ou PNSE 4).

Identifier les plastiques indispensables et éliminer ceux qui ne le sont pas est un chantier énorme que chaque individu, chaque corps de métier, chaque secteur de l'économie doit prendre à bras-le-corps, avec le soutien de la recherche. Plus globalement, le problème de la pollution plastique est un sujet complexe et difficile à appréhender sous toutes ses facettes. Ses enjeux économiques, environnementaux et de santé publique sont immenses. Mais il subsiste beaucoup d'incertitudes et d'ignorance sur les impacts des déchets plastiques à long terme, et donc sur les impacts réels des innovations censées y remédier. La science a pris du retard sur l'étude du devenir des plastiques longtemps après leur utilisation. Elle doit le rattraper. ■



### TRIBUNES DU MUSÉUM

**NATHALIE GONTARD** interviendra le samedi 3 juillet après-midi lors de la Tribune **Plastiques : l'overdose ?** du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris.

Événement gratuit, informations sur [mnhn.fr/tribunes-plastiques](http://mnhn.fr/tribunes-plastiques)

### BIBLIOGRAPHIE

G. David *et al.*, **Using life cycle assessment to quantify the environmental benefit of upcycling vine shoots as fillers in biocomposite packaging materials**, *International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 26, pp. 738-752, 2021.

F. Coffigniez *et al.*, **The use of modelling tools to better evaluate the packaging benefits on our environment**, *Frontiers in Sustainable Food Systems*, vol. 5, article 634038, 2021.

M. S.-L. Yee *et al.*, **Impact of microplastics and nanoplastics on human health**, *Nanomaterials*, vol. 11, article 496, 2021.

V. Guillard *et al.*, **The next generation of sustainable food packaging to preserve our environment in a circular economy context**, *Frontiers in Nutrition*, vol. 5, article 121, 2018.

N. Gontard *et al.*, **A research challenge vision regarding management of agricultural waste in a circular bio-based economy**, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 48(6), pp. 614-654, 2018.

