



POLLUTION DES OCÉANS

**QUELLES
ALTERNATIVES
AU PLASTIQUE
CONVENTIONNEL?**



Les études du Centre Jean Gol

www.cjg.be

Cette étude a été portée par **Claire Schmitz**.

Je la remercie, ainsi que **Corentin de Salle**, Directeur du Centre Jean Gol, pour avoir supervisé cette étude.

Je vous souhaite une excellente lecture de ce numéro des Études du Centre Jean Gol.

RICHARD MILLER

Administrateur délégué

Les Études du Centre Jean Gol sont le fruit de réflexions entre collaborateurs du CJG, des membres de son comité scientifique, des spécialistes, des mandataires et des représentants de la société civile.

Accessibles à tous, elles sont publiées sous version électronique et sous version papier.

RESPONSABLES SCIENTIFIQUES

Richard Miller, Administrateur délégué du CJG
Corentin de Salle, Directeur du CJG

résimé

La pollution de l'océan par les déchets plastiques est une catastrophe écologique qui se poursuit en ce moment alors que, chaque seconde, des milliers de déchets sont déversés dans les mers par dix grands fleuves en Asie et en Afrique.

Beaucoup d'efforts sont entrepris depuis des années. L'Europe, qui possède déjà un système de gestion des déchets plastiques fort élaboré, a adopté des directives. La Belgique, qui a presque réduit à rien la mise en décharge des déchets plastiques, fait figure de pionnière en la matière. Mais elle doit augmenter son taux de recyclabilité de ce type de déchets.

Mais une autre question se pose aujourd'hui : ne faudrait-il pas trouver des alternatives aux plastiques conventionnels ? N'est-il pas possible de fabriquer des matériaux qui, s'ils échouent dans la nature, ne la polluent pas ? Des plastiques qui ne nécessitent pas que nous utilisions des hydrocarbures pour les fabriquer ? Des plastiques qui permettraient aussi d'utiliser du CO₂ pour les fabriquer ? Est-ce réalisable dans l'immédiat ? Est-ce rentable ? Est-ce souhaitable ? C'est l'objet de cette étude

Une étude réalisée par

CLAIRE SCHMITZ & CORENTIN DE SALLE



INTRODUCTION

Corentin de Salle

La **pollution des océans par les déchets en plastique** est un **désastre écologique** qui fait tristement la une des journaux depuis plusieurs années.

Chaque année, c'est jusqu'à 4 millions de tonnes de déchets en plastique qui sont déversés dans les océans¹ par dix grands fleuves (dont 2 sont africains et 8 sont asiatiques). Ces déchets flottants se regroupent en cinq endroits surnommés les « gyres ». **Cette pollution est catastrophique car beaucoup de poissons et oiseaux ingèrent ces déchets et en meurent** (c'est le cas de tous ces cormorans qui agonisent le gésier rempli de capsules de bouteilles). Un grand nombre de poissons meurent inutilement chaque année, emprisonnés dans de grands filets de pêche abandonnés et errants dans les mers. Etc. Par ailleurs, une bonne partie des ces plastiques finit par couler au fond des océans et une autre partie, encore plus inquiétante, « la menace invisible », se fragmente, sous l'érosion et par la force mécanique des vagues, **en morceaux toujours plus petits appelés « microplastiques »**, lesquels se répandent partout (on en retrouve même dans les glaces de l'Antarctique), se chargent de bactéries toxiques

et mutantes et sont ingérés par la faune marine avec le danger, dit-on, de revenir tôt ou tard dans nos assiettes.

En 2017, la production de plastique dans le monde se chiffrait à 350 millions de tonnes. Quant à elle, l'Europe (l'Europe des 28 plus la Suisse et la Norvège), produisait 64,4 millions de tonnes de plastique la même année (alors qu'en 2016, elle produisait 60 millions de tonnes), soit 18,5 % de la production mondiale. Cela la place au second rang des producteurs après la Chine (29,4%) et juste avant la NAFTA (17,7%).²

Les dix fleuves déversant 90%³ des déchets en plastique dans les océans sont, on l'a déjà précisé, asiatiques et africains mais les 10% restants proviennent des rivages, ports et activités marines un peu partout dans le monde. Aucun des pays d'Europe ne figure dans les 20 pays qui polluent le plus les océans en déchets plastiques mais si on auditionnait l'ensemble des pays européens côtiers, l'Europe se classerait en 18^{ème} position dans cette liste.⁴

Contrairement aux pays du tiers-monde, l'Europe possède heureusement un système de gestion de ses déchets plastiques. En Europe, 27,1 millions de tonnes de déchets en plastique sont collectés chaque année (c'est-à-dire 81% des déchets en plastique) et 610.000 tonnes en Belgique. Au niveau européen, 42,6% de ces déchets collectés et en plastique sont incinérés, 24,9% sont mis en décharge et 32,5% sont recyclés.⁵ Mais 37 % de ces 31% - soit 3,11 millions de tonnes (sur 27,1) - sont recyclés en dehors de l'Europe.⁶

L'Europe doit impérativement gérer la pollution en déchets plastiques qu'elle génère sur ses rivages et en mer. Elle doit aussi augmenter graduellement son taux de recyclage des déchets en plastique afin de réduire parallèlement la mise en décharge (représentant, en 2018, encore 7,2 millions de tonnes) et l'incinération.

C'est d'ailleurs ce à quoi elle s'emploie grâce à la « directive packaging » (emballage) de 2018. 40,8% des emballages plastiques étaient recyclés en Europe en 2016⁷ mais la directive impose que 50% le soient en 2025.

¹ Il n'y a pas d'estimation très précises du nombre de déchets déversés annuellement : on estime ces derniers entre 0,4 millions et 4 millions de tonnes. C. Schmidt, T. Krauth & S.Wagner, *Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea*, **Environmental Science & Technology**, 2017/10/11 https://www.researchgate.net/publication/320334613_Export_of_Plastic_Debris_by_Rivers_into_the_Sea

² **PlasticsEurope, Plastics – the Facts 2018**, pp.18-19 https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf

³ Les estimations parlent d'une fourchette allant de 88 à 95% C. Schmidt, T. Krauth & S.Wagner, *Export of Plastic Debris by Rivers into the Sea*, **Environmental Science & Technology**, 2017/10/11

⁴ **J.R. Jambeck, R. Geyver and Co, Marine Pollution. Plastic waste inputs from land into the ocean**, **Science** 347, (6223) cité in M. De Smet & M. Linder, *A circular economy for plastics, Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions*, **European Commission**, 2019, p.16 https://www.hbm4eu.eu/wp-content/uploads/2019/03/2019_RI_Report_A-circular-economy-for-plastics.pdf

⁵ **PlasticsEurope, The Circular Economy for Plastics. A European Overview**, 2019, p.29 <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/1899-circular-economy-plastics-european-overview>

⁶ **PlasticsEurope, Plastics – the Facts 2018**, pp.30-34

⁷ On parle bien ici des emballages plastiques et pas des déchets plastiques, lesquels (pour la partie collectée) ne sont recyclés aujourd'hui qu'à 31,1% en moyenne. Il s'agit ici de l'Europe des (encore) 28 + deux autres pays (Suisse et Norvège).

La Belgique est, sur ce point, une référence au niveau mondial. A peine 2% de nos déchets en plastique sont mis en décharge. 64% sont valorisés énergétiquement (incinération avec récupération de la chaleur) et 34% sont recyclés. Mais une partie encore trop importante de nos déchets en plastique à recycler (environ 2/3) le sont en dehors de la Belgique.⁸ Et il serait aussi préférable de recycler une plus large part de nos déchets en plastique plutôt que de les brûler. Par ailleurs, en 2018, la consommation de plastique était deux fois plus importante que les déchets en plastique générés par cette consommation. Ce qui signifie que les produits en plastique en circulation en Belgique sont destinés à rester en service plusieurs années.

C'est en effet la plastique a durée de vie très courte qui est dans le collimateur. Plus particulièrement le plastique destiné aux emballages ainsi que le plastique dit « à usage unique ». Raison pour laquelle la Commission et le Parlement Européen ont adopté la **Directive du plastique à usage unique** qui est entrée en vigueur le 3 juillet 2019.

Plusieurs produits en plastique (pour lesquels il existe des alternatives au plastique) seront interdits tels que les touillettes à café, les coton tiges, assiettes, couverts, bâtonnets pour ballon, etc. Des engins de pêche sont également visés. Cette directive impose par ailleurs aux Etats membres un objectif de collecte de 90% des bouteilles en plastique d'ici à 2029. Elle exige également que les bouteilles en plastique aient une teneur en matériaux recyclés d'au moins 25% d'ici à 2025 et d'au moins 30% d'ici à 2030.

Quoi qu'il en soit, le plastique ne doit pas, en soi, être diabolisé. Sous réserve de ce que nous venons de dire précédemment, son invention et sa production ont constitué un **vrai progrès dans l'histoire de l'humanité**. En ce compris pour les emballages. Ces derniers sont considérés, souvent à juste titre, comme inutiles ou trop encombrants.

Mais c'est oublier que ces derniers ont permis, ces 50 dernières années, d'accomplir de vrais progrès sanitaires (en évitant les contaminations). Les plastiques ont permis à la grande distribution d'émerger, réalisant ainsi de véritables économies d'échelle et diminuant le gaspillage : en effet, grâce à l'emballage hermétique rendu possible grâce au plastique, les produits se conservent beaucoup plus longtemps. Ces emballages permettent aussi de conserver et de commercialiser des sous-produits de l'industrie alimentaire qui ne l'étaient pas auparavant, par exemple la nourriture pour les animaux domestiques. Beaucoup de progrès ont été accomplis ces dernières décennies : le poids de ces derniers a été diminué de 30 à 70%.⁹

Le plastique est omniprésent. Quasiment tous les objets présents dans une pièce ou dans les vêtements que nous portons sont constitués, en tout ou en partie, de plastique ou de dérivés de plastiques. Il est essentiel dans le secteur médical et pharmaceutique. Une **valve cardiaque** est produite en matières plastiques. Que serait la distribution électrique sans isolants électriques ? L'isolation thermique des bâtiments se fait grâce aux matières plastiques. Le plastique joue aussi un rôle important dans la lutte contre le changement climatique. En effet, comme l'explique le professeur Philippe Dubois, recteur de l'Université de Mons et spécialiste des biomatériaux,¹⁰ il y a, dans une automobile, plus de 1400 pièces en plastique ! Cela a pour effet d'alléger significativement le poids des automobiles (de l'ordre de 30%) car ces matières plastiques remplacent, dans les véhicules, une partie de l'acier, des métaux, du verre, des céramiques, etc. Cela a permis de réduire tout aussi significativement leurs besoins en carburant. **Rien qu'en Europe, nous économisons dès lors, grâce au plastique dans les voitures, 12 millions de tonnes de carburant !** Et, dès lors, précise le professeur Philippe Dubois, nous évitons de manière concomitante, une émission importante de CO₂ et d'agents polluants.

Beaucoup d'efforts sont entrepris depuis des années mais une autre question se pose aujourd'hui : ne faudrait-il pas trouver des alternatives aux plastiques conventionnels ? N'est-il pas possible de fabriquer des matériaux qui, s'ils échouent dans la nature, ne la polluent pas ? Des plastiques qui ne nécessitent pas que nous utilisions des hydrocarbures pour les fabriquer ? Des plastiques qui permettraient aussi d'utiliser du CO₂ pour les fabriquer ? Est-ce réalisable ? Est-ce rentable ? Est-ce souhaitable ? C'est l'objet de cette étude.

Dans le premier chapitre, il est question de la **gestion des déchets en plastique**. On y constate, sans grande surprise, que celle-ci laisse encore largement à désirer aussi bien dans le monde qu'en Europe et qu'en Belgique. On détaille les avantages et inconvénients de la mise en décharge, de l'incinération et du recyclage.

Dans le second chapitre, l'auteur détaille les différentes familles de plastiques et calcule le coût de production du polytéréphtalate d'éthylène (le PET), ce fameux plastique à partir duquel on fait nos bouteilles. Il explique en quoi, **malgré un coût de production relativement faible, les plastiques traditionnels, présentent des inconvénients**, principalement au niveau environnemental.

Dans le troisième chapitre, on examine enfin les alternatives. Il existe du **plastique biosourcé, du plastique biodégradable et du plastique qui est les deux à la fois**. L'étude examine le procédé de fabrication de l'acide polylactique et estime chaque fois le coût en fonction de divers paramètres (matière première, énergie, surface agricole nécessaire à la biomasse, etc.), ce qui permet d'établir des comparaisons économiques entre la fabrication du polytéréphtalate d'éthylène et de l'acide polylactique.

⁸ Agoria, *The Belgian plastics industry and the circular economy. How far have we come ?*, Essencia, 2019

⁹ D. K. Benjamin, *Eight Great myths of recycling*, PERC Policy Series, September 2003, pp.10-11

¹⁰ Ph. Dubois, *Océans de plastique : la menace invisible !*, Académie Royale de Belgique, 31 janvier 2019, 36'04" <https://lacademie.tv/conferences/seance-d-ouverture-du-college-belgique-2019-a-charleroi>

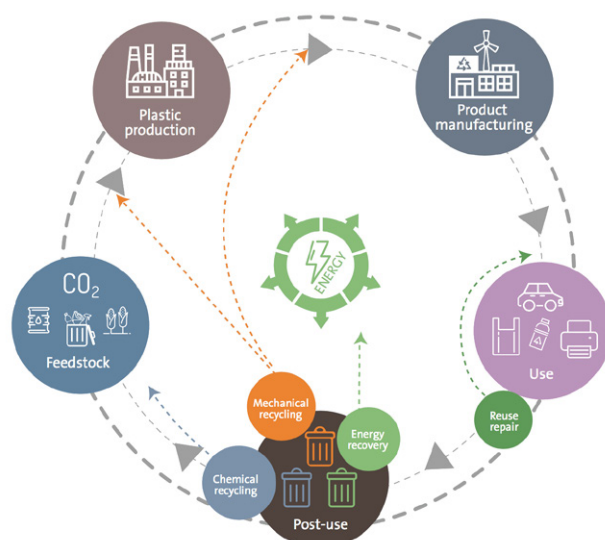
Le même exercice est répété dans le chapitre quatre mais avec, cette fois, deux plastiques, **les polycarbonates et le polyuréthane** fabriqués à partir de CO₂ capturé.

Des conclusions récapitulent les enseignements principaux de cette étude et listent un certain nombre de **recommandations**.



I. COMMENT SONT GÉRÉS LES DÉCHETS EN PLASTIQUE ?

Dans un monde où 350 millions de tonnes de plastiques sont produits chaque année (PlasticsEurope, 2018), la question de la gestion des déchets est une problématique de premier plan. Il n'existe pas des dizaines de manières de gérer un déchet : celui-ci est soit recyclé, soit revalorisé énergiquement, soit entreposé dans des décharges (FieldActionsSciencesReports, 2019).



Différents traitements possibles pour les déchets en fin de vie (FieldActionsSciencesReports, 2019).

A l'heure actuelle, la situation en Europe est encore problématique, avec encore 24,9% de mise en décharge des déchets plastiques.

Mais la situation dans le monde est encore plus catastrophique : on frôle les 80% de mise en décharge (National Geographic, 2019).

RECYCLAGE

Le **recyclage** peut se définir comme étant la réintroduction d'un matériau utilisé dans le cycle de production d'un nouveau produit.

QUI RECYCLE SON PLASTIQUE ?

Les pays développés ayant mis en place des systèmes de régulation pour encourager le recyclage (Europe, Japon) peuvent atteindre jusqu'à 30% de recyclage. Le prix du recyclage est soutenu par le producteur de plastique, sous forme de taxes d'incinération/de décharge, ou par le consommateur, sous forme de taxes vertes. Les pays développés n'ayant pas mis sur pied un tel système (Amérique du Nord, Australie) atteignent moins de 10% de recyclage : l'absence de régulation empêche le recyclage d'être compétitif et le rend donc non-rentable. Ensuite, dans les pays en voie de développement industrialisés (Brésil, Chine, Inde), il n'y a pas encore d'infrastructures adéquates à la gestion des déchets. Ils sont donc encore jetés dans des endroits non-officiels, non-légaux. Cependant, une économie informelle se développe autour de ces décharges en fonction des besoins de l'industrie, et le taux de recyclage peut tout de même atteindre 20%. Finalement, dans les pays en voie de développement non-industrialisés, il n'y a ni infrastructures, ni réseaux informels de gestion des déchets car ils n'ont simplement aucune valeur. Ils terminent bien souvent leur vie dans les océans (FieldActionsSciencesReports, 2019).

OÙ SONT RECYCLÉS LES PLASTIQUES ?

En général, les plastiques sont recyclés localement, c'est-à-dire là où ils sont collectés. Néanmoins, au cours de 30 dernières années, un marché de l'exportation des déchets plastiques à destination du recyclage vers la Chine a fait surface. Il représente 85% des déchets d'Europe. La Chine profite des bateaux-cargo, bien souvent vides après avoir déchargé les marchandises exportées de la Chine vers l'Europe, qui sont alors remplis des déchets plastiques européens pour être recyclés et réutilisés en Chine.

Mais cette pratique appartient au passé car la Chine vient de fermer ses portes aux déchets étrangers dans le but de favoriser le recyclage interne ; l'Europe va donc devoir recycler elle-même ses déchets (FieldActionsSciencesReports, 2019 ; FuturaPlanète, 2018).

COMMENT SONT RECYCLÉS LES PLASTIQUES ?

Il existe deux types de recyclages du plastique : le recyclage mécanique et le recyclage chimique.

- Le **recyclage mécanique** consiste à récupérer des plastiques usagés et à les transformer en matières premières secondaires / en produits sans pour autant changer la structure chimique de la matière (fonte et remodelage des thermoplastiques par exemple).
- Le **recyclage chimique**, quant à lui, consiste à convertir des plastiques usagés en molécules chimiques qui vont pouvoir servir de réactif dans de nouvelles réactions, la structure chimique fondamentale étant donc modifiée (PlasticsEurope, 2019).

Contrairement à la croyance populaire, le recyclage du plastique n'est pas si facile. Le plastique, par définition, est une molécule grosse, complexe et partiellement amorphe. Il peut donc s'avérer compliqué de la "détricoter" une fois qu'elle a été synthétisée (recyclage chimique) ou de la réutiliser tout en maintenant les standards de qualité (recyclage mécanique). Le polytéréphtalate d'éthylène (PET) est le plastique pour lequel la technique de recyclage est la plus avancée, mais c'est loin d'être le cas pour la plupart des autres plastiques (FuturaPlanète, 2018 ; TheConversation, 2018).

Les plastiques (à part le PET) ne peuvent en outre pas être recyclés à l'infini, contrairement au verre et au métal : à chaque nouvelle utilisation, ils se chargent en nouveaux additifs et finissent par être complètement impropres à la fabrication de nouveaux plastiques. Donc en réalité, il n'existe pas de cycle fermé / d'économie circulaire pour le plastique. On doit plutôt parler d'un cycle ouvert parce qu'après quelques recyclages, le plastique est définitivement irrecyclable (TheConversation, 2018).

Tenant compte du nombre limité de plastiques recyclables, du nombre limité de cycles de recyclage, des nombreuses pertes de plastiques au cours des cycles, on comprend vite que le recyclage n'est pas une solution durable à nos problèmes : moins de 2% des déchets plastiques font réellement partie d'un cycle fermé. Le recyclage, c'est un mirage dangereux.

Alors pourquoi miser autant sur le recyclage ? Parce que même s'il ne résout pas intégralement les problèmes de pollution ni ceux de déchets solides, il contribue à ralentir le problème en empêchant la production de nouveaux plastiques, c'est-à-dire de nouvelles émissions CO₂ et de nouveaux déchets solides potentiels. Il ne reste donc qu'à recycler un maximum avant de trouver une solution plus durable (TheConversation, 2018). Ce sera peut-être le retour à la consigne de verre, ou alors l'utilisation de plastiques biosourcés ou CO₂-sourcés qui ont l'avantage de pouvoir être brûlés tout en maintenant un bilan carbone nul.

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DU RECYCLAGE

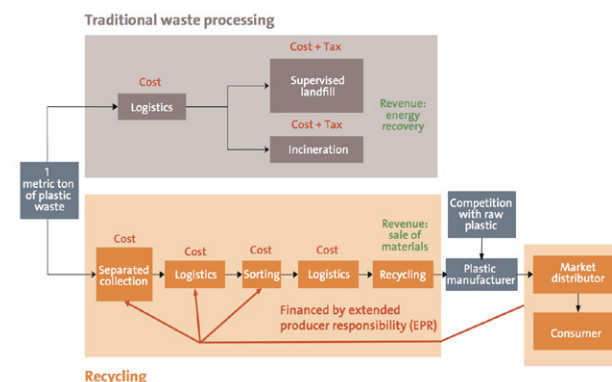
Le recyclage du plastique s'opère en différentes étapes : la collecte à différents points, le triage et le recyclage lui-même :

- le **recyclage est intéressant au niveau environnemental** car il empêche l'émission de CO₂ qui serait indéniablement émis lors de la synthèse de plastique vierge à base d'hydrocarbures ;
- en outre, le **recyclage est intéressant au niveau social** : il permettrait de créer des emplois (plus que l'incinération ou la mise en décharges pour des quantités équivalentes) et ceux-ci pourraient être locaux (alors que l'incinération et la mise en décharge riment en général avec exportations) ;
- le **recyclage est malheureusement moins intéressant au niveau économique** : il est plus cher que la production de plastique vierge car c'est un procédé logistique beaucoup plus difficile à mettre en oeuvre et un procédé mécanique/chimique plus complexe. Il nécessite, pour fonctionner, la mise en place d'incitants économiques pour le rendre compétitif, à savoir des subsides.

Finalement, le plastique recyclé présente quelques réels inconvénients au niveau technique :

- il **ne peut pas être fabriqué à partir de plastiques au design trop complexe** (multi-couches...),
- il a souvent une **odeur et une couleur**,
- **certains plastiques théoriquement recyclables ne le sont jamais en pratique** car on en récupère pas de manière assez régulière, le procédé n'est pas toujours efficace, etc.

Il y a donc encore beaucoup d'innovations à faire dans le domaine (FieldActionsSciencesReports, 2019).



Étapes du recyclage et considérations financières (FieldActionsSciencesReports, 2019).

QU'EST-CE QUI ARRIVE ENSUITE AU PLASTIQUE RECYCLÉ ?

Le plastique recyclé peut être utilisé pour la plupart des applications, à l'exception du domaine de l'alimentation qui demande une traçabilité du plastique qui est incompatible avec le recyclage et à l'exception de domaines très techniques où la qualité des plastiques recyclés est parfois insuffisantes pour satisfaire la demande. Actuellement, le plastique représente 10% de la demande dans le monde. Il est important d'augmenter ce chiffre, tout en restant conscient qu'une substitution de 100% semble peu probable au vu des remarques faites ci-dessus (FieldActionsSciencesReports, 2019).

VALORISATION ÉNERGÉTIQUE

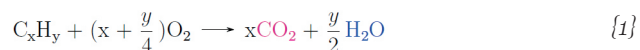
Pour introduire cette section, définissons immédiatement deux termes subtilement différents : l'incinération et la valorisation énergétique.

L'**incinération** consiste en la combustion des déchets dans le but de réduire drastiquement les volumes.

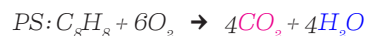
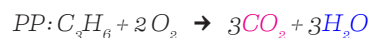
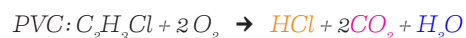
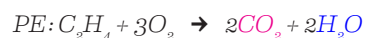
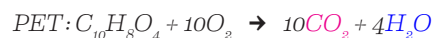
La **valorisation énergétique** est l'opération consistant à récupérer l'énergie dégagée lors de cette incinération.

COMMENT SONT INCINÉRÉS LES PLASTIQUES ?

Il s'agit d'une réaction de combustion, dont la formule générique est :



Pour rappel, pour qu'une réaction de combustion ait lieu, il faut rassembler 3 éléments indispensables : un combustible (du plastique ici), un comburant (de l'oxygène en général), un déclencheur (une étincelle).



OÙ SONT INCINÉRÉS LES PLASTIQUES ?

L'incinération de plastiques ne produit théoriquement que du $CO_{2(g)}$ et du $H_{2O_{(g)}}$ -à l'exception du PVC qui produit aussi du HCl- (voir réactions ci-dessus). **En théorie toujours, cela signifie que les plastiques pourraient être brûlés par tout individu chez lui, vu que ces deux gaz sont des composants naturels de l'air et qu'il n'est donc pas dangereux/polluant de les rejeter dans l'atmosphère**¹¹. Mieux, le fait de les brûler chez soi serait même écologique car on économiserait le CO_2 nécessaire à leur transport jusqu'à des usines d'incinération.

Malheureusement, **en pratique, c'est un peu plus compliqué : la combustion est rarement parfaite et complète, et il y a souvent formation de composés indésirables dans les fumées de combustion**. On retrouve du carbone graphite (suie), des cycles hydrocarbonés aromatiques (molécules composant les polymères -tq les PET, PS, PC, PU- n'ayant pas brûlé complètement), des oxydes d'azote (formé par réaction du N_2 et du O_2 contenu dans l'air lorsqu'il est chauffé par une combustion), du HCl (combustion du PVC), des dioxines (combustion incomplète des molécules organiques), des métaux lourds.

La plupart de ces composés sont soit toxiques pour l'environnement, soit toxiques pour l'homme, soit les deux. Il est évident que rejeter ces molécules dans l'atmosphère n'est pas idéal ; c'est donc là que les usines d'incinération prennent leur importance. Ces usines possèdent des cheminées équipées de différents filtres, capables de retirer la plupart des molécules nocives des fumées avant que celles-ci soient rejetées dans l'atmosphère (Macqueron, 2017).

AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA VALORISATION ÉNERGÉTIQUE

L'avantage de la valorisation énergétique le plus évident est qu'on récupère de l'énergie qui peut être utilisée à d'autres fins. Un gros point négatif de l'incinération est qu'elle produit souvent des sous-produits toxiques issus de réactions parasites, mais cet inconvénient peut être facilement contrebalancé : il suffit d'incinérer les déchets dans des usines prévues à cet effet et équipées des filtres nécessaires. Finalement, l'incinération est à la fois un avantage et un désavantage au niveau de la gestion du déchet solide : c'est mieux qu'une mise en décharge qui pollue beaucoup plus et ravage les paysages, mais moins intéressant qu'un recyclage qui permet de produire des nouveaux matériaux sans devoir extraire de nouvelles matières premières. En effet, rappelons-le, les hydrocarbures sont rares ; les transformer en plastique pour ensuite les brûler est quelque peu absurde quand on y pense.

MISE EN DÉCHARGE

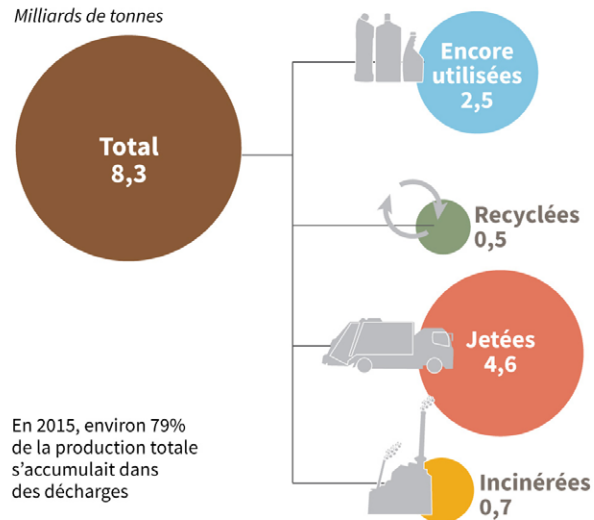
Depuis l'avènement du plastique en 1950, 9 milliards de tonnes de plastiques ont été produits, dont moins de 20% ont été recyclés ou incinérés comme on peut le voir à la figure suivante (FuturaPlanète, 2018). Ce qui signifie donc que 80% d'entre eux gisent dans des décharges ou pire, dans les océans.

¹¹ Notons bien que le rejet de CO_2 est bien polluant au niveau effet de serre, mais nous n'en tenons pas compte ici vu que le fait de rejeter ce CO_2 lors de la combustion en incinérant des plastiques chez soi ou dans une usine à incinération revient au même.

La planète plastique

Environ 8,3 milliards de tonnes produites depuis les années 50

Milliards de tonnes



Source : Sciencemag.org/Geyer, Jambeck, Law

© AFP

Gestion des plastiques depuis leur avènement (FuturaPlanète, 2018).

QUI MET LES PLASTIQUES EN DÉCHARGE ?

Actuellement, 24,9% des plastiques sont mis en décharge en Europe contre 80% au total dans le monde.

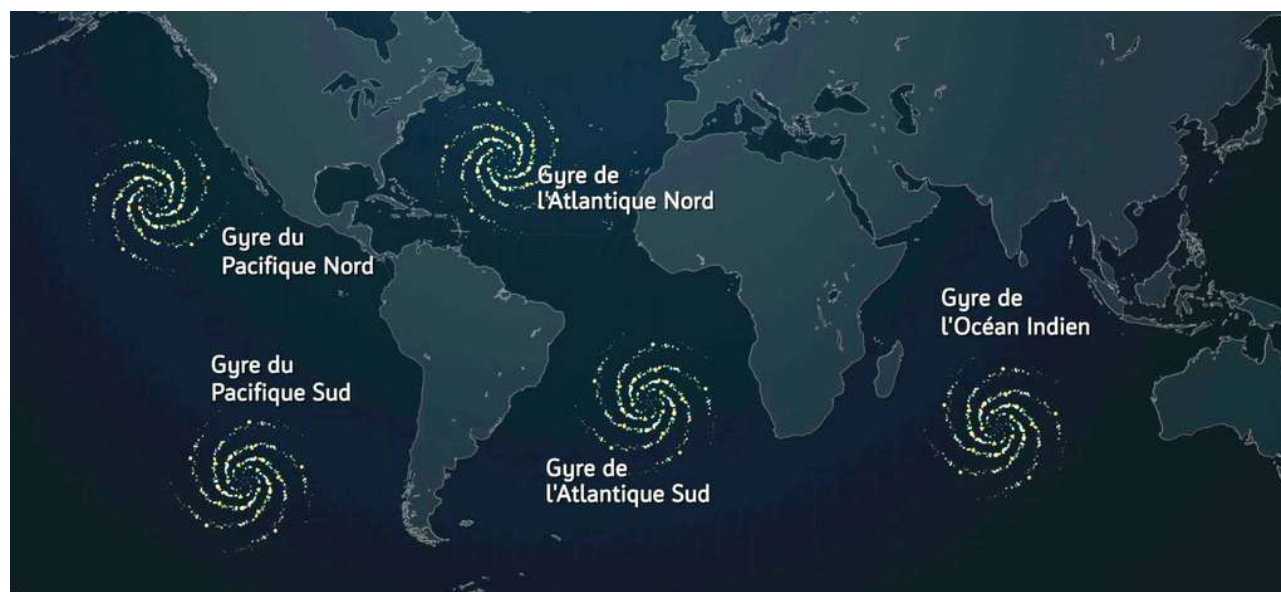
OÙ LES PLASTIQUES SONT-ILS MIS EN DÉCHARGE ?

Une décharge est un lieu dans lequel on stocke des déchets par dépôt généralement sur le sol. Dans le monde, on retrouve des décharges partout où il y a des humains, les plus importantes d'entre elles étant situées en Asie (Inde, Chine, Japon, Corée du Sud), aux Etats-Unis (Californie, Nevada), en Amérique du Sud (Mexique). Elles mesurent de 1 à 10 kilomètres carrés chacune (Worldatlas, 2019).

QU'EST-CE QUI ARRIVE AUX PLASTIQUES MIS EN DÉCHARGE ?

Lorsqu'un plastique est mis en décharge dans la nature, il pollue. Il se dégrade lentement, certes, mais il se dégrade : il se fragmente sous l'action mécanique de l'érosion et du rayonnement solaire et est décomposé sous l'action chimique enzymatique (ExpéditionSeptièmeContinent, 2014). Après 100 ou 200 ans, il est complètement fractionné en nanoparticules qui ont la faculté de franchir toutes les barrières tissulaires et donc d'accéder à nos organes. On connaît mal les conséquences sur la santé des nanoparticules de plastiques, mais on sait qu'elles ont tendance à se lier à des polluants organiques toxiques (TheConversation, 2018). En outre, lorsqu'il se fractionne, le plastique libère les molécules parfois toxiques qu'il contient (Thakur et al., 2018). En plus de polluer les sols sur lesquels ils se trouvent, les plastiques mis en décharge ont la fâcheuse tendance à finir leur course dans les cours d'eau qui se jettent ensuite dans les mers. Des littoraux,

ils sont rapidement entraînés par les mouvements d'eau, qui dépendent des circulations océaniques et atmosphériques, vers les océans. Ces courants emmènent les plastiques jusqu'à des zones calmes, les gyres, où ils s'accumulent, formant le tristement célèbre 7^{ème} continent. À noter qu'il n'existe pas une gyre mais bien cinq gyres principales (Atlantique Nord, Atlantique Sud, Indien, Pacifique Nord, Pacifique Sud), même si on parle toujours à tort d'un septième continent. On estime qu'il y a aujourd'hui 7,025 millions tonnes de plastiques dans l'océan. On distingue les plastiques lourds (PVC) qui coulent dans les fond marins et les plastiques légers (PE) qui restent à la surface. Et contrairement aux idées reçues, le septième continent est majoritairement composé de microplastiques (moins de 5mm de diamètre). Ces plastiques sont bien souvent avalés par les poissons, causant des dommages physiques, des étouffements, et polluant la chaîne alimentaire (ExpéditionSeptièmeContinent, 2014 ; Vallette, 2018 ; Slat, 2012).



Gyres dans les océans de la planète (Vallette, 2018).



The Ocean Cleanup

NETTOYER LES OCÉANS...

En 2012, Boyan Slat, un jeune étudiant hollandais alors âgé de 18 ans, a présenté, lors d'un TEDx Talks, un projet d'auto-nettoyage des océans. Il affirmait pouvoir nettoyer les 7,025 millions de tonnes de déchets présents dans l'océan en 5 ans avec 99,98% d'efficacité. Il proposait une solution originale qui consistait en l'installation au centre du gyre Pacifique Nord d'une barrière de filets en forme de fer de cheval, mouvant au gré des courants océaniques pour capturer tous les plastiques convergeant vers ce septième conti- nent. Solution intéressante car elle ne nécessitait pas le déplacement motorisé de l'infrastructure qui aurait inévitablement consommé beaucoup d'énergie. Le projet se contentait d'utiliser trois forces propres à l'océan : les courants marins, le vent, les vagues. La solution semblait en outre plausible car elle était rentable si le plastique récupéré était recyclé (Slat, 2012). Lancé fin 2018 après des années de recherches, plus de 200 prototypes testés, 20 millions de dollars et un important engouement, le projet montre déjà ses limites : premièrement, la barrière n'avance pas assez vite pour garder les déchets qu'elle collecte, ce qui est un grave défaut technique.

Pour y remédier, son envergure a été agrandie. Ensuite, un morceau de la barrière s'est déjà brisé en raison de l'usure causée par la mer. Finalement, il apparaît que la barrière ne collecte pas une tonne par semaine comme attendu, mais plutôt 2 tonnes par mois soit deux fois moins de déchets (Brut., 2019).

On peut en conclure que cette initiative sympathique est une manière originale de lutter contre le désastre. On aurait tort de la considérer comme dérisoire car c'est la multiplication des projets de ce genre qui permettra, espérons-le de changer les choses.

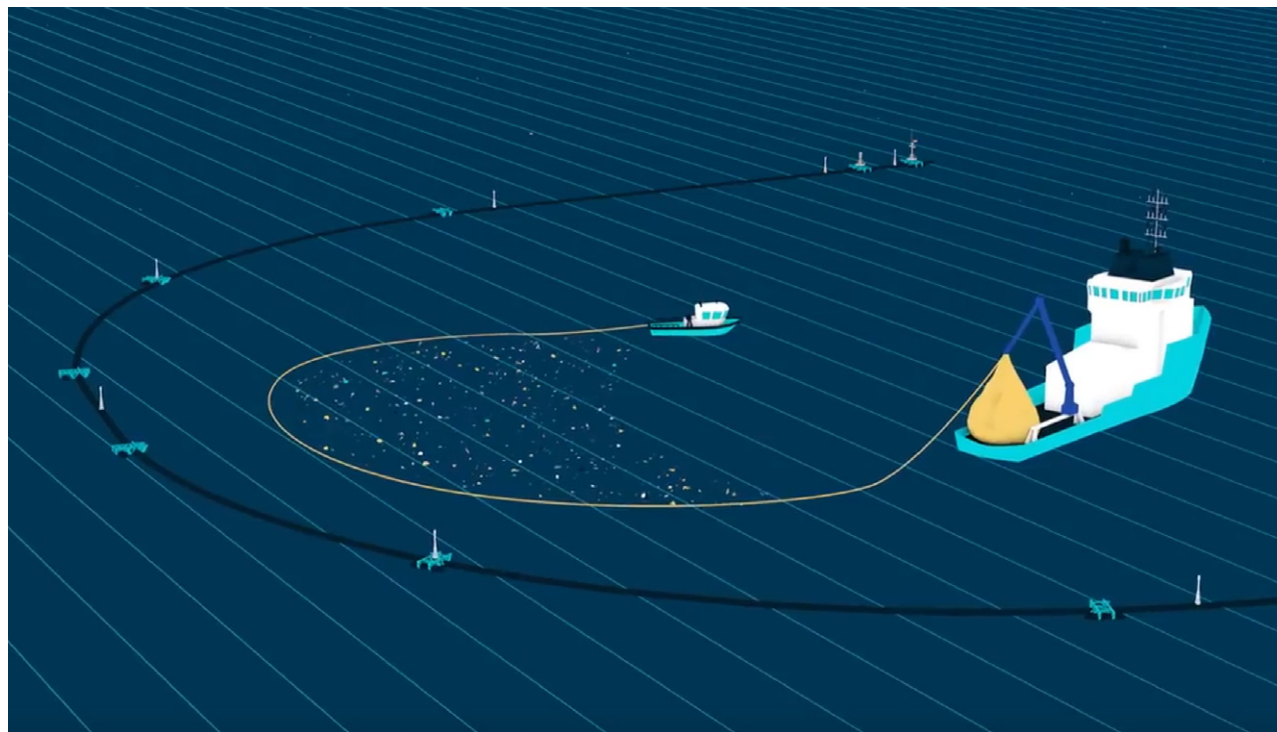


Figure 26 – Projet Clean-Up Oceans (Brut., 2019).

Mais, on se rend bien compte qu'elle est largement insuffisante, d'autant plus qu'elle ne s'attaque qu'aux déchets apparents et non pas à la myriade de micro-plastiques (de l'ordre de quelques microns, invisibles à l'œil nu). De la même façon qu'on ne résout pas un problème de fuite d'eau dans sa cuisine en se ruant sur les flaques avec un serviette, on ne résoudra pas le problème des déchets en plastique sans fermer le robinet. Il importe avant tout d'attaquer le problème à la racine : stopper le déversement des plastiques dans les océans.

II. COMMENT SONT PRODUITS LES PLASTIQUES CONVENTIONNELS ?

LES PLASTIQUES SÛRS

Sigle	Nom	Où le trouve t-on ?
 PEHD	Polyéthylène haute densité	Bouteilles opaques de jus de fruits et de lait, bouchons vissés
 PEBD	Polyéthylène basse densité	Sacs congélation, film alimentaire, barquettes
 PP	Polypropylène	Gourdes de sport, récipients alimentaires réutilisables, pots de yaourt

LES PLASTIQUES PAS SÛRS

Sigle	Risques	Où le trouve t-on ?
 PET	Plusieurs études montrent que ce plastique libère des perturbateurs endocriniens	Bouteilles transparentes d'eau, de jus de fruits, de sodas, barquettes
 PVC	Il relâche des phtalates (perturbateurs endocriniens) lorsqu'il est chauffé ou au contact de corps gras	Rarement utilisé dans l'alimentaire, sauf pour emballer les fromages et les viandes
 PS	Le polystyrène relâche du styrène, suspecté d'être cancérigène.	Barquettes à emporter, barquettes de viande et poisson, gobelets et couverts jetables
 OTHER	Le polycarbonate contient du bisphénol A qui est un perturbateur endocrinien.	Comprend tous les autres plastiques, dont le polycarbonate contenu dans les boîtes de conserves et les récipients micro-ondables

DÉFINITION

Le **plastique** est le nom usuel des polymères. Ceux-ci sont constitués de très grosses molécules formées d'entités de base -dites les monomères- et reliées entre elles par des liaisons de faible intensité. Traditionnellement, le plastique est obtenu par la transformation d'hydrocarbures. On peut incorporer différents additifs à la synthèse des plastiques afin d'obtenir différentes propriétés intéressantes (FuturaSciences, 2019 ; Mertens, 2019).

Classification des plastiques traditionnels (Yuka, 2017).

LIMITES DES PLASTIQUES TRADITIONNELS

Avantages plastiques conventionnels (Siracusa, Rocculi, Romani, & Dalla Rosa, 2008)

- Economique : bas coût, grande disponibilité.
- Chimique : barrière à l'oxygène/CO₂/anhydrides/composés aromatiques.
- Optique : transparent.
- Physique : légèreté, douceur, résistance à la traction et à la déchirure, soudure thermique, flexibilité.

Inconvénients plastiques conventionnels (Siracusa et al., 2008 ; Thakur et al., 2018)

- Environnement : non-biodégradable, difficile à recycler, empreinte carbone importante, potentiel de réchauffement global élevé, appauvrissement de l'ozone.
- Santé : certains plastiques conventionnels sont toxiques.

Du faible coût à la forte résistance avec légèreté, en passant par l'imperméabilité à l'oxygène, aux microbes et autres molécules toxiques, il est clair que les plastiques présentent des avantages incontestables qui les ont rapidement rendus incontournables. La volonté de trouver une alternative aux plastiques conventionnels est motivée par le fait qu'outre la dépendance aux hydrocarbures inhérente à leur fabrication, ils polluent énormément (Siracusa et al., 2008). Faute de gestion correcte des déchets plastiques, 79% d'entre eux finissent hors de contrôle dans la nature dans le monde (National Geographic, 2019). Là, ils libèrent certaines molécules toxiques qui les composaient dans l'environnement, comme les hydrocarbures polycycliques aromatiques ou les dioxines (Thakur et al., 2018).

L'intérêt de chercher des voies de synthèse alternatives est que cela réduirait notre dépendance aux ressources fossiles. En outre, cela pourrait nous permettre de réduire l'empreinte carbone des plastiques.

SYNTHÈSES INDUSTRIELLES DES PLASTIQUES TRADITIONNELS

SYNTHÈSE DU POLYTÉRÉPHTALATE D'ÉTHYLÈNE (PET) (C₁₀H₈O₄)_n : CONDENSATION

Quel est le prix de production d'une tonne de polytéraphthalate d'éthylène (PET)

Il peut être intéressant de calculer le prix de production du PET afin de pouvoir le comparer par la suite au prix de production d'autres types de plastiques non-conventionnels.

- Hypothèse 1 : Pour calculer le prix de production d'1t de polyol, on va uniquement regarder le coût des matières premières, en négligeant complètement le procédé/les infrastructures/la main-d'œuvre/etc.
- Hypothèse 2 : Ethylène glycol = 726,8€/t (CommoPrices, 2015c)
- Hypothèse 3 : Acide téréphthalique = 696,9€/t (CommoPrices, 2015b)

Ainsi, si on veut produire 1t de PET...

$$\begin{aligned} m_{\text{PET}} &= 1.000 \text{ kg} \\ \text{MMR}_{\text{PET}} &= 192 \text{ g/mol} \\ n_{\text{PET}} &= \frac{m_{\text{PET}}}{\text{MMR}_{\text{PET}}} = \frac{1.000.000}{192} = 5.208,3 \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{\text{EthGly}} &= 5.208,3 \text{ mol} \\ \text{MMR}_{\text{EthGly}} &= 2 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 2 \cdot 16 = 62 \text{ g/mol} \\ m_{\text{EthGly}} &= n_{\text{EthGly}} \cdot \text{MMR}_{\text{EthGly}} = 5208,3 \cdot 62 = 322,9 \text{ kg} \\ \text{Prix}_{\text{EthGly}} &= 0,3229 \cdot 726,8 = 234,7 \text{ €} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{\text{AcTer}} &= 5.208,3 \text{ mol} \\ \text{MMR}_{\text{AcTer}} &= 8 \cdot 12 + 6 \cdot 1 + 4 \cdot 16 = 166 \text{ g/mol} \\ m_{\text{AcTer}} &= n_{\text{AcTer}} \cdot \text{MMR}_{\text{AcTer}} = 5208,3 \cdot 166 = 864,6 \text{ kg} \\ \text{Prix}_{\text{AcTer}} &= 0,8646 \cdot 629,9 = 544,6 \text{ €} \end{aligned}$$

Le calcul permet de montrer que le **polytéraphthalate d'éthylène (PET)** revient à **779,3 €/t**, lorsqu'on tient juste compte du coût des matières premières. En réalité, le PET coûte **962,6€/t** (CommoPrices, 2015d). Les deux chiffres sont raisonnablement proches, on a donc fait un travail relativement correct. On peut sans doute expliquer la différence entre ces deux chiffres par le coût du procédé, des ouvriers, des infrastructures, des transports, etc dont on n'a pas tenu compte ici.



III. L'ALTERNATIVE DES « BIOPLASTIQUES »

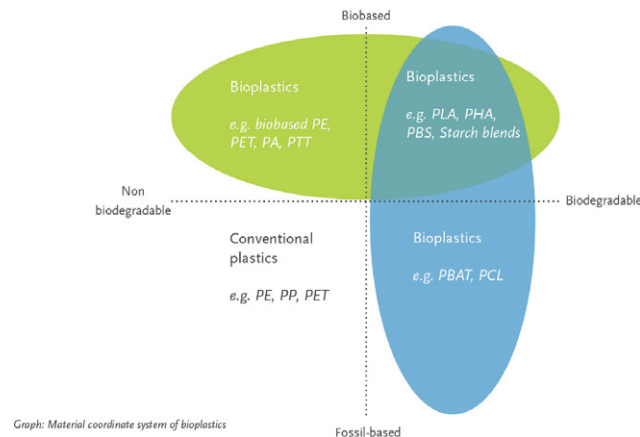
DÉFINITIONS

Un **bioplastique** peut être défini comme étant un plastique *bio-sourcé* ou *biodégradable*, ou présentant les deux caractéristiques.

- Par **bio-sourcé**, on entend que la matière première à la base du plastique est de la biomasse. Les plastiques bio-sourcés peuvent être utilisés pour les mêmes applications que les plastiques traditionnels, dans la mesure où la molécule formée est identique.
- Le terme **biodégradable** signifie quant à lui que le plastique peut, sous l'action de micro-organismes présents dans l'environnement (bactéries, champignons, algues) et sous certaines conditions favorables (pression, température, humidité, oxygène -aérobie/anaérobie-, lumière), être converti par une réaction chimique en eau, dioxyde de carbone et compost, en une durée courte au regard du temps humain. Les plastiques biodégradables ont pour vocation d'être utilisés en lieu et place des plastiques qui présentent un haut risque de se retrouver dans la nature, comme les sachets plastiques.

Notons le fait qu'être bio-sourcé (ou non) n'est pas incompatible avec le fait d'être biodégradable (ou non). En effet, les propriétés de biodégradation dépendent de la structure chimique et non pas de la matière plastique (EuropeanBioplastics, 2016 ; Mayer, 2001 ; FuturaPlanète, 2018).

Cette figure reprend ainsi quelques plastiques connus et les classifie en plastiques conventionnels versus bioplastiques, selon les définitions qui viennent d'être données.



Graph: Material coordinate system of bioplastics

Classification des bioplastiques (EuropeanBioplastics, 2016).

Il est important de noter quelques subtilités de langage supplémentaires :

- Un **plastique compostable** est un plastique biodégradable qui doit en outre répondre à des normes strictes de composition, désintégration, biodégradabilité, qualité du compost final et écotoxicité (EuropeanBioplastics, 2016 ; NaturPlast, 2019).
- Un **plastique recyclable** peut, en fin de vie, être réintroduit dans un cycle de production d'un produit. Le recyclage est donc une autre propriété indépendante de la source du plastique (Mayer, 2001).

VERS UNE SYNTHÈSE DE BIOPLASTIQUES

Avantages des bioplastiques (Gironi & Piemonte, 2011 ; EuropeanBioplastics, 2016) :

- Economique/politique : réduction de la dépendance aux ressources fossiles (plastiques bio-sourcés).
- Environnement : réduction de l'empreinte carbone, se dégrade sans produire de composants toxiques (plastiques biodégradables).

Inconvénients des bioplastiques (Siracusa et al., 2008) :

- Economique : plus cher.
- Existence d'un conflit d'intérêt : utilisation de terrains agricoles qui pourraient autrement être alloués à l'agriculture ou l'élevage (plastiques bio-sourcés).
- Chimique : perméabilité élevée à l'oxygène et à la vapeur d'eau -donc sensible au contenant en humidité.
- Physique : friabilité, instabilité thermique, soudures difficiles, faible résistance à la fusion.

Les avantages liés aux bioplastiques sont évidents en matière d'environnement et de politique d'indépendance, il est néanmoins impossible de remplacer totalement les plastiques conventionnels par des bioplastiques. En effet, les plastiques conventionnels sont non seulement constitués de polymères mais aussi d'additifs (stabilisateurs, colorants, retardateurs de flamme, etc). Les compositions changent en fonction de l'utilisation du plastique. Pour cette raison, on ne pourra pas atteindre 100% de bioplastiques mais plutôt des fractions. À noter que si on découvre des alternatives renouvelables aux additifs, on pourra alors approcher les 100% de bioplastiques (Siracusa et al., 2008). Outre cette limitation de composition, les bioplastiques présentent aussi simplement des limites quant aux propriétés qu'ils possèdent : le fait d'être perméable à l'oxygène et l'eau peut s'avérer problématique pour l'emballage de produits non-déshydratés, le taux de dégradation le rend simplement inapte pour de nombreuses applications, et du fait de sa fragilité il peut être inadapté à certains emballages. Les bioplastiques présentent néanmoins un grand potentiel, en particulier dans le domaine de l'emballage et médical (Cheng, Deng, Chen, & Ruan, 2009).

SYNTHÈSES DES BIOPLASTIQUES

SYNTHÈSE DE PLA OU « ACIDE POLYLACTIQUE » $(C_3H_4O_2)_n$

Polycondensation du PLA

La première réaction de synthèse d'Acide Polylactique (PLA) consiste en une condensation, de l'acide lactique $(C_3H_4O_2)$ en présence d'un catalyseur. Cette méthode, la plus ancienne, a l'avantage de présenter moins d'étapes de fabrication, un coût moins élevé et est plus facile à manipuler et à commercialiser ; mais le produit résultant a une faible masse moléculaire (Arbellini, Jean-Louis, & Kerowgodage, 2017 ; Lagrange, Faye, Adnet, & Cantalice, 2017 ; Cheng et al., 2009).

Addition du PLA

La seconde réaction permettant de synthétiser le PLA est une polymérisation par ouverture de chaîne. Lors de cette réaction,

l'étape principale est l'ouverture de lactides pour former du PLA. Cette méthode largement répandue industriellement permet de produire des molécules de haute masse molaire. Elle est cependant contraignante : réactifs très purs, conditions de réaction sévères, contamination aux métaux lourds (donc inaptes à l'emballage alimentaire), etc (Arbellini et al., 2017 ; Lagrange et al., 2017 ; Cheng et al., 2009).

Quel est le prix de production d'une tonne d'Acide Polylactique (PLA) ?

Calculons le prix de production de l'Acide Polylactique (PLA) pour le comparer au prix de production du Polyéthylène Téréphtalate (PET) calculé plus haut.

Hypothèse 1 : Pour calculer le prix de production d'1t de polyol, on va uniquement regarder le coût des matières premières, en négligeant complètement le procédé/les infrastructures/la main-d'œuvre/etc.

Hypothèse 2 : acide lactique = 1218,1€/t (CommoPrices, 2015a)

Ainsi, si on veut produire 1t de PLA...

$$\begin{aligned} m_{PLA} &= 1.000\text{kg} \\ MMR_{PLA} &= 72\text{g/mol} \\ n_{PLA} &= \frac{m_{PET}}{MMR_{PET}} = \frac{1.000.000}{72} = 13.888,9\text{mol} \\ n_{AcLac} &= 13.888,9\text{mol} \\ MMR_{AcLac} &= 72\text{g/mol} \\ m_{AcLac} &= 1.000\text{kg} \\ \text{Prix}_{AcLac} &= 1 \cdot 1218,1 = 1.218,1\text{€} \end{aligned}$$

On en déduit donc que le PLA revient à 1.218,1 €/t. Le chiffre trouvé est plus de deux fois plus bas que la réalité, à savoir 2840 €/t (CommoPrices, 2015e). La différence est assez importante, cela signifie sans doute des coûts de procédé élevés.

On notera aussi que ce prix est près de 4 fois plus élevé que celui de la production de plastique conventionnel.

Quelle est la surface agricole nécessaire à la production d'une tonne d'Acide Polylactique (PLA) ?

La production de plastiques bio-sourcés nécessite des végétaux comme matière première. Cela signifie donc qu'une proportion des territoires agricoles doit être allouée à l'agriculture de végétaux à la destination du plastique. Calculons la surface nécessaire à la production d'une certaine quantité de PLA, fabriqué à partir de l'amidon du maïs (voir Figure 14).

Hypothèse 1 : On considère que le maïs est constitué à 65% d'amidon (König, 2017).

On regarde maintenant quelle quantité de maïs est nécessaire pour obtenir 1t de PLA.

► La formule brute de l'amidon est $(C_6H_{10}O_5)_n$, celle du PLA est $(C_3H_4O_2)_n$. La réaction transformant l'amidon en PLA est divisée en différentes étapes, tel que d'un point de vue stoechiométrique, une molécule d'amidon donne une molécule de PLA (voir FIGURE 14). Sachant qu'on cherche 1.000kg de PLA...

$$\begin{aligned} m_{PLA} &= 1.000\text{kg} \\ MMR_{PLA} &= 72\text{g/mol} \\ n_{PLA} &= \frac{m_{PET}}{MMR_{PET}} = \frac{1.000.000}{72} = 13.888,9\text{mol} \\ n_{Amidon} &= 13.888,9\text{mol} \\ MMR_{Amidon} &= 162\text{g/mol} \\ m_{Amidon} &= n_{Amidon} \cdot MMR_{Amidon} = 13.888,9 \cdot 162 = 2.250\text{kg d'amidon sont nécessaires} \end{aligned}$$

► Sachant que le maïs contient 65% d'amidon, il est donc nécessaire de récolter $m_{maïs} = \frac{m_{amidon}}{0,65} \approx 3.500\text{ kg de maïs}$

Hypothèse 2 : on considère qu'on récolte en moyenne 90 quintaux/ha = 9.000kg/10.000m² (Arvalis, 2015).

► Pour produire 3.500kg de maïs, il faut donc $\frac{3.500}{9.000} \cdot 10.000 \approx 3.900\text{m}^2$
Pour mieux appréhender le nombre, une comparaison...

— Pour produire les 335 millions de tonnes de plastiques annuels, il faudrait alors $335.000.000 \cdot \frac{3.500}{9.000} \cdot 10.000 \approx 1.300\text{milliards de m}^2 = 1.300.000\text{km}^2$. Ceci représente 2x la surface de la France.



DURABILITÉ DES PLASTIQUES COMPARÉE À CELLE DES BIOPLASTIQUES

Pour évaluer l'impact écologique d'un matériau quel qu'il soit, la méthode la plus en vue actuellement est l'analyse du cycle de vie (Thakur et al., 2018).

PLASTIQUES COMPARÉS AUX BIOPLASTIQUES DE TYPE BIOSOURCÉS ET BIODÉGRADABLES

Dans cette sous-section, nous allons comparer l'empreinte carbone d'un plastique et d'un bioplastique. Pour ce faire, nous allons suivre la méthode appliquée par des chercheurs de l'université de Cambridge, en simplifié. En bref, ils ont suivi le cycle de vie d'un plastique conventionnel et d'un bioplastique en s'intéressant, à chaque étape, à la quantité de dioxyde de carbone émise (Narayan, 2011).

Nous allons évaluer l'empreinte écologique d'un bioplastique type bio-sourcé et biodégradable (voir figure 9), à savoir l'acide polylactique [PLA], ainsi que celle d'un plastique conventionnel, le Polyéthylène Téréphtalate [PET], afin de comparer les deux type de plastiques.

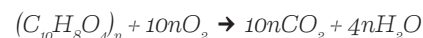
MATIÈRES PREMIÈRES

L'empreinte carbone de la matière première des plastiques bio-sourcés est égale à zéro. Il s'agit d'un zéro intrinsèque car les atomes de carbone contenus dans les ressources renouvelables font partie du cycle biologique du carbone : les atomes de C ont été absorbés par les plantes lors de la photosynthèse et seront rejetés du bioplastique sous forme de CO₂ gazeux à la fin de sa vie, lorsque celui-ci se biodégradera (Arbellini et al., 2017 ; Narayan, 2011 ; Weng et al., 2013).

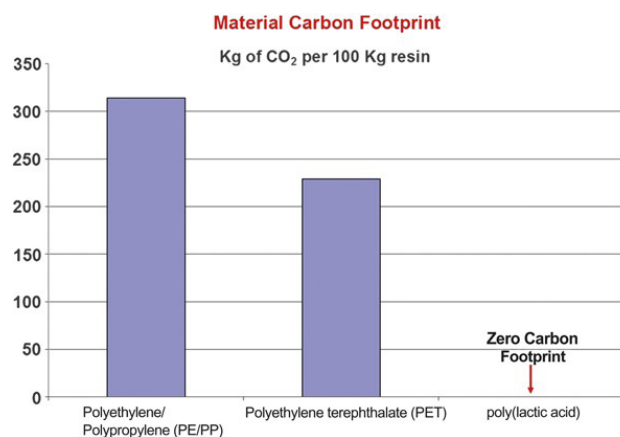
$$m_{CO_2, PAL, matière} = 0 \text{ kg}_{CO_2} / 100 \text{ kg}_{PAL}$$

En comparaison, l'empreinte carbone de la matière première des plastiques conventionnels est égale à quelques centaines

de kilos de CO₂ par 100 kilos de plastique produits. On trouve ces chiffres en considérant la quantité de CO₂ rejetée lors de la combustion d'une certaine quantité de plastique (Narayan, 2011). Le raisonnement ci-dessous retrace le calcul de l'empreinte carbone de la matière première du PET par exemple.



$$\begin{aligned} m_{PET} &= 100 \text{ kg} \\ MMR_{PET} &= 10 \cdot 12 + 8 + 4 \cdot 16 = 192 \text{ g/mol} \\ n_{PET} &= \frac{m}{MMR} = \frac{100000}{192} = 520,83 \text{ mol} \\ n_{CO_2} &= 10 \cdot n_{PET} = 5208,3 \text{ mol} \\ MMR_{CO_2} &= 12 + 2 \cdot 16 = 44 \text{ g/mol} \\ m_{CO_2, PET, matière} &= n_{CO_2} \cdot MMR_{CO_2} = 229,2 \text{ kg}_{CO_2} / 100 \text{ kg}_{PET} \end{aligned}$$



Empreinte carbone de la matière première (Narayan, 2011).

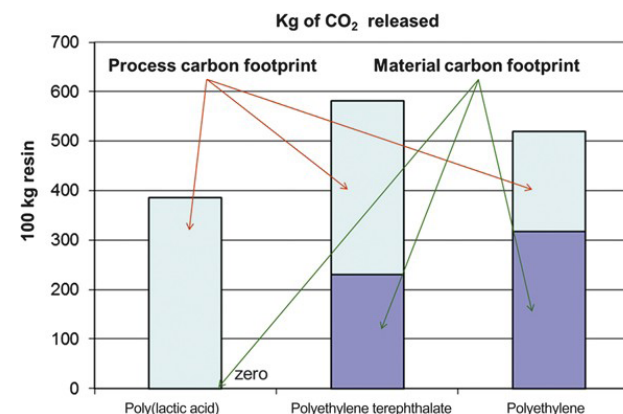
FABRICATION

La fabrication du (bio)plastique, à savoir la conversion du carbone de la matière première en le produit recherché, est la seconde étape du cycle de vie à considérer. Cette étape est réalisée avec une méthodologie et des standards complexes, on ne les détaillera pas ici. Le résultat montre ainsi que la production de bioplastiques est légèrement plus coûteuse que celle de plastiques conventionnels en terme de dioxyde de carbone. Cependant, en regardant le cumul des empreintes carbone de la matière première et du procédé, on voit, sur la figure qui suit, que le bioplastique est toujours plus intéressant.

Notons en outre que les procédés de fabrication des plastiques conventionnels sont déjà au point -peu d'améliorations peuvent être faites- alors que les procédés de fabrication des bioplastiques sont en plein essor -beaucoup de progrès à venir- (Narayan, 2011).

$$m_{CO_2, PAL, procédé} = 385 \text{ kg}_{CO_2} / 100 \text{ kg}_{PAL}$$

$$m_{CO_2, PET, procédé} = 300 \text{ kg}_{CO_2} / 100 \text{ kg}_{PET}$$



Empreinte carbone cumulée de la matière première et du procédé de fabrication (Narayan, 2011).

FIN DE VIE

Comme expliqué dans la partie 'matières premières', on peut considérer que le bioplastique a une empreinte carbone zéro entre l'absorption de carbone des végétaux formant la matière première et le rejet de carbone lors de la biodégradation. Dans cette partie, nous avons également déjà développé le calcul correspondant à la quantité de carbone rejetée dans l'air lors de l'incinération d'un plastique conventionnel, sachant que cet échantillon de carbone ne fait pas partie d'un cycle et qu'on considère donc qu'elle est ajoutée en plus à l'atmosphère.

Quelle quantité de CO₂ est absorbée par le maïs qui sert de matière première à 100kg de bioplastiques ?

Considérons les hypothèses suivantes pour résoudre ce problème...

Hypothèse 1: On considère que tous les végétaux absorbent avec la même efficacité le CO₂, de manière relative à la masse.

Hypothèse 2: On considère qu'un arbre moyen pèse 700kg pour 8m de haut et 15ans d'âge, que les racines pèsent 20% de la masse totale, que 65% de cette masse totale est sèche et que 50% de la masse sèche est du carbone (Fournier, 2017).

On cherche la quantité de CO₂ absorbée par kilo de végétal. Nous ne disposons pas de données sur le maïs précisément, mais nous en avons sur les arbres.

- Sachant que les racines pèsent 20% de la masse totale : $m_{racines} = m_{total} - m_{arbre} = 0,2 \cdot m_{total} \leftrightarrow m_{total} = \frac{700}{0,8} = 875kg$ et $m_{racines} = 0,2 \cdot m_{total} = 175kg$
- Sachant que 65% de cette masse est sèche et que 50% de la masse sèche est du carbone : $m_{carbone} = 0,65 \cdot 0,5 \cdot 875 \approx 284kg$
- Sachant que dans le CO₂, $MMR_C = 12$ et $MMR_O = 16$, la masse de carbone représente $\frac{3}{7}$ de la masse totale $\leftrightarrow m_{CO_2} = \frac{284}{\frac{3}{7}} \approx 660kg$
- Ce carbone a été accumulé pendant toute sa vie, soit : $\frac{660}{15} = 44kg/an$ par arbre de 700kg
- Puis je divise par la masse de l'arbre : $0,057kgCO_2/an \cdot kg_{vegetal}$

Hypothèse 3: On considère que le maïs est constitué à 65% d'amidon (König, 2017). On regarde maintenant quelle quantité de maïs est nécessaire pour obtenir 100kg de PLA.

La formule brute de l'amidon est $(C_6H_{10}O_5)_n$, celle du PLA est $(C_3H_4O_2)_n$. La réaction transformant l'amidon en PLA est constituée de différentes étapes, tel que d'un point de vue stoechiométrique, une molécule d'amidon donne une molécule de PLA

$$\begin{aligned} m_{PLA} &= 100kg \\ MMR_{PLA} &= 72g/mol \\ n_{PLA} &= \frac{m_{PLA}}{MMR_{PLA}} = \frac{100.000}{72} = 1.388,9mol \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} n_{Amidon} &= 1.388,9mol \\ MMR_{Amidon} &= 162g/mol \\ m_{Amidon} &= n_{Amidon} \cdot MMR_{Amidon} = 1.388,9 \cdot 162 = 225kg \text{ d'amidon sont nécessaires} \end{aligned}$$

- Sachant que le maïs contient 65% d'amidon, il est donc nécessaire de récolter $m_{maïs} = \frac{m_{amidon}}{0,65} \approx 350kg$ de maïs

Finalement, on calcule la quantité de CO₂ absorbée par les 170kg de maïs nécessaires à la production de 100kg de PLA :

$$m_{CO_2} = 0,057kgCO_2/an \cdot kg_{vegetal} \cdot 350kg \approx 20kg/an$$

Pour mieux appréhender le nombre, une comparaison...

- La production annuelle de nos 335.000.000 de tonnes (= 335Mt) de plastiques consommerait $335.000.000.000[kgPLA] \cdot \frac{350}{100}[kgMaïs/kgPLA] \cdot 0,057[kgCO_2/an \cdot kgMaïs] \approx 70.000.000$ tonnes (= 70Mt) de CO₂, soit près du double de la quantité de CO₂ rejetée de manière anthropique chaque année (= 40.000Mt/an (ConsoGlobe, 2017; Bourgeois, 2016; Lu & Darensbourg, 2012)).

PLASTIQUES COMPARÉS AUX BIOPLASTIQUES DE TYPE BIO-SOURCÉS UNIQUEMENT

Si le plastique est biosourcé mais pas biodégradable, le raisonnement tient-il toujours ?

Oui. L'empreinte carbone de la matière première restera neutre car il y a alors un équilibre entre le carbone absorbé par les végétaux à la base du bioplastique et le carbone rejeté par le bioplastique lorsqu'il est incinéré en fin de vie.

PLASTIQUES COMPARÉS AUX BIOPLASTIQUES DE TYPE BIODÉGRADABLES UNIQUEMENT

Si le plastique est biodégradable mais pas biosourcé, le raisonnement tient-il toujours ?

Non. Lors de la biodégradation, les molécules de bioplastiques (typiquement du PLA) sont dégradées par des micro-organismes en dioxyde de carbone et en eau (Arbellini et al., 2017 ; Weng et al., 2013). L'empreinte carbone de la matière première n'est donc plus neutre. En effet, le cycle de vie d'un bioplastique biosourcé implique de consommer du carbone provenant de la nature (hydrocarbures) et de le rejeter sous forme gazeuse dans l'atmosphère. Qui dit rejet de CO₂ dit absence de neutralité carbonique. Le réel avantage des plastiques biodégradables (et non bio-sourcés) ne réside donc pas dans son empreinte carbone mais bien dans sa faculté à se biodégrader : ainsi, plus d'accumulation de déchets plastiques dans des décharges.



IV. PRODUIRE DU PLASTIQUE À PARTIR DE CO₂ CAPTURÉ, UN AVENIR ?

VERS UNE NOUVELLE SYNTHÈSE CENTRÉE SUR LE CO₂

L'industrie du plastique cherche depuis longtemps une alternative aux hydrocarbures, pour les raisons qui ont été citées plus haut. Étant donné que l'élément majeur constituant le plastique est le carbone, c'est naturellement que les scientifiques se sont intéressés au CO₂, source de carbone illimitée, peu chère et non toxique (Bourgeois, 2016 ; Cramail & Tassaing, 2013 ; Lu & Darensbourg, 2012).

La fabrication de plastiques à partir de CO₂ présenterait un double avantage : il s'agirait non seulement d'une option remplaçant les hydrocarbures, mais cela permettrait en plus d'utiliser le dioxyde de carbone qu'on essaye d'extraire de l'atmosphère. En effet, actuellement, le CO₂ qui est récupéré par les usines de capture de CO₂ n'est pas revalorisé : il est simplement enfoui dans des sites de stockage géologique. La fabrication de plastiques à partir de CO₂ s'inscrirait donc dans le cadre d'une chimie circulaire.

Attention, cela signifie que le CO₂ ne sera pas stocké éternellement, il sera ré-émis dans l'atmosphère en fin de vie du plastique, lors de son incinération ; mais cela permettra en revanche de ne pas utiliser PLUS d'hydrocarbures donc de ne pas augmenter la quantité de CO₂ déjà présente dans l'atmosphère (Bourgeois, 2016 ; Cramail & Tassaing, 2013).

La synthèse de plastiques à partir de CO₂ ne présente tout de même pas que des avantages.

En effet, le CO₂ est une molécule qui a la propriété d'être

remarquablement stable chimiquement. Il faut donc utiliser des quantités d'énergie colossales pour casser les liaisons de la molécule et la faire réagir, ce qui peut à la fin se révéler inintéressant d'un point de vue bilan énergétique et bilan carbone. Il est donc nécessaire de le faire réagir dans des conditions très spéciales et d'utiliser un catalyseur optimal pour que ce soit efficace (Bourgeois, 2016 ; Cramail & Tassaing, 2013).

SYNTHÈSES DES PLASTIQUES CO₂-SOURCÉS

SYNTHÈSE DE POLYCARBONATES (PC) À PARTIR DE CO₂

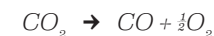
Les polycarbonates (PC) sont des polymères principalement utilisés pour former des mousses, ils sont difficilement inflammables et possèdent d'excellentes propriétés thermiques et mécaniques (Bourgeois, 2016 ; inrs, 2016).

Le PC est traditionnellement obtenu par polycondensation du bisphénol A -écotoxicité en discussion- et d'un carbonate ou d'un phosgène -très toxique- (inrs, 2016 ; Lu & Darensbourg, 2012).

SYNTHÈSE DE POLYCARBONATES (PC) À PARTIR DE CO₂ ET D'ÉPOXYDE

Parmi les projets de conversion de CO₂ en polymère, le plus avancé (et de loin) est la synthèse de polycarbonate à partir de CO₂ et d'époxyde. Enfin, soulignons également qu'il existe des variations subtiles d'initiation/de terminaison, de telle sorte que le début et la fin de la chaîne polymère peuvent être légèrement différents.

Le problème de cette méthode de synthèse est qu'elle nécessite l'utilisation d'époxydes. Or les époxydes sont industriellement produits par oxydation d'un alcène, lui-même produit par déshydrogénation d'un alcane (Delaude, 2018 ; Bruice, 2012). Ainsi, alors même qu'on essaye de contourner le problème de dépendance aux hydrocarbures en synthétisant des plastiques avec du CO₂, on est de nouveau coincé car le second réactif dérive lui-même d'hydrocarbures. Il faut trouver une synthèse de l'époxyde durable, nous avons trouvé une solution : synthétiser un alcène à partir de monoxyde de carbone et de dihydrogène, selon la méthode de Fischer-Tropsch. Le CO provient de la scission thermochimique de CO₂ et le H₂ provient de l'électrolyse de l'eau. L'alcène synthétisé est ensuite transformé en polycarbonate (Guillou, 2007 ; Mahmoudi et al., 2017).



La scission thermochimique du dioxyde de carbone consiste en la séparation du CO₂ en CO et en O lorsque du CO₂ est soumis à du rayonnement solaire en présence d'un catalyseur à base de CeO₂ (Marxer et al., 2015).



L'électrolyse de l'eau consiste en la séparation des atomes d'hydrogène et d'oxygène de la molécule d'eau lorsqu'un courant électrique traverse cette eau. L'électrolyse de l'eau est une réaction classique qu'on maîtrise depuis très longtemps. Elle n'est pas spontanée, il est nécessaire de fournir beaucoup d'énergie pour qu'elle se produise (CultureSciences-Chimie, 2003).



La réaction de Fischer-Tropsch permet de produire une large gamme d'hydrocarbures à partir de gaz de synthèse (provenant de gaz naturel ou de charbon), à l'aide d'un catalyseur à base de fer et/ou de cobalt. Le dihydrogène et le dioxyde de carbone réagissent pour former des monomères, qui vont ensuite être polymérisés pour former essentiellement des paraffines, allant de C_1 à C_{40} , ainsi que des oléfines et des alcools. Les proportions des différents produits obtenus dépendent des conditions de réaction. Historiquement, cette méthode de synthèse a d'abord été développée et utilisée par les Allemands pendant la seconde guerre mondiale, quand ceux-ci manquaient de pétrole mais disposaient d'énormément de lignite. Elle a ensuite été abandonnée face au prix imbattable du pétrole brut, puis a connu un regain d'intérêt pendant la crise pétrolière de 1973. Une fois de plus, le fait que cette méthode soit totalement indépendante des hydrocarbures est un avantage précieux : rappelons-le, les pays occidentaux cherchent 1. à diminuer leur dépendance aux hydrocarbures provenant principalement de pays sensibles ; et 2. à diminuer les rejets de CO_2 . Un autre avantage de cette réaction est qu'elle est durable, en ce sens qu'il s'agit d'une réaction très propre, sans émission de sulfures, de cycles aromatiques ; et que l'utilisation du produit n'émet ni particules fines, ni oxydes d'azote, ni monoxydes de carbone. Finalement, le procédé permet de produire des hydrocarbures liquides avec un indice octane élevé. Elle présente cependant le désavantage qu'elle est très peu sélective, même avec une sélection poussée des facteurs : ainsi, on obtient non pas un seul hydrocarbure mais une soupe de différents dérivés hydrocarbonés (alcane, alcènes, alcynes, alcools, etc). En outre, il s'agit d'une méthode de production d'hydrocarbures relativement chère, pas du tout compétitive face au prix du baril de pétrole actuel (Guillou, 2007 ; Mahmoudi et al., 2017).

L'oxydation d'un alcène en époxyde permet de remplacer la double liaison par une liaison simple tout en formant un cycle époxyde (cycles hydrocarbonés avec un oxygène pontant), en présence d'un oxydant -à savoir de l' O_2 avec un cata ou du peracide (Delaude, 2018 ; Bruice, 2012).

Bilan de masse de la production d'une tonne de polycarbonate (PC) : quelle est la quantité et le prix des matières premières nécessaires à la production d'1t de PC ?

Hypothèse 1 : On considère que 100 % des réactifs vont donner 100% de produits pour toutes les réactions. On néglige donc les taux de conversion (qui indique la proportion de ré-actif qui vont réellement réagir lors de la réaction) ainsi que les rendements (qui indiquent la quantité de produits formés, laquelle dépend donc de la sélectivité). On néglige également le fait que la réaction de Fischer-Tropsch ne donne pas un produit unique mais une soupe de paraffines et d'oléfines à séparer.

Hypothèse 2 : On ne tient pas compte des catalyseurs dans notre bilan de masse. En effet, un catalyseur est -par définition- une espèce chimique qui va favoriser la réaction sans être consommé pour autant. Il modifie la vitesse de réaction sans en modifier l'aspect thermodynamique. Ainsi, il est présent en très faible quantité et est censé être restitué en fin de réaction. Dans la pratique, il va souvent s'empoisonner, mais nous n'en tiendrons pas compte.

Hypothèse 3 : On ne prend pas en compte la quantité d' O_2 nécessaire à la synthèse d'époxyde à partir d'alcène, car des quantités suffisantes d' O_2 ont été produites lors des réactions de synthèse de CO et d' H_2 . On considère donc qu'on récupère ces produits pour qu'ils servent de réactifs dans la synthèse d'époxyde.

1. Synthèse du PC à partir d'époxyde et de CO_2



$$m_{PC} = 1t = 1.000.000g$$

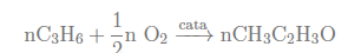
$$n_{PC} = \frac{m_{PC}}{MMR_{PC}} = \frac{1.000.000[g]}{102[g/mol]} \approx 9.800mol$$

$$\rightarrow n_{CO_2} = 9.800mol$$

$$m_{CO_2} = 9.800[mol] \cdot 44[g/mol] = 431.200g \approx \mathbf{431kg \text{ de } CO_2}$$

$$\rightarrow n_{Epoxyde} = 9.800mol$$

2. Synthèse de l'époxyde à partir d'alcène



$$n_{Epoxyde} = 9.800mol$$

$$\rightarrow n_{Alcène} = 9.800mol$$

$$\rightarrow n_{O_2} = 4.900mol$$

3. Synthèse d'alcène à partir de CO et d' H_2

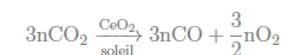


$$n_{Alcène} = 9.800mol$$

$$\rightarrow n_{CO} = 3 \cdot 9.800 = 29.400mol$$

$$\rightarrow n_{H_2} = 6 \cdot 9.800 = 58.800mol$$

4. Synthèse de monoxyde de carbone à partir de CO_2

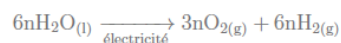


$$n_{CO} = 29.400mol$$

$$\rightarrow n_{CO_2} = 29.400mol$$

$$m_{CO_2} = 29.400[mol] \cdot 44[g/mol] = 1.293.600g \approx \mathbf{1,3t \text{ de } CO_2}$$

5. Synthèse de dihydrogène à partir d'eau



$$\begin{aligned} n_{\text{H}_2} &= 58.800 \text{ mol} \\ \rightarrow n_{\text{H}_2\text{O}} &= 58.800 \text{ mol} \\ m_{\text{H}_2\text{O}} &= 58.800 [\text{mol}] \cdot 18 [\text{g/mol}] = 1.058.400 \text{ g} \approx \mathbf{1 \text{ t d'eau}} \end{aligned}$$

Hypothèse 4 : On considère que le prix de la tonne de CO_2 est de 150€, comme cela a été calculé dans le chapitre 'capture et stockage de CO_2 ' (Jacques, 2019).

$$\text{► } m_{\text{CO}_2, \text{total}} = 430 + 1.300 \approx 1.700 \text{ kg}$$

$$\text{► } \text{prix}_{\text{CO}_2, \text{total}} = 1,7 [\text{t}] \cdot 150 \text{ €} = 255 \text{ €}$$

Hypothèse 5 : On considère qu'il faut utiliser de l'eau pure pour cette réaction. Le prix de l'eau distillée est de 1,50€/L, chiffres trouvés en faisant une moyenne des prix proposés sur Amazon (Amazon, 2019).

$$\text{► } m_{\text{H}_2\text{O}, \text{total}} = 1.000 \text{ kg}$$

$$\text{► } \text{prix}_{\text{H}_2\text{O}, \text{total}} = 1 [\text{t}] \cdot 1000 [\text{L/t}] \cdot 1,5 \text{ €/L} = 1.500 \text{ €}$$

Au total, cela revient donc à **1.755€/t de polycarbonate (PC)**.

Quelle est la proportion des rejets anthropiques annuels de CO_2 consommée pour assurer la production annuelle mondiale de polycarbonate (PC) ? Combien cela coûte-t-il ?

Hypothèse 1 : Dans le monde sont produits chaque année quelques 4,85 millions de tonnes de PC (Statista, 2015).

$$\text{► } \text{Qtt}_{\text{Matiere, total}} = 10.000 [\text{kWh/t PC}] \cdot 4.850.000 [\text{t PC}] = 48,5 \text{ TWh}$$

$$\text{► } \text{Prix}_{\text{Matiere, total}} = 4.850.000 [\text{t PC}] \cdot 1.755 [\text{€/t PC}] \approx 8,5 \text{ milliards d'€}$$

Hypothèse 2 : On considère que le rejet annuel de CO_2 dû aux activités anthropiques s'élève à 40Gt (ConsoGlobe, 2017 ; Bourgeois, 2016 ; Lu & Darenbourg, 2012).

► On peut donc calculer la quantité de CO_2 nécessaire à la production annuelle mondiale de PC : $m_{\text{CO}_2} = 1.700 [\text{kgCO}_2/\text{tPC}] \cdot 4.850.000 [\text{tPC/an}] \approx 8 \text{ millions tCO}_2/\text{an}$.

► On peut alors calculer la fraction que cela représente parmi le rejet annuel anthropique de CO_2 : $\% \text{CO}_2 = \frac{8.000.000}{40.000.000.000} = 0,02\%$ des rejets annuels anthropiques.

Bilan d'énergie de la production d'une tonne de polycarbonate (PC) : quelle est la quantité et le prix de l'énergie nécessaire à la production d'1t de PC ?

Hypothèse 1 : On considère que 100 % des réactifs vont donner 100% de produits pour toutes les réactions. On calcule l'énergie nécessaire à la production d'une tonne de PC en tenant uniquement compte de l'enthalpie standard de formation à 25°C de 100% des produits à partir de 100% des réactifs ; les données venant des tables thermodynamiques (Lide et al., 2005).

Hypothèse 2 : On considère que 100% de l'énergie donnée est utilisée, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de perte. On considère également que l'énergie libérée par les réactions exothermiques est récupérée à 100% par les réactions endothermiques, pour alléger la facture.

Hypothèse 3 : Nous ne disposons pas de l'enthalpie standard de formation du monomère $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$. Nous allons donc utiliser l'enthalpie standard de formation du carbonate cyclique de même formule brute (carbonate de propylène) auquel on va enlever l'enthalpie de formation d'une liaison C-C, comme si on l'avait cassée pour transformer le polycarbonate cyclique en aliphatique.

Hypothèse 4 : L'énergie que nous utilisons est fournie par des sources vertes, ce qui revient à 9,78 ≈ 10 cent/kWh (CallMePower, 2019).

$$\text{► } \text{Qtt}_{\text{kWh, total}} = 680 - 360 - 1.420 + 2.300 + 9.340 = 10.540 \approx 10.500 \text{ kWh pour 1t de PC}$$

$$\text{► } \text{Prix}_{\text{kWh, total}} = 10.500 [\text{kWh}] \cdot 0,10 [\text{€/kWh}] = 1.050 \text{ €}$$

On remarquera que sans surprise, ce sont les étapes d'électrolyse de l'eau et de scission thermochimique du CO_2 , deux molécules très stables, qui consomment beaucoup d'énergie.

Quelle est la quantité et le prix de l'énergie nécessaire à la production annuelle mondiale de PC ?

Dans le monde sont produits chaque année quelques 4,85 millions de tonnes de PC (Statista, 2015).

$$\text{► } \text{Qtt}_{\text{kWh, total}} = 10.000 [\text{kWh/t PC}] \cdot 4.850.000 [\text{t PC}] = 48,5 \text{ TWh}$$

$$\text{► } \text{Prix}_{\text{kWh, total}} = 48,5 \cdot 109 [\text{kWh}] \cdot 0,10 [\text{€/kWh}] = 4,85 \text{ milliards d'€}$$

SYNTHÈSE DE POLYURÉTHANES (PU) À PARTIR DE CO_2

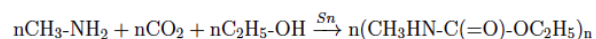
Les polyuréthanes sont des plastiques très répandus, principalement utilisés dans les mousses, peintures, revêtements (Cramail & Tassaing, 2013).

La réaction classique de synthèse des PU est une polyaddition entre des polyols et diisocyanates, en présence d'un catalyseur à base d'étain. Le problème majeur de cette méthode de synthèse est l'utilisation d'un composé à base de cyanate, cancérigène et formé avec du phosgène -gaz hautement toxique et corrosif- (Cramail & Tassaing, 2013).

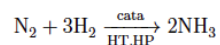
SYNTHÈSE DE POLYURÉTHANES (PU) À PARTIR DE CO₂, AMINE, ALCOOL

Les recherches menées jusqu'à présent ne permettent que de synthétiser un uréthane unique (et non une chaîne polymère = polyuréthane) en utilisant un mono-amine et un alcool (Cramail & Tassaing, 2013).

Remarque : Pour plus de facilité, on va considérer pour la suite que le groupement alkyle du composé aminé est un méthyl, et que le groupement alkyl du composé alcoolisé est un éthyl.



Le problème de la synthèse proposée est qu'elle fait intervenir un amine et un alcool. Industriellement, l'alcool est produit par hydratation d'un alcène -issu de la pétrochimie- ou par fermentation de glucose -provenant de biomasse- (Delaude, 2018 ; Bruice, 2012). Nous allons ici investiguer la deuxième solution vu qu'elle est indépendante des hydrocarbures. L'amine est quant à elle produite par réduction d'un composé azoté ou par S_N2 de l'ammoniac sur les dérivés halogénés (Delaude, 2018 ; Bruice, 2012). Nous allons ici privilégier la seconde solution, mais la première aurait été tout aussi adéquate. Il nous faut trouver des méthodes de synthèse neutres des réactifs nécessaires afin d'obtenir un bilan carbone nul.



Le procédé de Haber-Bosch permet de synthétiser de l'ammoniac à partir de dihydrogène et de diazote dans des conditions de haute pression et haute température. Le diazote et le dihydrogène sont eux-mêmes produits respectivement par liquéfaction de l'air et par hydrolyse de l'eau. Historiquement, la réaction a été découverte par Fritz Haber et Carl Bosch, considérés aujourd'hui comme deux des hommes les plus importants du XX^{ème} siècle : la réaction qu'ils ont mise au point permet de synthétiser les millions de tonnes d'engrais nécessaires pour nourrir les 7 milliards d'êtres humains de la planète. Cela peut sembler banal dans un monde qui a toujours connu les engrais ; mais il y a 1 siècle, synthétiser de l'azote sous forme utilisable pour l'agriculture pour remplacer le lisier qui était en pénurie était le Graal de la chimie. On estime aujourd'hui que sans leur procédé, on ne pourrait pas nourrir 40% de la population actuelle ; autrement dit 3,5 milliards de personnes lui doivent la vie (LaRéactionChimique, franceinfo, 2018).

Bilan de masse de la production d'une tonne de polyuréthane (PU) : quelle est la quantité et le prix des matières premières nécessaires à la production d'1t de PU ?

Hypothèse 1 : On considère que 100 % des réactifs vont donner 100% de produits pour toutes les réactions. On néglige donc les taux de conversion (qui indiquent la proportion de réactif qui a réellement réagir lors de la réaction) ainsi que la sélectivité (qui indique la quantité de produits recherchés réellement formés, par opposition aux sous-produits provenant des réactions parasites).

Hypothèse 2 : On ne tient pas compte des catalyseurs dans notre bilan de masse. En effet, un catalyseur est -par définition- une espèce chimique qui va favoriser la réaction sans être consommée pour autant. Il modifie la vitesse de réaction sans en modifier l'aspect thermodynamique. Ainsi, il est présent en très faible quantité et est censé être restitué en fin de

réaction. Dans la pratique, il va souvent s'empoisonner, mais nous n'en tiendrons pas compte.

Hypothèse 3 : On considère que l'air est constitué à 78% de diazote et que c'est un gaz parfait. On considère en outre qu'on est dans des conditions standard de température et de pression (CSTP : 298K et 1atm).

Hypothèse 4 : On considère que le prix de la tonne de CO₂ est de 150€, comme cela a été calculé dans le chapitre 'capture et stockage de CO₂ (Jacques, 2019)'.

$$\text{► } m_{\text{CO}_2, \text{total}} = 427,2 \text{ kg}$$

$$\text{► } \text{prix}_{\text{CO}_2, \text{total}} = 0,4272 [\text{t}] \cdot 150 [\text{e/t}] = 64,08 \text{ €}$$

Hypothèse 5 : On considère qu'il faut utiliser de l'eau pure pour cette réaction. Le prix de l'eau distillée est de 1,50€/L, valeur trouvée en faisant une moyenne des prix proposés sur Amazon (Amazon, 2019).

$$\text{► } m_{\text{H}_2\text{O}, \text{total}} = 260 \text{ kg}$$

$$\text{► } \text{prix}_{\text{H}_2\text{O}, \text{total}} = 0,260 [\text{t}] \cdot 1,5 [\text{e/L}] \cdot 1.000 [\text{L/t}] = 390 \text{ €}$$

Au total, cela revient donc à 454,08 €/t.

Bilan d'énergie de la production d'une tonne de polyuréthane (PU) : quelle est la quantité et le prix de l'énergie nécessaire à la production d'1t de PU ?

Hypothèse 1 : On considère que 100 % des réactifs vont donner 100% de produits pour toutes les réactions. On calcule l'énergie nécessaire à la production d'une tonne de PU en

tenant uniquement compte de l'enthalpie standard de formation à 25°C de 100% des produits à partir de 100% des réactifs ; les données venant des tables thermodynamiques (Lide et al., 2005).

Hypothèse 2 : On considère que 100% de l'énergie donnée est utilisée, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de perte. On considère également que l'énergie libérée par les réactions exothermiques est récupérée à 100% par les réactions endothermiques, pour alléger la facture.

Hypothèse 3 : On ne dispose pas de la valeur de l'enthalpie de formation de notre PU, on considère donc qu'elle est égale à celle d'un uréthane (quality chemical properties, 2016) + celle d'un groupement méthyl (Lide et al., 2005) : $-446,30 + 145,9 = 300,4$ kJ/mol. On ne dispose pas de la valeur de l'enthalpie de formation de l'amidon, on considère qu'elle est égale à la valeur énergétique qu'elle contient (Les Calories, 2019) : 3.400 [kcal/kg] $4,184$ [kJ/kcal] $0,162$ [kg/mol] = 2.305 kJ/mol.

Hypothèse 4 : L'énergie que nous utilisons est fournie par des sources vertes, ce qui revient à $9,78 \approx 10$ cent/kWh (CallMePower, 2019).

$$\begin{aligned} \text{P}_{\text{Qt}, \text{kWh, total}} &= 1.329 + 2.030 - 4.440 + 61 - 124 + 2.312 + 9,6 \\ &= 1.177,6 \approx 1.200 \text{ kWh pour 1t de PU} \end{aligned}$$

$$\text{Prix}_{\text{kWh, total}} = 1.200 \text{ [kWh]} \cdot 0,10 \text{ [e/kWh]} = \mathbf{120\text{€}}$$

COMMENTAIRES

Les développements réalisés ci-dessus donnent finalement des prix de **2.755€/t** pour le polycarbonate PC et de **50.574€/t** pour le polyuréthane (PU).

Si le prix du polycarbonate (PC) est déjà fort élevé (comparable au prix des bioplastiques, c'est-à-dire près de 3 fois plus élevé qu'un plastique traditionnel), le prix du polyuréthane (PU) est exorbitant.

L'avantage que les méthodes de synthèse à partir de CO_2 apportent est un coût des matières premières très intéressant : le CO_2 comme l'eau sont des composés abondants et facile/peu coûteux à isoler.

Par contre, le gros d'inconvénient de ces méthodes est le nombre d'étapes nécessaires pour passer de matières premières aussi stables que de l'eau et du CO_2 à des molécules complexes formant des polymères. Dans les calculs ci-dessus et par souci de facilité, on a considéré un monde parfait où 100% de réactifs donnaient 100% de composés, en consommant/rejetant uniquement une énergie égale à l'enthalpie de formation ; mais en réalité, il faut tenir compte des taux de conversion et de la sélectivité chimiques, ainsi que du rendement énergétique. Si on tient compte de tous ces paramètres, on pourrait voir notre prix multiplié par 2, 10 voir 100. Il reste donc énormément d'innovations à réaliser pour que le prix de production industriel réel (et non hypothétique comme ici) soit intéressant.

En outre, nous remarquerons que les différents développements réalisés ci-dessus portent sur le polyuréthane (PU) et le polycarbonate (PC). Ces deux plastiques ne représentent respectivement que 1,5% (4,85 sur 335 millions de tonnes de PC en 2015 (Statista, 2015 ; PlasticsEurope, 2018)) et 6,5% (16 sur 245 millions de tonnes de PU en 2009 (Cramail & Tassaing, 2013 ; PlasticsEurope, 2009)), soit une dizaine de pourcents de la production totale de plastiques. Si nous nous sommes concentrés sur ces 2 plastiques, c'est parce que ce sont les seuls pour lesquels des recherches sérieuses et poussées ont permis de trouver une méthode de synthèse plausible.

Il reste donc près de 90% de plastiques pour lesquels aucune voie de synthèse à partir de CO_2 n'a été découverte : PE, PET, PVC, PP, PS ; autant de plastiques ayant une place prépondérante dans notre société et qui sont pour le moment synthétisés à partir d'hydrocarbures. Il faudra énormément innover dans le domaine si on veut arriver à couvrir la gamme complète de plastiques qu'on utilise.

CONCLUSIONS

Corentin de Salle

Au terme de cette étude, nous pouvons tirer un certain nombre de conclusions :

1. **Le plastique est indispensable à notre vie de tous les jours.** Il est omniprésent dans notre société et procure une quantité innombrable d'avantages. On peut évidemment travailler à remplacer le plastique par d'autres matériaux traditionnels (métal, bois, carton, papier, tissu, etc.) là où c'est possible mais il serait stupide de se priver des propriétés exceptionnelles qu'offre la grande famille des plastiques. On ne résoudra certainement pas nos problèmes en supprimant le plastique. On ne répond pas à une question en supprimant la question.
2. Les plastiques conventionnels constituent une famille. **Les alternatives aux plastiques conventionnels (alternatives biosourcées, biodégradables, ou les deux, ou à partir de CO₂ capturé) sont aujourd'hui techniquement réalisables** et certaines, comme l'acide polylactique (PLA), sont même prometteuses. **Mais**, comme cette étude l'a, semble-t-il, démontré, **leur coût de fabrication reste encore prohibitif** (voire astronomique comme c'est le cas du polyuréthane à partir de CO₂) **pour constituer une alternative de remplacement immédiate** aux plastiques conventionnels. Sans compter qu'elles nécessitent parfois de libérer des étendues agricoles considérables pour cultiver la biomasse nécessaire à leur synthèse. Elles peuvent aussi être très énergivores.
3. Cela n'aurait **pas de sens, en l'état, de vouloir**, comme le préconisent certains, **imposer ces alternatives** (qui ne sont d'ailleurs pas encore, en tant que telles des alternatives car elles ne sont **pas encore mûres**) **aux producteurs de plastique car cela ferait exploser les structures de coût** au point de créer des faillites et d'engendrer toute une série de conséquences indésirables. Ce serait irresponsable quand on sait le caractère indispensable du plastique dans quantité de secteurs (médical, pharmaceutique, agricoles, énergétique, automobile, de la construction, etc.).
4. Néanmoins, **la recherche et le développement relative aux alternatives bioplastiques doit être financée activement par les autorités et encouragée fiscalement** afin de trouver les procédés qui permettront de faire baisser les coûts et rendre ces alternatives rentables. Il faut, à terme, trouver une réelle alternative aux hydrocarbures. Ces recherches doivent porter sur différents axes. Il faut que ces **alternatives soit réellement biosourcées (à 100%) et réellement biodégradables**, c'est-à-dire qu'elles puissent être digérées sans dommage par la nature et non pas être fragmentées en parties infimes. Il faut travailler sur de la **biomasse qui ne concurrence pas les cultures vivrières ou la sylviculture**. Par exemple, en travaillant sur les algues (qui ont par ailleurs le mérite de ne pas exiger des arrosages). Il faut trouver des alternatives qui ne soient **pas trop énergivores**. Etc. Par ailleurs, il faut trouver des niches pour ces alternatives afin de les développer. Il existe quantité de domaines où ces alternatives sont déjà intéressantes, par exemple « l'encre » pour les imprimantes 3D (comme ces imprimantes nécessitent

de la matière première pour imprimer des prototypes, autant s'assurer que cette « encre » soit aisément recyclable).

5. **Ce n'est pas avec les bioplastiques que sera résolu le problème de la pollution des océans par les déchets plastiques.** Comme on l'a vu, 90% du plastique polluant les océans provient de 10 fleuves dont 2 sont situés en Afrique et 8 en Asie. **Le problème, ce n'est pas le plastique mais l'absence, dans les pays du tiers-monde, de système de gestion des déchets en plastique.** Et cette absence s'estime par la pauvreté de ces pays. Luttant pour satisfaire leurs besoins vitaux, ces populations n'ont pas les moyens de financer un système de traitement des déchets. **Cela viendra une fois que ces populations auront accédé à un niveau de développement économique** (qui s'accroît d'année en année dans la plupart de ces pays à l'exception de certains pays africains).

6. Nous devons **augmenter le taux de recyclabilité des déchets en plastique en Belgique et en Europe.** Cela passe par une meilleure collecte des déchets, par la mise en place d'un système de consigne et, probablement, par la construction d'une usine de recyclage du plastique en Belgique comme c'est le cas en Allemagne ou en France. Ce sera l'objet de futures études du Centre Jean Gol.

7. **L'examen des progrès technologiques constamment réalisés en la matière invite à l'optimisme.** Par ailleurs, partout fleurissent des initiatives citoyennes comme « **Ocean Cleanup** » de Boyan Slat qui nettoie les gyres des océans grâce à de grandes barrières mouvantes ou encore la « **Plastic Bank** »,¹² la start-up canadienne de David Katz et Shaun Frankson, lesquels ont mis sur pied un vaste réseau de magasins dans le tiers-monde qui échangent du plastique récolté en mer ou sur les plages contre du cash ou des points leur permettant d'acheter des marchandises (cuisinières, carburants durables, crédits téléphoniques, etc.). Le plastique récolté (le « plastique social ») est racheté par des grands groupes tels que Mark&Spencer, Unilever, Procter&Gamble qui les recyclent dans des emballages avec le label « plastique social ». 11.000 personnes récoltent quotidiennement des plastiques qu'ils apportent aux quelques 30 centres de récoltes sponsorisés, dans ce projet qui combine dépollution et insertion sociale.

Tout ceci, on l'a dit, invite à **l'optimisme. Depuis les années 70, les catastrophes pétrolières ont diminué de 98%.** Et cela grâce à toute une série de règles imposées par les grandes compagnies d'assurance (qui, elles-mêmes, avaient été poussées à la faire par les compagnies de réassurance lorsque le droit américain a considéré que les dommages environnementaux causés par les pétroliers devaient être indemnisés en totalité) et notamment l'obligation de naviguer avec une double coque. Le marché a engendré une solution. Aujourd'hui, le pétrole ne se répand plus (plus autant en tout cas) en mer mais le problème se pose désormais à l'autre bout de la chaîne car le plastique, ce n'est rien d'autre que du pétrole qui a été transformé. C'est cela le grand défi écologique aujourd'hui. **Mais l'homme en viendra probablement à bout** comme il a pu le faire en triomphant des catastrophes pétrolières.

¹² P. Bouchez, *The Plastic Bank, la start up qui transforme les déchets plastiques en monnaie*, **La Tribune**, 13 juin 2016, <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/the-plastic-bank-la-start-up-qui-transforme-les-dechets-plastiques-en-monnaie-578709.html>



BIBLIOGRAPHIE

- Akindoyo, J. O., Beg, M., Ghazali, S., Islam, M., Jeyaratnam, N., & Yuvaraj, A. (2016). Polyurethane types, synthesis and applications—a review. *Rsc Advances*, 6 (115), 114453–114482.
- Allen, S. D., Coates, G. W., Cherian, A. E., Simoneau, C. A., Gridnev, A. A., & Farmer, J. J. (2012, août 21). *Polycarbonate polyol compositions and methods*. Google Patents. (US Patent 8,247,520)
- Amazon. (2019). *Eau distillée*. <https://www.amazon.fr/eau-distillee/s?k=eau+distillee>
- Arbellini, J., Jean-Louis, S., & Kerowgodage, M. S. (2017). *L'acide polylactique*. <https://ramenetessciences.wordpress.com/2017/05/03/le-polylactide-pla/>
- Arvalis. (2015). *Récolte 2015 de maïs grain*. <https://www.arvalis-infos.fr/90-q/ha-un-rendement-national-tres-honorable-au-vu-du-scenario-climatique-@/view-20424-arvarticle.html>
- Bourgeois, B. (2016). CO_2 : 3 idées de génie pour le recycler. *Science & Vie*(1183).
- Bruice, P. Y. (2012). *Chimie organique*. Pearson Education. https://books.google.be/books?id=OaTlwfa_tPYC
- Brut. (2019). *Le projet ocean cleanup montre ses limites*. <https://www.youtube.com/watch?v=QbWDWxB6gSI>
- CallMePower. (2019). *Luminus tarifs*. <https://callmepower.be/fr/energie/fournisseurs/luminus/tarifs>
- CashInvestigation. (2018). *Plastique: la grande intox*. <https://www.youtube.com/watch?v=WZT3drAYlzo>
- ChemistryLibreTexts. (2019). *Polymerization - addition polymers*. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Book%3A_Introductory_Chemistry_\(CK-12\)/25%3A_Organic_Chemistry/25.19%3A_Polymerization_-_Addition_Polymers](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Introductory_Chemistry/Book%3A_Introductory_Chemistry_(CK-12)/25%3A_Organic_Chemistry/25.19%3A_Polymerization_-_Addition_Polymers)
- Cheng, Y., Deng, S., Chen, P., & Ruan, R. (2009). Polylactic acid (pla) synthesis and modifications: a review. *Frontiers of chemistry in China*, 4 (3), 259–264.
- Commission Européenne. (2018). *Une stratégie européenne sur les matières plastiques dans une économie circulaire*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0028&from=EN>
- CommoPrices. (2015a). *Acide lactique, acide, sels et esters fob france*. https://commoprices.com/fr/c/Chimie/Acides/Acide-lactique/nc8_29181100
- CommoPrices. (2015b). *Acide téréphtalique | caf france*. https://commoprices.com/fr/c/Chimie/Acides/Acide-téréphtalique/nc8_29173600
- CommoPrices. (2015c). *Ethylène glycol - [éthanediol] caf france*. https://commoprices.com/fr/c/Chimie/Alcools-acycliques-et-leurs-dérivés/Ethylène-glycol/nc8_29053100
- CommoPrices. (2015d). *Pet (polyethylene terephthalate) - indice de viscosité >= 78 ml/g caf france*. [https://commoprices.com/fr/c/Plastiques/Polyesters/PET\(PolyEthylene-Terephthalate\)/nc8_39076020#CP](https://commoprices.com/fr/c/Plastiques/Polyesters/PET(PolyEthylene-Terephthalate)/nc8_39076020#CP)
- CommoPrices. (2015e). *Pla (polylactic acid) caf france*. [https://commoprices.com/fr/c/Plastiques/Polyesters/PLA\(PolyLactic-Acid\)/nc8_39077000](https://commoprices.com/fr/c/Plastiques/Polyesters/PLA(PolyLactic-Acid)/nc8_39077000)
- ConsoGlobe. (2017). *Les émissions mondiales de CO_2* . Consulté le 2019-08-01, sur <https://www.planetoscope.com/co2/261-emissions-mondiales-de-co2-dans-l-atmosphere.html>
- Cramail, H., & Tassaing, T. (2013). Le CO_2 véritable matière première pour une chimie verte des polymères. *L'actualité chimique*(371-372).
- CultureSciences-Chimie. (2003). *Electrolyse de l'eau*. <http://culturesciences.chimie.ens.fr/content/electrolyse-de-leau-796>
- Darnay, A., & Nuss, G. (1971). Environmental impacts of coca-cola beverage containers. *Midwest Research Institute for Coca-Cola USA*. <https://www.princeton.edu/~ota/disk3/1976/7622/762209.PDF>
- Delaude, L. (2018, Mars). *Notes de cours de chimie organique*. Faculté des sciences appliquées de l'Uliège. Consulté sur <http://www.lcfi.ulg.ac.be/>
- Economiedurable. (2016). *Population mondiale au 1er janvier 2017*. <http://economiedurable.over-blog.com/2019/01/ined-7-285-7-367-82-soit-1-1-us-census-bureau-7-215-7-296-81-soit-1-1-population-ref-bureau-7-282-7-368-86-soit-1-2-poodwaddle-7-183>
- EnvironnementNamur. (2006). *L'éco-consommation prend de la bouteille*. <https://www.environnement-namur.be/medias/publications/eco-conso-2006.pdf>
- EuropeanBioplastics. (2016). *What are bioplastics*. https://docs.european-bioplastics.org/2016/publications/fs/EUBP_fs_what_are_bioplastics.pdf

- EuropeanParliamentaryResearchService. (2013). *Plastics production, plastic waste generation by industry and plastic waste treatment by method in the eu, 2011*. <https://epthinktank.eu/2013/11/07/plastic-waste/plastics-production-plastic-waste-treatment-of-plastic-waste/>
- Eurostat. (2018). *Archive:statistiques sur la population et l'évolution de la population*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Population_and_population_change_statistics/fr&oldid=396679
- ExpéditionSeptièmeContinent. (2014). *Trajet des plastiques dans les océans*. <http://www.septiemecontinent.com/pedagogie/lesson/trajet-plastiques-océans/>
- FieldActionsSciencesReports. (2019). *Plastics recycling worldwide: current overview and desirable changes*. <https://journals.openedition.org/factsreports/5102>
- Fournier, C. (2017). *Combien d'arbres faudrait-il planter pour compenser la pollution d'une seule personne ?* <https://e-rse.net/arbres-stocke-carbone-combien-27079/#gs.sw6dod>
- franceinfo. (2018). *Fritz haber : l'homme le plus important dont vous n'avez jamais entendu parler*. <https://blog.francetvinfo.fr/classe-eco/2018/02/10/fritz-haber-l'homme-le-plus-important-dont-vous-n'avez-jamais-entendu-parler.html>
- Fremondeau, J., Gimenez-Pouilles, L., Gutierrez, S., Zoch, M., Sabatou, M., Berenguer, N., & Deloris, V. (2017). *Le polytéraphthalate d'éthylène (pet)*. <https://ramenetessciences.wordpress.com/2017/05/10/le-polyterephthalate-dethylenepet/>
- FuturaPlanète. (2018). *Matériaux biosourcés, recyclables, biodégradables... plusieurs solutions sont proposées pour remplacer les plastiques traditionnels. tour d'horizon du recyclage et de la recherche de bioplastiques plus respectueux de l'environnement que nos plastiques traditionnels*. <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/developpement-durable-dechets-plastique-alternatives-ecologiques-69877/>
- FuturaSciences. (2019). *Plastique*. <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/chimie-plastique-13438/>
- Gironi, F., & Piemonte, V. (2011). Bioplastics and petroleum-based plastics: strengths and weaknesses. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 33 (21), 1949–1959.
- Golla, M. (2018). *5 chiffres chocs démontrent pourquoi le plastique est un fléau planétaire*. <http://www.lefigaro.fr/conso/2018/09/11/20010-20180911ARTFIG00013-5-chiffres-chocs-demonstrent-pourquoi-le-plastique-est-un-fleau-planetaire.php>
- Guillou, L. (2007). *Synthèse de fischer-tropsch en reacteurs structures a* (Thèse de doctorat non publiée). Université de Technologie de Compiègne.
- inrs. (2016). *Polycarbonate pc*. http://www.inrs.fr/dms/plastiques/PolymerePlastiques/PLASTIQUES_polymere_11-6/POLYMER_PC.pdf
- Jacques, T. (2019). *Capture et stockage du co2*.
- König, C. (2017). *Le maïs, un aliment riche en amidon*. <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/botanique-mais-cereale-grains-precieux-2346/page/8/>
- Lagrange, P., Faye, L., Adnet, L., & Cantalice, A. (2017). *L'acide polylactique: Pla*. Consulté le 2019-07-31, sur <https://ramenetessciences.wordpress.com/2017/07/17/la-synthese-du-pla/>
- LaRéactionChimique. (?). *Haber et bosch, les deux hommes les plus importants du xxième siècle*. <http://www.meine-mathe.de/Chimie/eModules/3b1/haberbosch3b.html>
- LesCalories. (2019). *Amidon de maïs*. <http://www.les-calories.com/calorie-1141-amidon-de-mais.html>
- Lide, D. R., et al. (2005). *Crc handbook of chemistry and physics, internet version 2005* (Vol. 69). CRC Press.
- Lu, X.-B., & Darensbourg, D. J. (2012). Cobalt catalysts for the coupling of co 2 and epoxides to provide polycarbonates and cyclic carbonates. *Chemical Society Reviews*, 41 (4), 1462– 1484.
- Macqueron, G. (2017). *Dossier - recyclage et traitement des déchets*. <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-recyclage-traitement-dechets-932/page/14/>
- Mahmoudi, H., Mahmoudi, M., Doustdar, O., Jahangiri, H., Tsolakis, A., Gu, S., & LechWys- zynski, M. (2017). A review of fischer tropsch synthesis process, mechanism, surface chemistry and catalyst formulation. *Biofuels Engineering*, 2 (1), 11–31.
- Marxer, D., Furler, P., Scheffe, J., Geerlings, H., Falter, C., Batteiger, V., Steinfeld, A. (2015). Demonstration of the entire production chain to renewable kerosene via solar thermochemical splitting of h2o and co2. *Energy & Fuels*, 29 (5), 3241–3250.
- Mayer, N. (2001). *Biodégradable, compostable, recyclable: quelles différences ?* <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/environnement-biodegradable-compostable-recyclable-differences-7553/>
- Mertens, A. (2019, Février). *Notes de cours en physique des matériaux*. Faculté des sciences appliquées de l'Uliège. <http://www.metaux.ulg.ac.be/Fichierpourtelech/Pol-I-2019.pdf>
- Metzger, J. (?). *Fritz haber : l'homme le plus important dont vous n'avez jamais entendu parler*. <https://www.universalis.fr/encyclopedie/amines/2-preparation-et-modes-de-formation-des-amines-aliphatiques/>
- Narayan, R. (2011). Carbon footprint of bioplastics using biocarbon content analysis and life-cycle assessment. *MRS bulletin*, 36 (9), 716–721.
- NationalGeographic. (2019). *Le plastique en 10 chiffres*. <https://www.nationalgeographic.fr/le-plastique-en-10-chiffres>

NaturPlast. (2019). *Plastiques biodégradables : définitions et normes*. <http://natureplast.eu/les-plastiques-biodegradables/>

PlasticsEurope. (2009). *Plastiques 2009 : faits et chiffres*. https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:6jau_2U8tf0J:https://www.plasticseurope.org/download_file/force/1239/750+&cd=18&hl=fr&ct=clnk&gl=be

PlasticsEurope. (2018). *Plastics the facts*. https://www.plasticseurope.org/application/files/6315/4510/9658/Plastics_the_facts_2018_AF_web.pdf

PlasticsEurope. (2019). *Recyclage et valorisation énergétique*. <https://www.plasticseurope.org/fr/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery>

PolymerScienceLearningCenter. (2019a). *Polycarbonates*. <https://pslc.ws/french/pc.htm>

PolymerScienceLearningCenter. (2019b). *Polypropylène*. <https://pslc.ws/macrog/pp.htm>

PopulationData. (2019a). *Belgique*. <https://www.populationdata.net/pays/belgique/>

PopulationData. (2019b). *Russie*. <https://www.populationdata.net/pays/russie/>

quality chemical properties, C. H. (2016). *Chemical properties of urethane (cas 51-79-6)*. <https://www.chemeo.com/cid/32-439-9/Urethane>

Renard, S. (2005). *hydrolyse de l'amidon : fiche prof*. <http://pedagogie.ac-martinique.fr/stv/prof/hydrolyse%20amidon,%20s%C3%A9verine.pdf>

RevisionScience. (2012). *Plastics and polymers*. <https://revisionscience.com/gcse-revision/chemistry/carbon-compounds/plastics-and-polymers>

Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Dalla Rosa, M. (2008). Biodegradable polymers for food packaging : a review. *Trends in Food Science & Technology*, 19 (12), 634–643.

Slat, B. (2012). *Comment les océans peuvent s'auto-nettoyer : Boyan slat à tedxdelft*. sur <https://www.youtube.com/watch?v=ROW9F-c0klQ>

Statista. (2015). *Capacités mondiales de production de polycarbonate dans le monde en 2015, par pays* (en milliers de tonnes)*. <https://fr.statista.com/statistiques/650737/capacites-production-polycarbonate-monde-par-pays/>

Stoquart, C. (2019). *Agriculture artificielle*. <https://www.overleaf.com/read/jdwgftfbrvqt>

Thakur, S., Chaudhary, J., Sharma, B., Verma, A., Tamulevicius, S., & Thakur, V. K. (2018). Sustainability of bioplastics : Opportunities and challenges. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 13, 68–75.

TheConversation. (2018). *Déchets plastiques : la dangereuse illusion du tout-recyclage*. <https://theconversation.com/dechets-plastiques-la-dangereuse-illusion-du-tout-recyclage-90359>

Vallette, L. (2018). *Agir face à la pollution plastique des océans*. <https://impact-gem.org/pollution-plastique-océans/>

Weng, Y.-X., Jin, Y.-J., Meng, Q.-Y., Wang, L., Zhang, M., & Wang, Y.-Z. (2013). Biodegradation behavior of poly (butylene adipate-co-terephthalate)(pbat), poly (lactic acid)(pla), and their blend under soil conditions. *Polymer Testing*, 32 (5), 918–926.

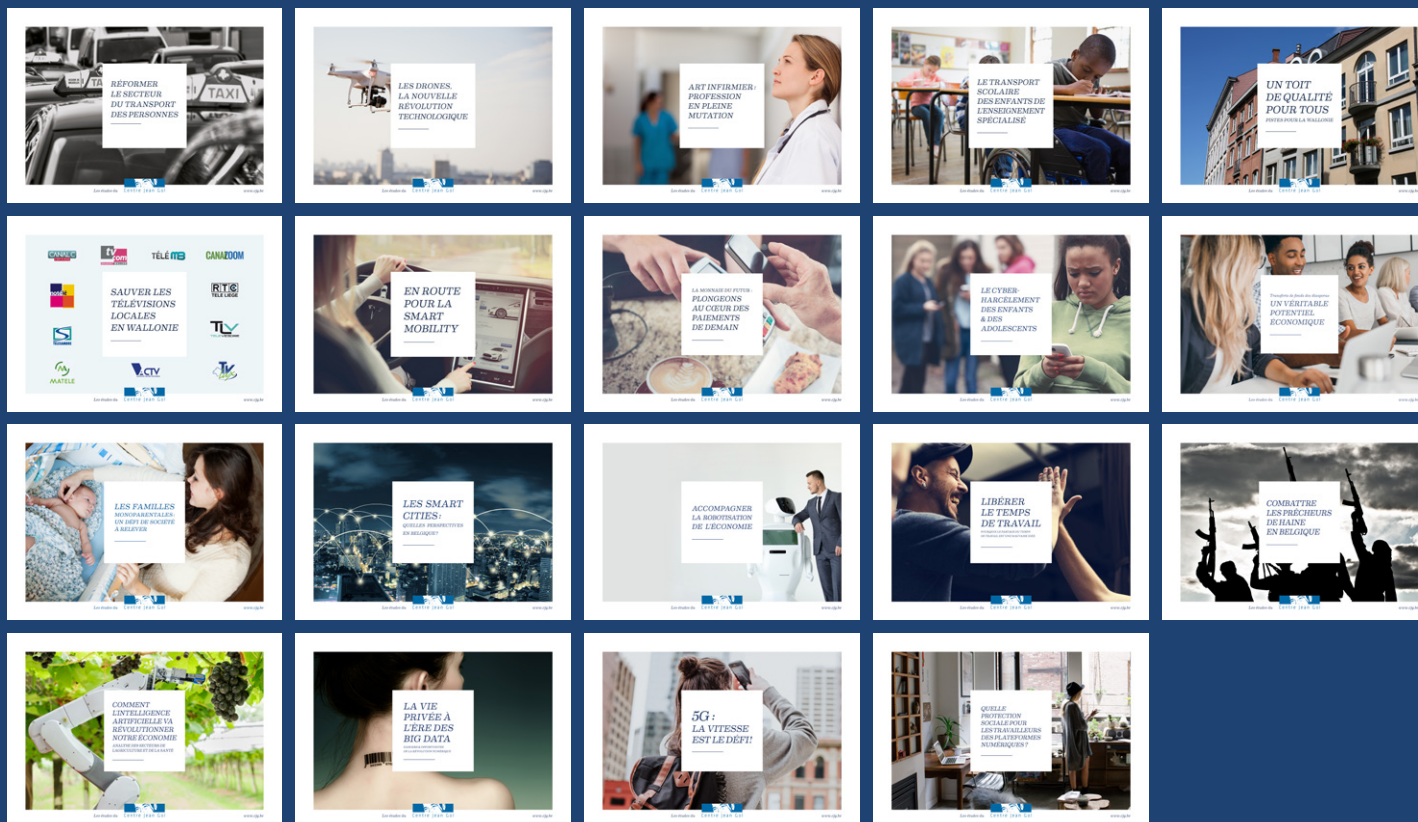
Worldatlas. (2019). *Largest landfills, waste sites, and trash dumps in the world*. <https://www.worldatlas.com/articles/largest-landfills-waste-sites-and-trash-dumps-in-the-world.html>

Yuka. (2017). *Halte aux emballages toxiques !*

05/	INTRODUCTION
08/	I. COMMENT SONT GÉRÉS LES DÉCHETS EN PLASTIQUE ?
14/	II. COMMENT SONT PRODUITS LES PLASTIQUES CONVENTIONNELS ?
17/	III. L'ALTERNATIVE DES « BIOPLASTIQUES ».
23/	IV. PRODUIRE DU PLASTIQUE À PARTIR DE CO₂ CAPTURÉ EST-ELLE UNE VOIE D'AVENIR ?
28/	CONCLUSIONS
30/	BIBLIOGRAPHIE

Editeur responsable : Richard Miller,
Centre Jean Gol
Avenue de la Toison d'Or, 84-86
1060 Bruxelles

Retrouvez toutes nos études sur **cjg.be** ou demandez-nous gratuitement un exemplaire par téléphone ou par mail



Centre Jean Gol

Avenue de la Toison d'Or 84-86 1060 Bruxelles • 02.500.50.40 • info@cjg.be • [facebook.com/centrejeangol](https://www.facebook.com/centrejeangol) • [@CentreJeanGol](https://twitter.com/CentreJeanGol)

www.cjg.be