

## L'économie des plastiques



*Les plastiques sont des matériaux omniprésents dans notre économie. L'enjeu de cet article est de comprendre l'ampleur de leur utilisation, les problèmes environnementaux associés, leur possibilité de recyclage et les alternatives issues de ressources renouvelables.*

### Résumé :

- L'humanité utilise environ 400 millions de tonnes de plastiques annuellement, principalement pour des emballages, qui deviennent rapidement des déchets ;
- Le recyclage des plastiques présente des défis techniques et économiques. En pratique, l'utilisation de plastiques recyclés par l'industrie européenne reste faible (7 % d'incorporation en 2017) ;
- Nous identifions plusieurs risques potentiels liés à l'utilisation de ces matériaux : un risque d'épuisement de la ressource et un risque climatique, liés à l'utilisation des ressources fossiles (pétrole) pour leur production et aux difficultés de recyclage ; un risque de toxicité et de pollution, lié à la présence de produits chimiques et à la fragmentation en microplastiques ;
- Nous présentons dans une dernière partie les alternatives aux plastiques issus de la pétrochimie, les plastiques issus de matières premières renouvelables ;
- Les recherches sur l'impact de l'utilisation des plastiques sur la santé et l'environnement, et le développement des techniques de recyclage et de plastiques plus écologiques, ainsi que les efforts de réduction, doivent prendre plus d'ampleur.

Les matériaux sont à la base de la chaîne de valeur. Leur disponibilité est essentielle pour produire des biens et des services. Les matériaux ont différentes propriétés physiques et mécaniques, qui leur confèrent différentes possibilités d'applications industrielles. Dans cet

article, nous nous concentrons sur les plastiques, utilisés dans la plupart des biens vendus aujourd'hui.

Depuis le milieu du 20ème siècle, l'humanité a produit quelques 8,3 milliards de tonnes de plastiques<sup>i</sup>, selon l'étude de Geyer et co-auteurs parue en 2017 : 6,3 milliards de tonnes sont déjà devenus des déchets, et les auteurs estiment qu'environ 9 % de ces déchets ont été recyclés, 12 % incinérés et 79 % se sont accumulés en décharge ou dans l'environnement. Les auteurs estiment qu'à ce rythme, les décharges et la nature compteront environ 12 milliards de tonnes de déchets plastiques d'ici 2050. Pourquoi n'avons-nous pas recyclé ce plastique, et pourrions-nous seulement nous en passer ?

## 1. Les plastiques, des matériaux omniprésents dans notre économie

### 1.1 Caractéristiques des plastiques

Les plastiques sont principalement dérivés du pétrole brut et du gaz naturel (AP, 2020). Nous verrons dans la section 4 qu'ils peuvent aussi être synthétisés à partir de matières premières renouvelables.

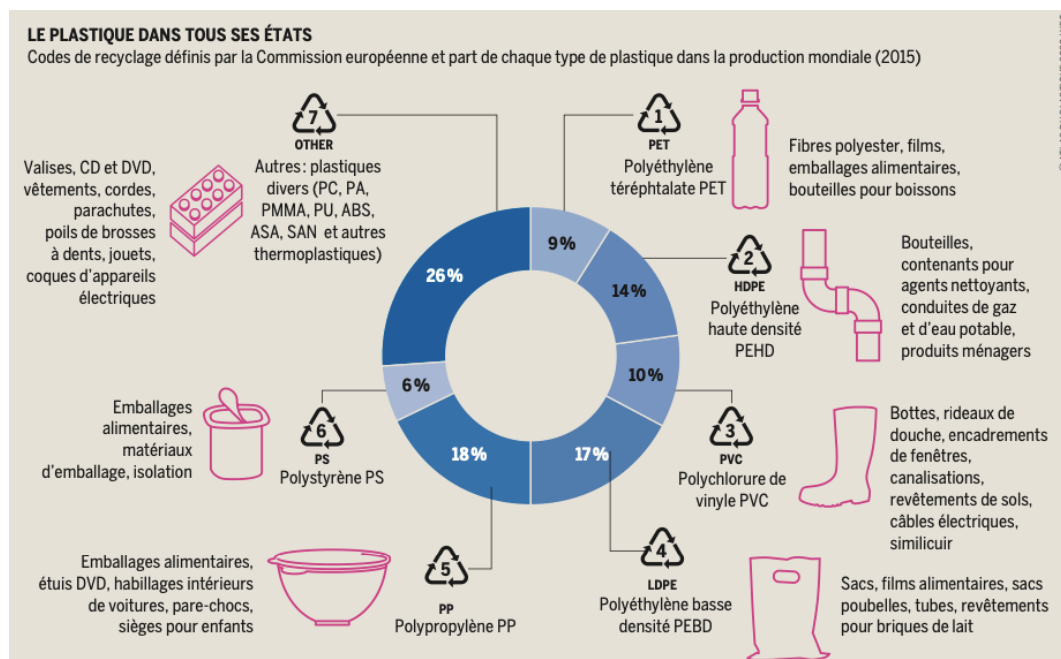
Les plastiques sont constitués de *polymères*, un ensemble de grosses molécules carbonées (chaînes polymères), dont les sous-unités sont appelées *monomères*. En fonction de la nature chimique des monomères et de leurs assemblages possibles, on va pouvoir fabriquer différentes sortes de polymères. Ensuite sont ajoutés des *additifs* - divers composés chimiques - afin d'améliorer les propriétés de la matière. Par exemple, on peut ajouter des plastifiants pour réduire la rigidité, ou des colorants pour modifier la couleur, etc. On peut donc obtenir différentes matières plastiques avec ces manipulations, chacune ayant des propriétés distinctes.

Matière plastique = [polymère] + [additifs]

Les possibilités de création sont quasi infinies et un grand nombre de plastiques ont des propriétés suffisamment intéressantes pour des applications commerciales.

Par abus de langage, le nom du polymère qui constitue le plastique est utilisé pour désigner la matière plastique en question, comme on peut le voir dans la Figure 1 (issue de l'Atlas du Plastique 2020), qui présente les parts de chaque plastique dans la production mondiale de 2015. Au sein d'une même catégorie, les additifs utilisés ne seront donc pas les mêmes en fonction des applications. Le principal plastique produit est le polypropylène (PP), utilisé pour les emballages alimentaires, mais aussi les billets de banque ou encore les masques chirurgicaux.

**Figure 1** : Part de chaque plastique dans la production mondiale (2015), suivant les codes de recyclage européen.



Source : Infographie issue de l'Atlas du Plastique (2020)

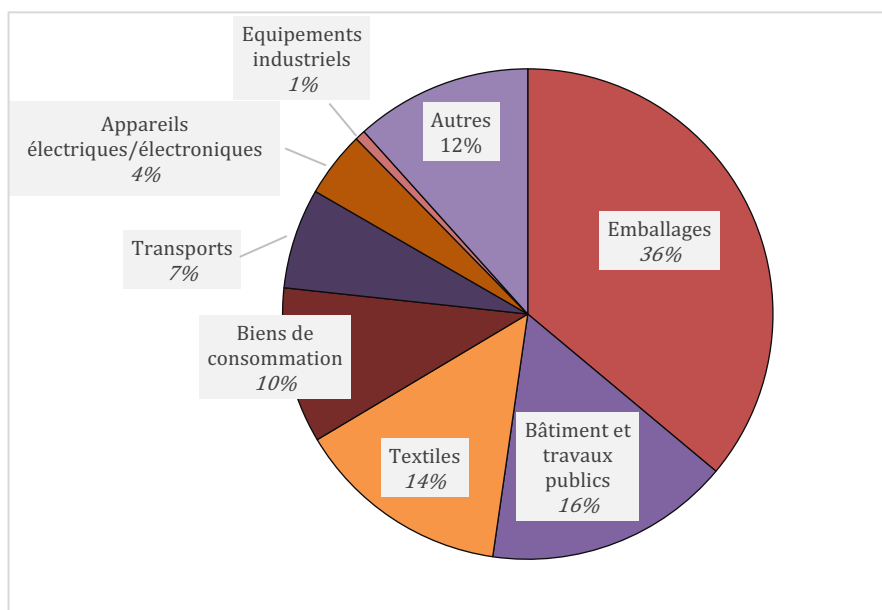
## 1.2 Applications et utilisation industrielle

La Figure n°2 montre que les plastiques sont principalement utilisés pour les emballages (36 % de l'utilisation totale), les bâtiments (16%) et les textiles (14%). A titre d'exemple, le PET, étanche aux gaz et aux liquides, est particulièrement utilisé pour les boissons (AP, 2020). Le PP résiste aux fortes températures et peut donc être utilisé pour les liquides chauds (AP, 2020). Le bâtiment recourt beaucoup au PVC (rigide et durable) et au PEHD pour les canalisations (AP, 2020).

Les plastiques, étant légers et isolants, ont également bon nombre d'applications dans l'électronique. Les équipements électriques et électroniques sont composés d'environ 26 % de plastiques en moyenne (en termes de poids) (Berthoud, 2016). Il semble désormais difficile d'imaginer la digitalisation de l'économie sans les plastiques. Du fait de leur résistance aux vibrations et leur durabilité ils sont également utilisés dans les transports (pare-chocs, sièges, tableaux de bords...) (AP, 2020). Leur légèreté permet notamment de faire des économies d'énergie par rapport à des matériaux plus lourds. Dans le secteur des énergies renouvelables, les plastiques semblent également s'imposer dans les panneaux photovoltaïques et les éoliennes (Plastics Europe, 2021 ; Jensen, 2019).

Le plastique (jetable) est aussi beaucoup utilisé dans le secteur médical, en particulier pour réduire les risques d'infection. Aux États-Unis, les hôpitaux génèrent ainsi jusqu'à 3 500 tonnes de déchets plastiques par jour<sup>ii</sup>. Avec la pandémie, cet usage s'étend à la population : la production de masques (FFP2 et chirurgicaux, en polypropylène) a été multipliée par 30 en France.<sup>iii</sup>

**Figure 2 : Utilisation mondiale des plastiques par secteur industriel (2017)**  
Répartition de 438 millions de tonnes



Source : Chiffres de l'Atlas du Plastique (2020), Figure de l'auteur

## 2. Le recyclage des plastiques : est-ce possible ?

Beaucoup des déchets plastiques collectés proviennent des emballages<sup>iv</sup> (60 % des déchets plastiques ménagers collectés chaque année dans l'UE ; Plastics Europe, 2019). Nous allons voir dans cette partie que la question du recyclage des plastiques reste complexe.

### 2.1 Défis techniques : produire des matériaux à haute valeur ajoutée sans faire exploser les coûts économiques et environnementaux

Nous avons vu qu'il existait des multitudes de plastiques différents et souvent, ils sont utilisés en mélange entre eux et/ou avec d'autres matériaux. Par exemple, un ordinateur peut contenir une vingtaine de plastiques différents (Berthoud, 2016). La phase de tri et de séparation des matériaux est complexe et coûteuse. L'intensité du tri réalisé va dépendre de la qualité finale recherchée (Chaumonnot, 2021). Nous présentons deux techniques de recyclage, venant après la collecte et le tri.

Le recyclage *mécanique* est la technique la plus utilisée et la moins coûteuse, mais requiert un tri intensif (Chiappinelli, O. et co., 2020). Il expose la matière à des températures élevées, pour la refondre, ce qui accélère son vieillissement (IFP, 2020). La phase de décontamination (retrait des additifs et impuretés) n'est souvent pas possible, ce qui peut empêcher le plastique de revenir à une qualité alimentaire (IFP, 2020). Ainsi, ce recyclage produit des matériaux de qualité souvent inférieure aux matériaux vierges, et le nombre de fois où la matière peut être recyclée est limité (Ragaert et co, 2017).

Le recyclage *chimique* permet de transformer la matière plastique, par exemple jusqu'à récupérer les monomères (dépolymérisation) décontaminés des additifs (IFP, 2020). Dans certains cas, il est donc possible de produire, à partir des monomères, des polymères en tout

point identiques aux polymères vierges. Le modèle économique est en revanche parfois difficile à appliquer à une échelle industrielle, et le bilan environnemental, parfois contesté (Euractiv, 2020). En particulier, en fonction des températures de réaction requises et du nombre d'étapes de purification, cette technologie peut être très énergivore par rapport au recyclage mécanique (Marty *et co.* 2019 ; Euractiv, 2020).

Tous les plastiques ne peuvent pas être refondus (recyclage mécanique), tous ne peuvent être dépolymérisés, ou recyclés plus largement. Ainsi on choisira au cas par cas, en fonction des déchets à traiter (nature et quantité), la technique la plus appropriée, en réfléchissant au coût économique et environnemental, et à la qualité recherchée. Une piste pour faciliter le recyclage, serait de limiter la diversité des plastiques (notamment, additifs utilisés), afin de permettre le développement de techniques plus standardisées (Chiappinelli, O. *et co.*, 2020 ; Chaumonnot, 2021).

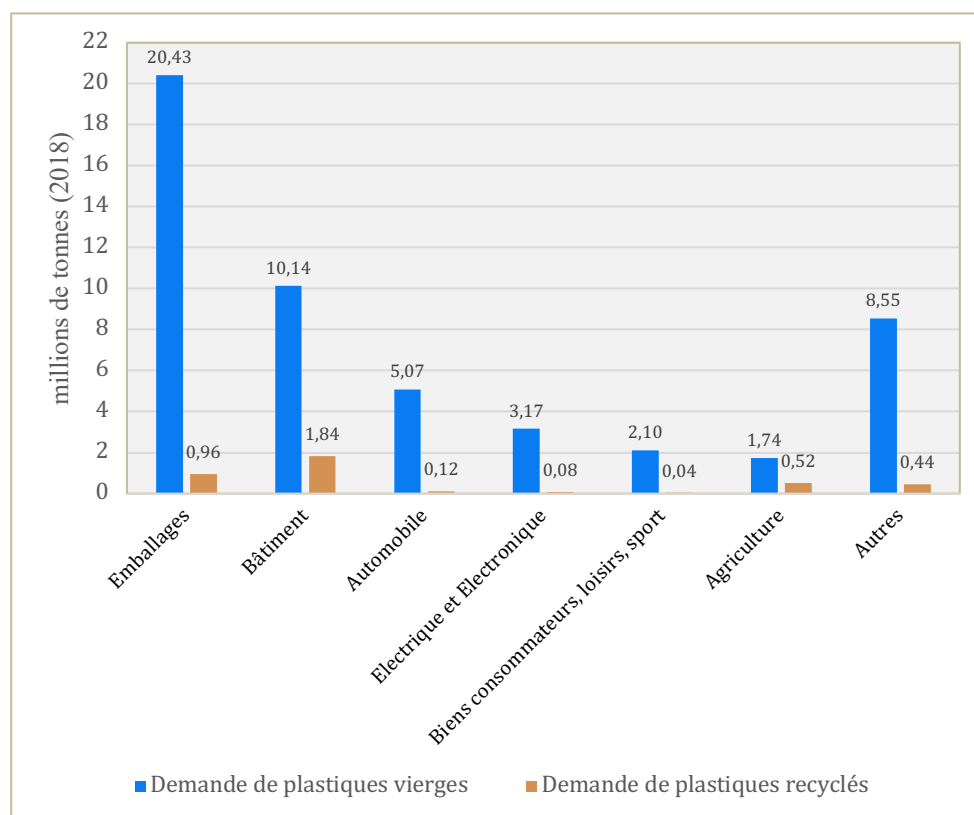
## 2.2 Incitations économiques : imparfaite substituabilité et concurrence en prix entre le recyclé et son substitut vierge.

Si le plastique recyclé est de moindre qualité, les agents économiques vont être prêts à payer moins que pour le plastique vierge, de qualité supérieure.<sup>vi</sup> Souvent, du plastique vierge est ajouté en complément du recyclé, pour assurer de bonnes propriétés au produit final. Pour certaines applications, comme les emballages alimentaires où les normes des produits sont les plus contraignantes, les producteurs vont parfois préférer la résine vierge pour éviter tout risque de contamination de la matière recyclée (Euractiv, 2020).

En outre, il est difficile pour la résine recyclée d'être compétitive face aux résines vierges, bon marché. Ainsi, si le prix du pétrole est bas, les résines vierges peuvent atteindre un prix inférieur à celui de leur substitut recyclé (Fédérec, 2015 ; Milios, 2018 ; Joltreau, 2019 ; Aydel 2020). Les recycleurs font donc face à un arbitrage coût-qualité exacerbé par cette concurrence avec les matériaux vierges. Mais dernièrement, pour certains plastiques et certaines qualités, la demande a fortement augmenté, et s'est retrouvée contrainte par l'offre.<sup>vii</sup>

**Figure 3 : Consommation de matériaux plastiques de l'industrie européenne par secteur (2018)**

*Comparaison de la consommation de résines vierges versus recyclées*



Source : Données Plastics Europe (2019, 2020), Figure de l'auteure

Note : « Autres » inclut le secteur médical, ameublement, électroménager, etc.

La Figure n°3 montre que la consommation de plastiques recyclés reste encore faible dans l'industrie européenne, par rapport aux volumes de résines vierges utilisés. La part de plastiques recyclés dans la consommation européenne de plastiques est de 7 %, tout secteur confondu. La principale application se trouve dans le secteur de l'agriculture (23 % d'incorporation) et du bâtiment (15 % d'incorporation), alors que la plupart des déchets collectés proviennent d'emballages. On parle alors de recyclage en boucle ouverte<sup>viii</sup> ou encore, de *décyclage*, si cela est dû à une perte de qualité.

Si les plastiques ne peuvent être contenus dans le cycle industriel, ils finiront par rejoindre l'environnement, sous forme d'émissions (avec ou sans valorisation énergétique) ou sous forme de déchets solides (en décharge encadrée, ou « sauvage »).

### 3. Les enjeux environnementaux et sanitaires des plastiques

Nous identifions deux risques principaux concernant les plastiques : **(i)** leurs risques chimiques et leur fragmentation en microplastiques ; et **(ii)** leur risque pour le climat. Les risques de l'utilisation d'objets en plastique sur la santé humaine et l'environnement ne sont pas encore clairement identifiés.

### 3.1 Risque toxique : additifs et microplastiques

Certains additifs chimiques contenus dans les plastiques peuvent migrer et s'accumuler dans la nourriture, l'air intérieur et la poussière des bâtiments, et présenter un risque sanitaire (AP, 2020 ; Michalowicz, 2014). Par exemple, de nombreux plastifiants sont considérés comme perturbateurs endocriniens, c'est-à-dire qu'ils imitent les hormones du corps (AP, 2020). En 2011, Cirillo et co-auteurs ont montré que les concentrations de phtalates (plastifiants) dans la nourriture d'écoliers augmentaient de plus de 100 % suite à l'emballage des aliments. Il faudrait multiplier les études sur l'exposition à ces additifs à long terme, ainsi que leurs conditions de migration, afin d'identifier les substances et usages dangereux. Ainsi, les normes de produits pourraient être adaptées, en accord avec une écoconception en vue d'un recyclage, qui serait lui aussi facilité par des compositions chimiques simplifiées.

On estime qu'environ un tiers des plastiques produits chaque année terminent dans le sol ou les eaux intérieures (AP, 2020). Déversés ou enfouis dans l'environnement, les plastiques se fragmentent<sup>ix</sup>, en particules minuscules pouvant passer les barrières des organismes vivants (Gontard, 2020) et se comportent comme des aimants à substances toxiques (AP, 2020). Les microplastiques<sup>x</sup> se retrouvent partout dans notre environnement, jusqu'aux zones polaires (Obbard et co., 2014). Dans les océans, les bactéries qui se fixent à leur surface peuvent être des contaminants biologiques (ANSES, 2020). Par ailleurs, la pollution des sols par le plastique pourrait être 4 à 23 fois plus élevée que la pollution océanique, avec un impact écologique qui reste à être évalué (AP, 2020).<sup>xi</sup>

Avoir des matériaux sûrs est indispensable. Il nous faudra à l'avenir mieux comprendre l'impact écologique et sanitaire des microplastiques<sup>xii</sup>, qui ne semblent pas seulement liés à la fin de vie des produits. A titre d'exemples, les textiles synthétiques perdent des microfibrilles lors des lavages en machine et certains cosmétiques contiennent des microplastiques, utilisés en tant que tels<sup>xiii</sup>. Des chercheurs ont analysé 259 bouteilles d'eau en plastique (non usagées) et ont trouvé que 93 % étaient contaminées aux microplastiques (Mason, 2018).

### 3.2. Incinération des plastiques : un risque pour le climat

Les déchets plastiques sont souvent incinérés avec une récupération d'énergie, du fait de leur bon rendement calorifique et des difficultés de recyclage. En 2018, ce traitement a concerné 34 % des emballages plastiques dans l'UE<sup>xiv</sup>. Par ailleurs, une fois que les plastiques ont atteint la limite de leur possibilité de recyclage, l'incinération (avec ou sans récupération d'énergie) semble la dernière option pour éviter la mise en décharge.

L'incinération des plastiques, avec ou sans récupération d'énergie, pose un enjeu climatique étant donné que 90 % d'entre eux sont dérivés des combustibles fossiles (EMF, 2017).<sup>xv</sup> Ainsi, lorsqu'ils sont brûlés, ils relâchent du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui était fossilisé dans le sol, augmentant le phénomène d'effet de serre. La fondation Ellen MacArthur estime que d'ici 2050, les plastiques pourraient représenter 15 % de notre budget carbone<sup>xvi</sup> à horizon 2050 (EMF, 2017).<sup>xvii</sup>

## 4. Quelles sont les alternatives aux plastiques issus des ressources fossiles ?

Les plastiques représentaient 6 % de la consommation mondiale de pétrole en 2014, un pourcentage qui pourrait atteindre 20 % en 2050 (EMF, 2017). Peut-on réduire notre dépendance aux ressources fossiles et remplacer les plastiques issus de la pétrochimie par des plastiques bio-sourcés ? Les plastiques bio-sourcés sont issus de matières premières renouvelables<sup>xviii</sup>, par exemple des végétaux, et stockent du carbone lors de leur croissance. Nous présentons dans cette section d'éventuelles alternatives.

### 4.1 L'utilisation de plastiques bio-sourcés peut augmenter la pression sur l'utilisation des terres et avoir un impact environnemental négatif

Les hydrocarbures, matière à partir de laquelle sont fabriqués les plastiques, sont extraits du sous-sol. Pour produire des ressources végétales, il faut libérer des terres pour les cultures. Augmenter la pression sur l'utilisation des terres, les forêts, est difficilement soutenable, dans un contexte d'accroissement de la population mondiale, de changement climatique et de crise de la biodiversité. L'agriculture utilise déjà cinq milliards d'hectares, soit 38 % de la superficie terrestre mondiale (FAO, 2020). Selon l'Atlas du Plastique 2020, pour fabriquer une tonne d'acide polylactique (PLA), une résine plastique pouvant être produite à partir de maïs, 0,37 hectare de terre est nécessaire. Ainsi, pour atteindre une production de 400 Mt annuelles, il faudrait libérer l'équivalent de 148 millions d'hectares, soit 1,1% de la superficie terrestre.<sup>xix</sup>

Pour S. Pasquier de l'ADEME<sup>xx</sup>, le bilan environnemental du plastique bio-sourcé dépendra du mode de culture. La monoculture, l'utilisation de produits phytosanitaires et la déforestation conduira à un impact environnemental négatif. Notamment, les forêts absorbent beaucoup plus de carbone que les cultures de maïs.<sup>xxi</sup> Cependant, une fabrication de plastiques bio-sourcés à partir de déchets végétaux pourrait présenter un réel avantage, puisqu'elle ne modifiera pas l'usage des terres.

### 4.2. Le recyclage de résidus organiques pour la production des bioplastiques permet de ne pas modifier l'usage des terres

A. Moores et son équipe, de l'université de McGill au Canada, ont trouvé un nouveau procédé permettant de fabriquer du plastique biodégradable à partir de carapaces de crevettes et de coquilles d'autres crustacés<sup>xxii</sup> (bio-sourcé, donc) (AP, 2020). Selon les chercheurs, ce matériau pourrait être utilisé dans le secteur médical, mais aussi les emballages. Chaque année 6 à 8 millions de tonnes de déchets issus de crustacés sont générés chaque année ; ce qui est encore bien loin de nos 400 millions de tonnes de plastiques annuelles.

Mais, selon N. Gontard et co., nous pourrions remplacer 50 % des plastiques pétrochimiques consommés en Europe par des plastiques bio-sourcés issus de résidus agricoles, ceci en utilisant moins de 30 % des résidus agricoles (Gontard, 2018).

### 4.3. Bio-sourcés et ensuite ?



Bio-sourcé ne signifie pas nécessairement recyclable et/ou biodégradable. Moins de 20% des bioplastiques<sup>xxiii</sup> étaient considérés biodégradables en 2019 (EEA, 2018). En outre, certains seront considérés biodégradables en compostage industriel, mais difficilement en milieu naturel, comme le PLA<sup>xxiv</sup>.

Les équipes de N. Gontard travaillent également sur la recyclabilité et la biodégradabilité en conditions naturelles de leurs matériaux. Par ailleurs, les chercheurs explorent encore les possibilités de substitution des additifs controversés (Gontard, 2018).

Pour A. Chaumonnot, la priorité sera notamment de recycler le plastique déjà produit (issu de la pétrochimie), et éventuellement considérer un complément vierge bio-sourcé<sup>xxv</sup> pour améliorer les propriétés du recyclé, tout en réduisant notre utilisation dès que cela est possible, et en gardant à l'esprit que les solutions pour diminuer notre impact environnemental seront multiples (Chaumonnot, 2021).

## Conclusion

Les plastiques sont désormais présents partout, dans nos objets, comme dans notre environnement. Il est difficile de concevoir pouvoir « s'en passer », dans le secteur des nouvelles technologies comme dans le secteur médical. Et pourtant, au vu de leurs difficultés de recyclage, les plastiques finissent par quitter le cycle industriel, sous forme d'émissions de gaz à effet de serre (incinération) ou solide (déchets), pour ensuite se fragmenter. Une piste pour faciliter le recyclage serait de limiter la diversité des plastiques. Ceci viendrait également restreindre les possibilités de conception des produits.

La majorité des plastiques sont produits à partir des combustibles fossiles, une ressource épuisable. Ainsi, si nous n'arrivons pas à avoir des matériaux renouvelables, par un recyclage, ou par la nature de la source, nous serons inévitablement contraints de nous « en passer » un jour. Par ailleurs, dans une optique d'économies des ressources, et en prévention de certains risques écologiques en attente d'évaluation (notamment, microplastiques), leur réduction doit être priorisée, en accord avec la hiérarchie des méthodes de traitement des déchets (réduire, réutiliser, recycler).

De nouvelles études sur l'impact de l'utilisation des plastiques sur la santé et l'environnement, ainsi que la recherche sur les techniques de recyclage, les alternatives bio-sourcées et biodégradables, sont attendues pour une meilleure compréhension des enjeux qui nous attendent.

## Bibliographie

[AP, 2020] : Atlas du plastique 2020. Faits et chiffres sur le monde des polymères synthétiques. ISBN : 979-10-97395-01-8

Adyel, T.M. (2020) "Accumulation of plastic waste during COVID-19", *Science*, Vol. 369, Issue 6509, pp. 1314-1315, DOI: 10.1126/science.abd9925

ANSES (2020) "Les microplastiques, un risqué pour l'environnement et la santé », Agence

nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, article consulté le 11/02/2020 au lien suivant : <https://www.anses.fr/fr/content/les-microplastiques-un-risque-pour-l-environnement-et-la-santé>

Berthoud, F. (2016) « Recyclage des plastiques », publication informative disponible au lien suivant : <https://ecoinfo.cnrs.fr/2016/05/10/recyclage-des-plastiques/>

Chaumonnot, A. (2021), entretien Teams réalisé le 24/02/2021 avec Alexandra Chaumonnot, ingénieure de recherche et cheffe de projet à IFP Énergies Nouvelles.

Chiappinelli, O. *et co.* (2020) "A Green COVID-19 Recovery of the EU Basic Materials Sector: Identifying Potentials, Barriers and Policy Solutions" *DIW Berlin Discussion Paper No. 1921*, SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3749104> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3749104>

Cirillo T., *et co.* (2011) "Children's exposure to Di(2-ethylhexyl)phthalate and dibutylphthalate plasticizers from school meals". *J Agric Food Chem.* 2011 Oct 12;59(19):10532-8. doi: 10.1021/jf2020446. Epub 2011 Sep 19. PMID: 21894916. Disponible à : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21894916/>

EEA (2018) « The circular economy and the bioeconomy. Partners in sustainability". European Environment Agency Report No 8/2018, ISBN: 978-92-9213-974-2

[EMF, 2017]: Ellen Macarthur Foundation (2017), "The New Plastics Economy: Rethinking the Future of Plastics & Catalysing Action".

Euractiv, (2020), article de Kira Taylor, édité par Frédéric Simon, « EU defines sustainable plastic manufacturing in draft green finance rules », consulté le 25/02/2020, disponible au lien suivant : <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/chemical-recycling-must-have-lower-emissions-than-manufacturing-virgin-material-to-be-green/>

FAO, (2020), News "Land use in agriculture by the numbers", Food and Agriculture Organization of the United Nations. Article disponible au lien suivant: <http://www.fao.org/sustainability/news/detail/en/c/1274219/>, consulté le 28/01/2020.

Fédérec (2015) "L'Industrie du recyclage à l'horizon 2030. Le Livre Blanc des professionnels du secteur » <https://federec.com>

Geyer R., Jambeck J. R., and Lavender Law K., (2017): "Production, use, and fate of all plastics ever made", *Science Advances*, Vol. 3, no. 7

Gontard N. *et co.*, (2018) "A Research Challenge Vision Regarding Management of Agricultural Waste in a Circular Bio-Based Economy", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 48, No. 6, 2018.

Gontard, N (2020) « Bonnes feuilles : « Plastique, le grand emballage », article de presse paru dans *The Conversation*, disponible à : <https://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/produits-biosources>, consulté le 03/02/2020

IFP (2020) « Recyclage des plastiques » IFP énergies nouvelles, article consulté le 03/02/2020 au lien suivant : <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/innovation-et-industrie/nos-expertises/climat-environnement-et-economie-circulaire/recyclage-des-plastiques>

Jensen J.P. (2019) “Evaluating the environmental impacts of recycling wind turbines”. *Wind Energy*; 22:316–326.

Joltreau E., (2019) “(De)globalization of International Plastic Waste Trade. Stakes at Play and Perspectives”. *Édito Énergie, Ifri*, 18 September 2019.

Marty, A., et V. Tournier, S. Duquesne, I. André (2019) “Addressing the problem of plastic waste: Development of an enzymatic process for PET recycling”, in ECI Symposium Series, [En ligne] Disponible au lien: [https://dc.engconfintl.org/enzyme\\_xxv/113](https://dc.engconfintl.org/enzyme_xxv/113)

Mason, S. A. et co. (2018) “Synthetic Polymer Contamination in Bottled Water.” *Frontiers in chemistry* vol. 6 407. doi:10.3389/fchem.2018.00407

Michałowicz, J. (2014) “Bisphenol A – Sources, toxicity and biotransformation”, *Environmental Toxicology and Pharmacology*, Volume 37, Issue 2, Pages 738-758, ISSN 1382-6689,

Milios, L. et co. (2018), “Plastic Recycling in the Nordics: A Value Chain Market Analysis”, *Waste Management*, Vol. 76, p. 180-189.

Obbard R.W., Sadri S., Wong Y.Q., Khitun A.A., Baker I., Thompson R.C. (2014). Global warming releases microplastic legacy frozen in Arctic Sea ice. *Earth's Future*. 2, 315-320.

Plastics Europe (2019) – The Facts, disponible au lien suivant : <https://www.plasticseurope.org/fr/resources/publications/1804-plastics-facts-2019>, consulté le 01/02/2020

Plastics Europe (2020) – The Facts, disponible au lien suivant : [https://www.plasticseurope.org/application/files/5716/0752/4286/AF\\_Plastics\\_the\\_facts-WEB-2020-ING\\_FINAL.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/5716/0752/4286/AF_Plastics_the_facts-WEB-2020-ING_FINAL.pdf)

Plastics Europe (2021) “Plastics – Helping to create and save energy”, <https://www.plasticseurope.org/en/about-plastics/energy>, site consulté le 01/03/2020

Ragaert, K, Delva, L. and Van Geem, K. (2017): “Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste”, *Waste Management*, Volume 69, Pages 24-58, ISSN 0956-053X

Tournier, V., et co., (2020) ‘An engineered PET depolymerase to break down and recycle plastic bottles’, *Nature*, vol. 580, no. 7802, pp. 216–219, Apr. 2020, doi: 10.1038/s41586-020-2149-4. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2149-4>

## Notes de fin

<sup>i</sup> Issus de résines polymères vierges, c'est-à-dire non issus du recyclage de déchets plastiques.

<sup>ii</sup> Sarah Gibbens, pour *National Geographic* "Can medical care exist without plastic" <https://www.nationalgeographic.com/science/2019/10/can-medical-care-exist-without-plastic/>

<sup>iii</sup> Julien Cottineau pour Usine Nouvelle « De la pénurie à la profusion... La production de masques FFP2 et chirurgicaux multipliée par 30 ». <https://www.usinenouvelle.com/article/de-la-penurie-a-la-profusion-voici-ou-sont-produits-les-masques-chirurgicaux-et-ffp2-en-france.N1042104>

<sup>iv</sup> Nous pouvons supposer que cela s'explique à leur importante consommation de plastique, leur faible durée de vie, ainsi qu'aux filières de collecte et de tri mises en place.

<sup>v</sup> Selon la norme ISO15270, le recyclage chimique est une transformation des déchets plastiques en matières premières secondaires ou produits sans modification significative de la structure chimique du matériau.

On peut y associer comme technologies : la dépolymérisation, la conversion et éventuellement, la dissolution. La dissolution utilise des solvants et la dépolymérisation, des réactifs. Ces techniques sont détaillées dans l'article de l'IFP Energies Nouvelles (2020). A noter que l'option de dissolution pour récupérer le polymère est souvent considérée comme un recyclage mécanique (et non chimique) puisqu'elle ne touche pas aux chaînes de polymères dans le processus. Mais par abus de langage, la dissolution, faisant intervenir la chimie, est parfois considérée comme recyclage chimique.

Le recyclage enzymatique est également en cours de développement à Clermont-Ferrand (entreprise Carbios) pour le PET, et permettrait, comme l'alternative chimique pour certains polymères, de revenir aux monomères (Tournier et co., 2020) ; avec pour avantage d'utiliser moins d'énergie (température de réaction basse ; Marty et co., 2020)

<sup>vi</sup> A moins que cela ne profite à leur image, et donc à leurs ventes ; ou qu'il existe un taux d'incorporation obligatoire pour le produit en question. Par exemple, l'Europe a imposé un taux d'incorporation de 25% d'ici 2025 pour les bouteilles en PET transparent. Voir l'article des Echos (note suivante) pour plus d'informations.

<sup>vii</sup> Myriam Chauvot pour *Les Echos* « Pourquoi le plastique recyclé devient une denrée rare... et chère ». Article disponible au lien suivant : <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/pourquoi-le-plastique-recycle-devient-une-denree-rare-et-chere-1164105>

<sup>viii</sup> Le déchet est recyclé pour un autre usage que le produit dont il est issu.

<sup>ix</sup> Les plastiques se fragmentent sous l'action des rayons ultraviolets du soleil, des forces physiques des ondes et de l'hydrolyse. Vous pouvez vous référer à l'article d'Alain-Hervé le Gall, Université de Rennes, disponible au lien suivant <https://osur.univ-rennes1.fr/news/les-nanoplastiques-dans-les-oceans-une-pollution-environnementale-tres-sous-estimee.html>

<sup>x</sup> Plastique dont la taille est inférieure à 5mm. Sont également définis les « nanoplastiques » (<100nm).

<sup>xi</sup> La chercheuse Nathalie Gontard (Gontard, 2020) nous alerte également sur nos stations d'enfouissement : « Les plastiques enfouis dans nos stations sont donc destinés, à terme, à rejoindre leurs contemporains qui ont fui directement dans la nature, pour contaminer nos eaux douces et nos océans, après avoir transité par nos sols »

<sup>xii</sup> L'impact sur la santé humaine reste également à être évalué, et pourtant, nous ingérerions jusqu'à 5g de plastiques par semaine. Voir l'article de Kala Senathirajah et Thava Palanisami, 2019, "How much microplastics are we ingesting? Estimation of the mass of microplastics ingested.", disponible au lien suivant: <https://www.newcastle.edu.au/newsroom/featured/plastic-ingestion-by-people-could-be-equating-to-a-credit-card-a-week/how-much-microplastics-are-we-ingesting-estimation-of-the-mass-of-microplastics-ingested>

<sup>xiii</sup> Voir l'article de Green Peace sur le sujet, <https://www.greenpeace.ch/fr/story-fr/25787/les-microplastiques-particules-cosmetiques-et-fibres-textiles/>

---

<sup>xiv</sup> Estimation Eurostat : <https://ec.europa.eu/eurostat/>, base de données [env\_waspac]

<sup>xv</sup> Par ailleurs, l'incinération des plastiques génère des déchets ultimes très toxiques (AP, 2020).

<sup>xvi</sup> Quantité d'émissions de gaz à effet de serre qu'il « reste » pour l'humanité à émettre afin de ne pas dépasser la cible maximale de réchauffement climatique à horizon 2100 aux termes de l'Accord de Paris.

<sup>xvii</sup> Les chercheurs soupçonnent également les particules de microplastiques dans les océans d'impacter la capacité des planctons à capturer le CO2 atmosphérique (AP, 2020). Des recherches sur ce sujet sont encore attendues.

<sup>xviii</sup> Selon l'ADEME « Bio-sourcé » veut dire : obtenus à partir de matières premières renouvelables issues de la biomasse (végétaux par exemple).

Les végétaux sont considérés comme matériaux renouvelables, puisqu'ils peuvent repousser d'une période à l'autre. Ceci suppose que l'agriculture pratiquée respecte le maintien des propriétés du sol.

<https://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/produits-biosources>

<sup>xix</sup> Calcul de l'auteure. La comparaison est faite à titre d'exemple. Chaque résine plastique étant différente, le PLA ne pourra pas imiter les caractéristiques de chacune d'entre elles.

<sup>xx</sup> De l'Agence de l'Environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), intervenu sur France Inter : <https://www.franceinter.fr/environnement/le-nouveau-plastique-vegetal-est-il-bon-pour-la-nature>

<sup>xxi</sup> Article de l'Université de Bonn "More bioplastics do not necessarily contribute to climate change mitigation", disponible au lien : <https://phys.org/news/2018-12-bioplastics-necessarily-contribute-climate-mitigation.html>

<sup>xxii</sup> Pour un article sur le sujet : <https://www.cbc.ca/news/canada/montreal/mcgill-researchers-use-lobster-shells-to-make-biodegradable-plastic-1.4920820>

<sup>xxiii</sup> Bioplastiques : plastiques biodégradables et/ou biosourcés (EEA, 2018)

<sup>xxiv</sup> Publication du CNRS « L'acide polylactique (PLA), le matériau de base », disponible au lien suivant : <https://www.prc.cnrs.fr/spip.php?rubrique129>

Extrait : « À l'autre extrémité du cycle de vie, la biodégradation du PLA se produit dans les conditions particulières du compostage industriel en conditions contrôlées de température, d'humidité et de présence de micro-organismes. Elle intervient difficilement dans le milieu naturel. »

<sup>xxv</sup> Comme évoqué dans la section n°2, un complément vierge est souvent ajouté au recyclé, pour assurer de bonnes propriétés au produit final.