



HAL
open science

Plastiques en transition : De la fin du fossile à la circularité

Rémi Grimaud, Robin Girard

► **To cite this version:**

Rémi Grimaud, Robin Girard. Plastiques en transition : De la fin du fossile à la circularité. Ecole nationale Supérieure des mines de Paris. 2024. hal-04702688

HAL Id: hal-04702688

<https://hal.science/hal-04702688v1>

Submitted on 19 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

JUILLET 2024



| PSL 

Zen n
Research

Plastiques en transition

De la fin du fossile à la circularité

Un modèle économique à bout de souffle

Le modèle économique et industriel qui a prévalu ces dernières décennies a **apporté un confort de vie** inégalé aux pays de l'OCDE. Il **révèle aujourd'hui ses limites**, en raison notamment de son **caractère linéaire**.

Ce système qui repose sur l'extraction, la transformation, l'utilisation et le rejet des matières, sous formes de matériaux ou d'énergie, engendre des **conséquences environnementales préoccupantes**.

Le cas du plastique

L'un de ces défis majeurs est celui de la production, de la consommation et de la fin de vie des plastiques.

La circularité des matières plastiques se décline en plusieurs niveaux, tous importants.

- Le premier niveau est celui de la **sobriété**, impliquant de rationaliser notre consommation d'objets plastiques particulièrement ceux à **usage unique**. Elle passe par la réglementation, dont l'UE est un moteur important.
- Ensuite, il faut **penser le design** et à la composition des objets pour qu'ils puissent **vivre plus longtemps et être plus facilement recyclés/réutilisés**. Là aussi la réglementation est un facteur clé, les acteurs ayant besoin de visibilité.
- Enfin, il faut **améliorer l'efficacité de la collecte et du tri**.
- Malgré les efforts déployés, **le recyclage mécanique** est loin de permettre le traitement de l'ensemble des déchets plastiques, en particulier à cause de **l'extrême diversité** des compositions chimiques (polymères et additifs) et de la **complexité des arrangements physiques** des objets (multicouches notamment).
- Le recours au **recyclage chimique** peut être l'une des solutions, mais il implique un **surcoût économique**, des **pertes de matière** (+ de 50%) et **énergétiques** importantes, en sus de difficultés techniques.

L'extraction et l'utilisation des ressources fossiles libèrent le carbone initialement stocké, **contribuant à l'effet de serre et au réchauffement** de notre planète.

Face à ces défis, la **transition vers un modèle économique circulaire** apparaît comme une solution viable pour **réduire notre impact** sur le climat tout en **préservant notre qualité de vie**.

Puisqu'il n'est pas la solution miracle, Il faut **développer des moyens de production d'énergie bas carbone** tout en maximisant les avantages des autres leviers amont.

Au-delà, des aides publiques, l'obligation **d'incorporation de matières recyclables** et les limitations intrinsèques du recyclage mécanique dessinent un modèle économique pour le recyclage chimique. Cette perspective ne doit pas servir de prétexte pour éviter toute ambition sur l'écodesign*.

Enfin, **la circularité ne pourra pas tout résoudre**. Il importe donc, en plus de la sobriété, de travailler à décarboner à la fois la filière de traitement des déchets en aval, par exemple avec des **systèmes de capture** en sortie d'incinérateur, et de la **production décarbonée** de plastique vierge reposant sur l'utilisation de e-méthanol ou de bio-méthanol par exemple. D'autres technologies sont présentées dans ce rapport.

C'est donc un **mix de solutions qu'il faut développer** dans une filière d'une très grande complexité qui implique un grand nombre d'acteurs différents (de grands industriels du pétrole, des entreprises utilisatrices de plastiques, des citoyens utilisateurs, des gestionnaires de déchets). Ce **mix doit être encouragé par des mesures politiques claires et sur le long terme, appuyées sur des analyses technico-économiques intégrant l'ensemble des besoins et des impacts**.

*Illustré récemment par l'affaire des pots de yaourt, voir « La réalité du recyclage polystyrène contestée » L'Usine Nouvelle, 18 juin 2024

Sommaire

01	Développement du plastique	5
	Le boom mondial d'un matériau récent	6
	Un secteur européen fort mais stabilisé	6
	L'origine simple d'un matériau complexe	6
	Problème ou solution pour l'avenir	7
<hr/>		
02	Cycle de vie et économie	8
	Du carbone aux polymères	9
	Différents types de plastiques	9
	Fin de vie du plastique	10
	Flux des matières plastiques en Europe	10
	Economie du plastique	10
<hr/>		
03	Entre pollution et utilité	11
	Un matériau source de nombreuses pollutions	12
	Une économie linéaire	12
	Entre incinération et enfouissement	12
	Le problème des plastiques à usage unique	12
	Des micro-plastiques générés dès l'usage	12
	Des additifs et autres substances	13
	Un impact carbone	13
	Une multitude d'impacts sur notre environnement	13
	Un matériau aux nombreux avantages	14
	L'usage unique au cœur du problème	14
	Le plastique dans la transition : gros bénéfiques, petits volumes	15
	Les besoins de la transition européenne	15
	Le plastique des éoliennes	15
<hr/>		
04	Vers le Net Zéro	16
	Émissions de gaz à effet de serre du plastique	17
	Les différents leviers possibles	18
	Une transformation à tous les niveaux	18
	Scénario européen	19
	Que dit la réglementation européenne	19

05	Plus de Circularité	20
	Les différentes boucles de recyclage	21
	La collecte	21
	Le design d'objet	21
	Des innovations à venir pour le triage	22
	Le recyclage mécanique	22
	Le recyclage physique	22
	Le recyclage chimique	23
	Dépolymérisation	23
	Thermochimique	23
	Projets européens	24
	Dérivés	24
	Les produits	25
	Emissions de gaz à effet de serre	25
	Coût du recyclage	26
	Conclusion graphique, recyclage	26

06	Vers une production plus durable	27
	Limite de la circularité	28
	Retrofit	28
	La biomasse comme source de carbone	29
	Technologies	29
	Stockage de carbone	29
	Nouvelle filière	29
	Le CO ₂ comme source de carbone	30
	Entre énergie et ressources	31
	Comparaison des différentes technologies	32
	Différents moyens de production Complexité	32
	de la variété de plastiques Conclusion	33
	graphique, circularité du plastique Acteurs du	33
	secteur	34

07	Ouverture	35
	La transition de notre économie	36
	Mise en exergue par le plastique	36

08	Annexes et Bibliographie	37
	Annexes	38
	Bibliographie	40



01

Développement du plastique

Le boom mondial d'un matériau récent

Un secteur européen fort mais stabilisé

L'origine simple d'un matériau complexe

Problème ou solution pour l'avenir

« Le plastique est tout entier englouti dans son usage : à la limite, on inventera des objets pour le plaisir d'en user. »
 Roland Barthes, *Mythologies - Le Plastique*, 1956.

Le boom mondial d'un matériau récent

L'invention des premiers plastiques remonte assez loin et peut-être même à l'Antiquité lorsque les Égyptiens employaient des colles à base de gélatine d'os, de caséine de lait, d'albumine d'oeuf... mais l'on date souvent du XIX^{ème} siècle la conception, grâce à un procédé chimique, du nitrate de cellulose par le français Henri Braconnot, qui est utilisée de manière industrielle à partir de 1868 par les frères Hyatt pour la fabrication de boules de billard. La production industrielle du plastique, qui débute avant la Seconde Guerre mondiale, connaît une réelle explosion au début des années 1960.

Ce matériau a rapidement pris une place importante en tant que **substitut majeur à de nombreux autres** et même si les presque 500 Mt/an que l'on produit aujourd'hui dans le monde sont moindres que le ciment (4500 Mt) ou l'acier (1800 Mt), le volume occupé par le plastique est plus important que celui de l'acier.

La croissance du plastique, autour de 6,5%/an entre 2000 et 2020, a surpassé celle du PIB mondial sur la même période (2,8 %/an)³ et elle est actuellement plus importante que celle de l'aluminium, de l'acier et du ciment⁴ tirée par des secteurs clés tels que l'automobile, la construction et l'emballage et par des pays en

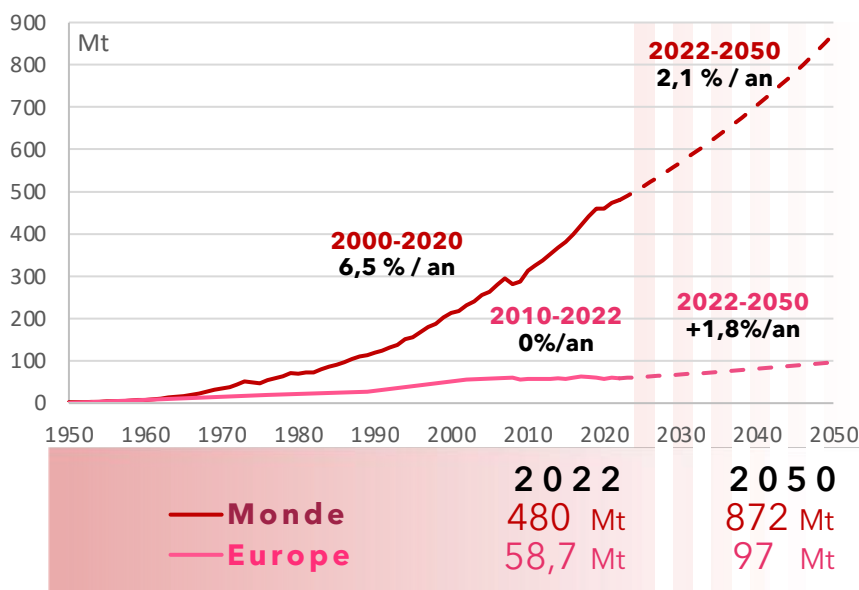
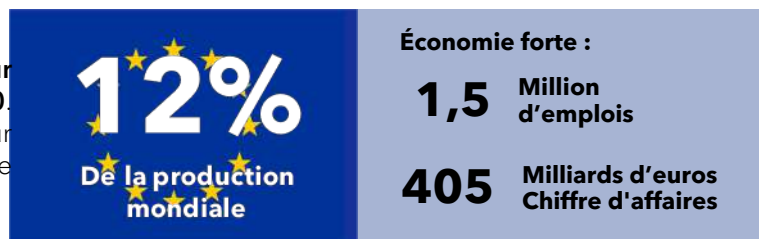


Fig. 1. Production mondiale et Européenne de plastique de 1950 à 2060 d'après les données de OurWorldInData^{34 64} et des estimations de l'OCDE⁶³

développement tels que l'Inde⁵, qui utilise environ 20 fois moins de plastique que l'Europe. Les projections de l'OCDE sont vertigineuses et annoncent que la production mondiale de plastique pourrait dépasser la gigatonne d'ici 2060⁶.

Un secteur européen fort mais stabilisé

La production plastique européenne qui a été une des premières au monde est aujourd'hui stable autour de 60 millions de tonnes par an depuis les années 2000. Son solde importateur légèrement excédentaire autour de 6 millions n'empêche pas une balance commerciale positive d'environ 8 milliards d'euros^{7,8}.



L'origine simple d'un matériau complexe

Il y n'y a pas un plastique mais des plastiques, obtenus par des procédés thermochimiques complexes et variés. Pourtant, à l'exception des plastiques recyclés, ils sont aujourd'hui tous obtenus à partir de petites molécules carbonées insaturées, comme l'éthylène ou le propylène, qui sont produites par un unique procédé : le vapocraquage du naphta. Le naphta est un pétrole léger, environ 2.5% de naphta est obtenu lors du raffinage du pétrole.

Box 1 - Pour l'industrie pétrolière le plastique est une planche de salut

La baisse à venir de la demande de pétrole brut⁶ devrait contraindre la phase de raffinage, les autres coupes du pétrole brut, comme l'essence ou le diesel utilisées dans le transport pourraient également devenir des matières premières pour la production de plastiques⁹. Aussi, **les industriels du pétrole pourraient chercher à réduire la perte de marge en orientant leur activité vers la fabrication de produits chimiques de base.** De grandes entreprises pétrolières telles qu'ExxonMobil et Shell considèrent la pétrochimie

comme une activité en croissance, de même Saudi Aramco et SABIC ont récemment annoncé un grand projet de conversion du pétrole en produits chimiques de 0,4 million de barils par jour (mb/j), cinq fois la taille de la seule installation existante à Singapour. Cette dynamique s'exprime déjà aujourd'hui, **les plastiques sont la source de consommation de pétrole à la croissance la plus rapide.**

Problème ou solution pour l'avenir

Le plastique joue un rôle important dans la transition énergétique, il permet notamment d'alléger les structures, et parfois de faire des économies d'énergies.

Mais il est aussi à l'origine de nouveaux usages discutables et de pollutions très problématiques parmi lesquelles un fort impact sur le dérèglement climatique.

5 à 8 Tonnes /MW de plastique nécessaire par MW de puissance renouvelable installée



23 Millions de tonnes Pollution océanique



Stérilité

Le plastique à usage unique permet de garantir la stérilité des équipements de santé et réduit la propagation des maladies.



1,8 Giga tonnes

Émissions GHG annuelles du secteur Scope 1,2,3



Quels sont les enjeux technologiques et environnementaux autour de cette filière, c'est ce que nous allons discuter dans ce document.

02

Cycle de vie et économie

Du carbone aux polymères
Différents types de plastiques
Fin de vie du plastique
Flux des matières plastiques en Europe
Economie du plastique

Du carbone aux polymères

Le plastique, composé principalement de carbone, résulte d'un processus complexe de transformation des chaînes carbonées. Actuellement, le procédé de production prédominant implique l'utilisation d'hydrocarbures tels que le naphta, qui est un dérivé du raffinage du pétrole, soumis à une opération de craquage

pour obtenir des chaînes carbonées (C_nH_n) plus courtes, appelées monomères (entre 2 et 4 atomes de carbone). Ces monomères sont ensuite assemblés pour former des polymères. Après l'éventuelle incorporation d'additifs, tels que des colorants, le matériau résultant, le plastique, est façonné en divers objets.

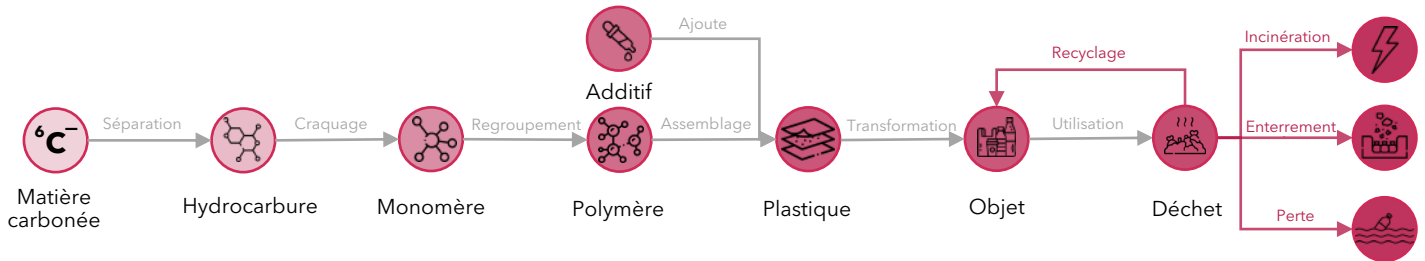


Fig. 2. Chaîne de vie du plastique

Différents types de plastiques

Les plastiques sont présents dans notre quotidien sous des formes multiples. Le mot désigne un vaste ensemble de polymères assortis d'additifs (colorant, agent ignifuge...). **Actuellement, il existe plus d'une trentaine**

de polymères plastiques, chacun présentant des propriétés distinctes. Ils se déclinent dans une multitude d'applications, soulignant la polyvalence de ce matériau omniprésent.

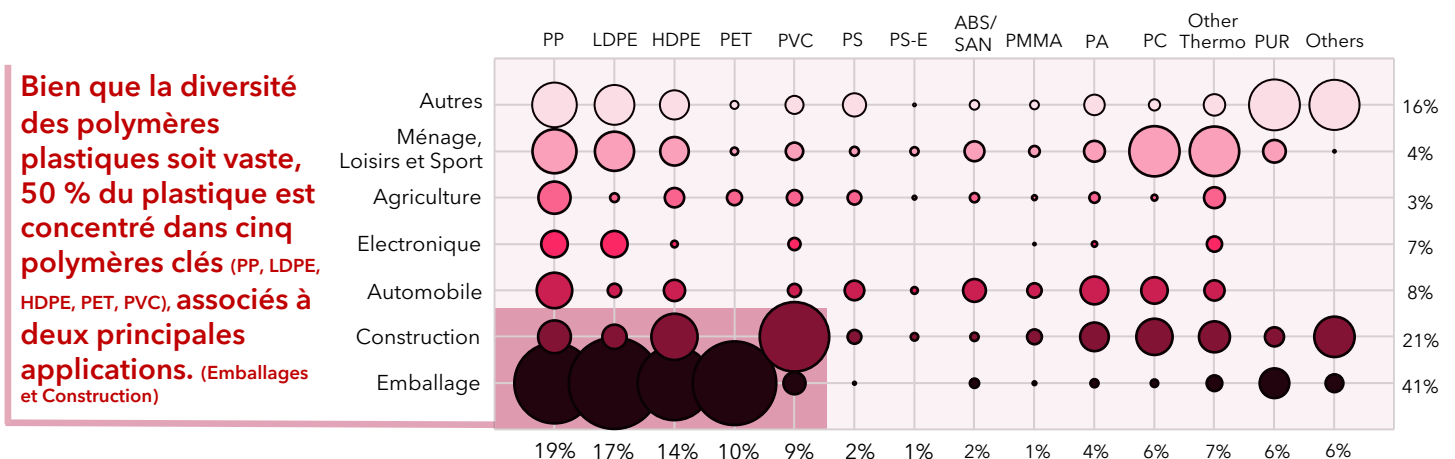


Fig. 3. Répartition des plastiques européens en fonction des différents secteurs, graphique adapté de Plastics Europe ⁶⁷

Box 2 - Derrière les désignations

Les principaux polymères utilisés actuellement le sont tous dans les emballages, à l'exception du PVC, principalement employé dans le domaine de la construction.

PP - Polypropylène



Propriétés

Rigide, Résistant choc et aux produit chimique
Hydrophobe



Usages

Emballages alimentaires,
Boîtiers, Circuits imprimés,
Tuyaux

LDPE - Polyéthylène basse densité



Propriétés

Souple
Translucide



Usages

Sacs plastiques,
Films plastiques,
Câbles électriques

HDPE - Polyéthylène haute densité



Propriétés

Rigide, Opaque,
Hydrophobe, Thermo
résistant



Usages

Bouteilles, Récipients,
Bidons d'huile,
Réservoirs

PET - Polytéraphthalate d'éthylène



Propriétés

Leger, Étanche,
Transparent



Usages

Bouteilles, Rembourrages,
Cartes de crédit,
Vêtements

PVC - Polychlorure de vinyle



Propriétés

Anticorrosif, Rigide,
Dur



Usages

Tuyaux,
Contours de fenêtre,
Mousses isolantes

Fig. 4. Tableau présentation des principaux polymères ^{70 20}

Fin de vie du plastique

Une fois les plastiques utilisés, ils deviennent des déchets. **L'Europe produit 43 millions de tonnes de déchets chaque année, dont seulement 7,1 millions de tonnes sont actuellement recyclés**, principalement par un processus de recyclage dit mécanique. De ce fait, **le taux d'incorporation des matières recyclées dans les produits neufs en 2021 est seulement de 10%**¹⁰, donc très loin de l'objectif de 50 % fixés par l'Europe pour

2025. En Europe, environ **52 % des plastiques sont incinérés** pour produire de l'électricité. **La dernière partie de ces déchets, ne pouvant pas actuellement être valorisée, est enfouie.** Enfin, une fraction des déchets échappe au suivi : ils finissent souvent dans les cours d'eau ou les océans, contribuant ainsi aux problèmes de pollution marine.

Flux des matières plastique en Europe

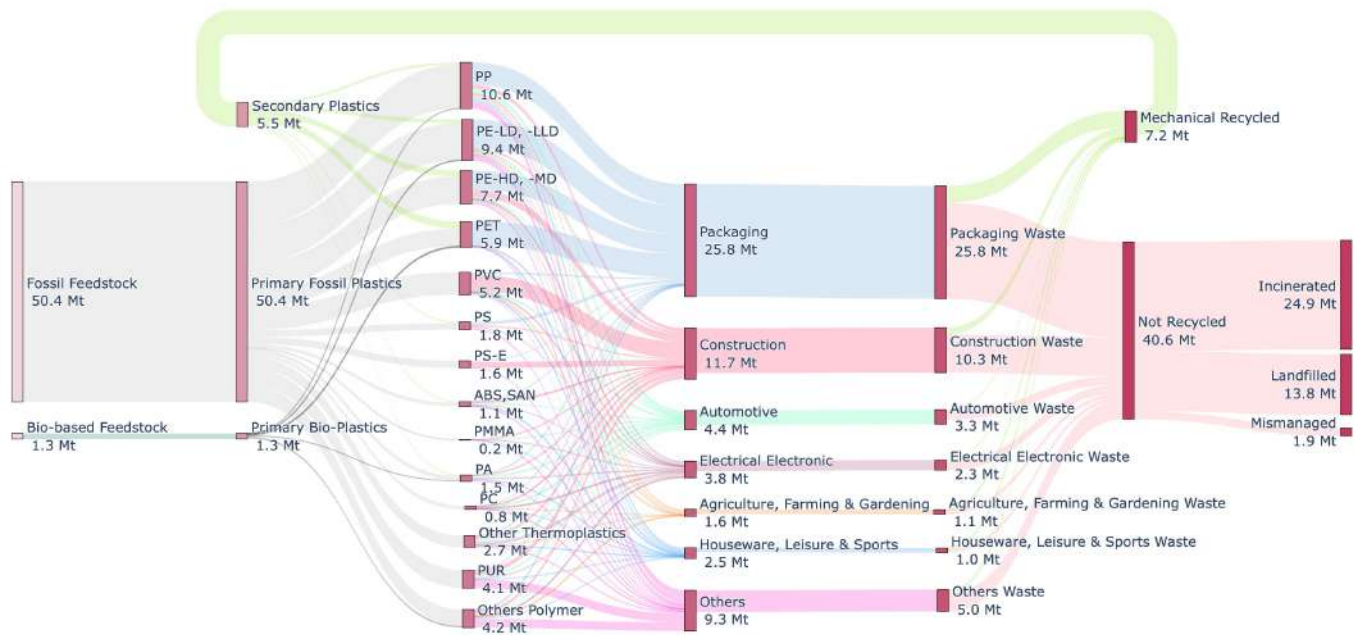


Fig. 5. Diagramme de Sankey de l'économie du plastique en Europe, Données ^{50 81 68}

Le diagramme se lit de gauche à droite, indiquant d'abord l'origine de la matière carbonée, qu'elle soit primaire ou secondaire. Ensuite, il présente les divers types de plastiques issus de cette matière, puis leur utilisation dans différents secteurs. Les déchets générés par ces secteurs sont ensuite représentés. La différence entre les flux entrant et les déchets s'explique par les différentes durées de vie des différents objets. Enfin, le cycle se termine avec la fin de vie des plastiques, incluant une boucle pour le recyclage. La largeur des flèches est proportionnelle aux volumes représentés, mais la quantité est basée sur la production de plastique finale, sans tenir compte des pertes de matière, qui ne sont représentées que pour le recyclage.

Les données sont issues de différentes sources, les hypothèses prises et les données utilisées sont disponibles sur demande

Economie du plastique : une grande perte de valeur à l'usage.

Sur le plan économique, à chaque cycle, le **plastique perd une grande partie de sa valeur**. Le prix du plastique vierge est aujourd'hui d'environ 1,7€/kg, cela se traduit par une valeur totale de 90,7 milliards d'euros en entrée pour l'Europe en 2021. À la fin du cycle, en prenant en compte une valorisation économique par l'incinération et par le recyclage, la valeur n'est plus que de 7,8 milliards d'euros, soit une **perte de 91% de sa valeur économique initiale**. En comparaison, l'aluminium et l'acier conservent environ 70 % de leur valeur après un cycle en Europe, d'après une étude de Materials Economic¹¹. La perte de valeur à chaque itération du cycle de vie du plastique révèle une

inefficacité économique et provoque une pression accrue sur les ressources naturelles¹².

Dans les années à venir, le défi majeur sera de promouvoir une économie beaucoup plus circulaire des plastiques. Cette approche vise à préserver la valeur des produits, des matériaux et des ressources en les réintégrant dans le cycle de production le plus longtemps possible.

Un autre levier important et nécessaire est **la réduction de l'utilisation des plastiques** lorsque cela est possible et l'augmentation de la durée de vie des objets. A ce titre, l'évitement des plastiques à usage unique est un levier important.



03

Entre pollution et utilité

Un matériau source de nombreuses pollutions

Une économie linéaire

- Entre incinération et enfouissement

- Le problème des plastiques à usage unique

- Des micro-plastiques générés dès l'usage

- Des additifs et autres substances

- Un impact carbone

Une multitude d'impacts sur notre environnement

Un matériau aux nombreux avantages

L'usage unique au cœur du problème

Le plastique dans la transition :
gros bénéfices, petits volumes

- Les besoins de la transition européenne

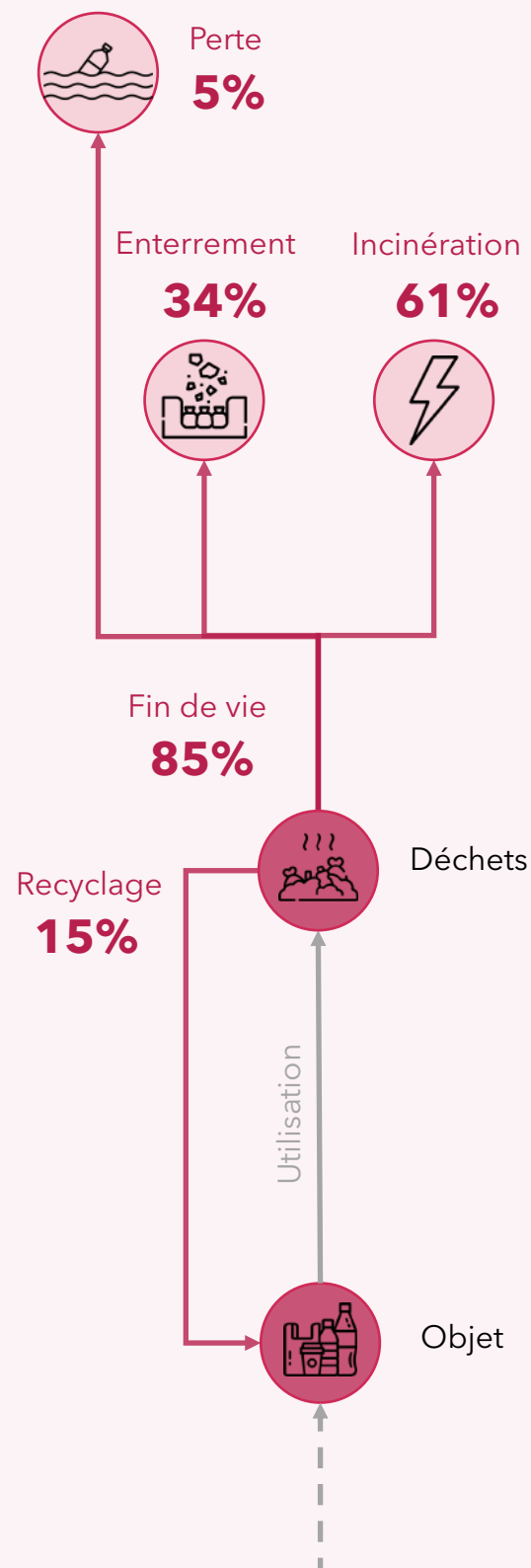
- Le plastique des éoliennes

Un matériau source de nombreuses pollutions

L'économie du plastique, telle qu'elle est actuellement représentée dans le diagramme de flux, soulève des préoccupations majeures en termes d'impact sur l'environnement et d'inefficacité économique. Le caractère linéaire du modèle traditionnel, consiste en une succession d'étapes allant de l'extraction des

ressources du sol à la fabrication, puis à l'élimination, créant ainsi un cycle répétitif présentant trois problèmes majeurs : la nécessité de récupérer des matières vierges, l'utilisation d'énergie pour recommencer le processus, la gestion des déchets produits¹³.

Fig 7.1. Traitement des déchets dans l'économie linéaire du plastique en Europe aujourd'hui



Une économie linéaire avec des pertes importantes

Une des pollutions importantes générée par les plastiques est liée à la fin de vie des plastiques. En Europe 5% des déchets plastiques ne sont pas gérés. Ils finissent dans la nature, s'écoulent dans les rivières et pour beaucoup terminent leur course dans les océans. A l'échelle mondiale ce sont 23 Mt de plastique qui s'ajoutent à l'océan chaque année. Dans les océans¹⁴, on présente souvent les soupes de plastiques, ces accumulations de surface provoquées par les courants, comme dans le Pacifique Nord où la surface couverte est 4,5 fois celle de l'Allemagne. Mais ces débris de surface ne sont que 1% des plastiques qui se retrouvent dans l'océan et le reste a des impacts importants sur la biodiversité : ils sont ingérés par les poissons, se décomposent en micro et en nano plastiques... on maîtrise encore mal l'étendue de l'impact actuel et futur du plastique dans l'océan, mais il est très préoccupant.

Une différence d'impact entre incinération et enfouissement

L'incinération peut permettre une valorisation énergétique des plastiques puisqu'elle dégage de la chaleur. Mais cette étape est à l'origine d'une grande partie des émissions de CO₂ fossile du secteur, alors qu'ils ne représentent qu'une petite partie des déchets entrant dans ces installations (~15% en France d'après Veolia, plus en Europe). En effet, chaque tonne de plastique est responsable de l'émission de 2.7 tonnes de CO₂ fossile (en moyenne, car cela dépend des résines, voir Annexe 1 et Figure 13 Section suivante). A l'inverse, l'enfouissement peut être considéré comme un stockage de carbone et il ne faut pas le confondre avec la dispersion des déchets dans l'environnement. En effet, les déchets enfouis sont gérés dans des casiers de stockage dédiés, isolés du milieu naturel par différentes barrières hautement étanches. D'autre part, une fois enfouis, les plastiques sont très stables et ne génèrent aucune émission de gaz à effet de serre.

Le problème des plastiques à usages uniques

La gestion en fin de vie est d'autant plus cruciale en raison de la caractéristique spécifique du plastique, qui se distingue des autres matériaux par sa durée d'utilisation très courte¹⁵. En effet, 40% du plastique en circulation a une durée d'utilisation inférieure à un an¹⁶, tandis que sa durée de vie complète peut s'étendre sur plus de quatre siècles avant de se décomposer entièrement. Cette brièveté d'utilisation, notamment dans le cas des emballages à usage unique, génère d'importants flux de déchets difficiles à traiter¹⁷.

Des micro-plastiques générés dans la phase d'usage

Les pertes en fin de vie ne sont que la moitié des micro-plastiques présents dans la nature (moins de 5 mm). En effet, la moitié restante est générée lors de la phase d'usage avec un tiers produit par l'usure des pneus et un tiers par des microplastiques issus des eaux de machines à laver le linge.

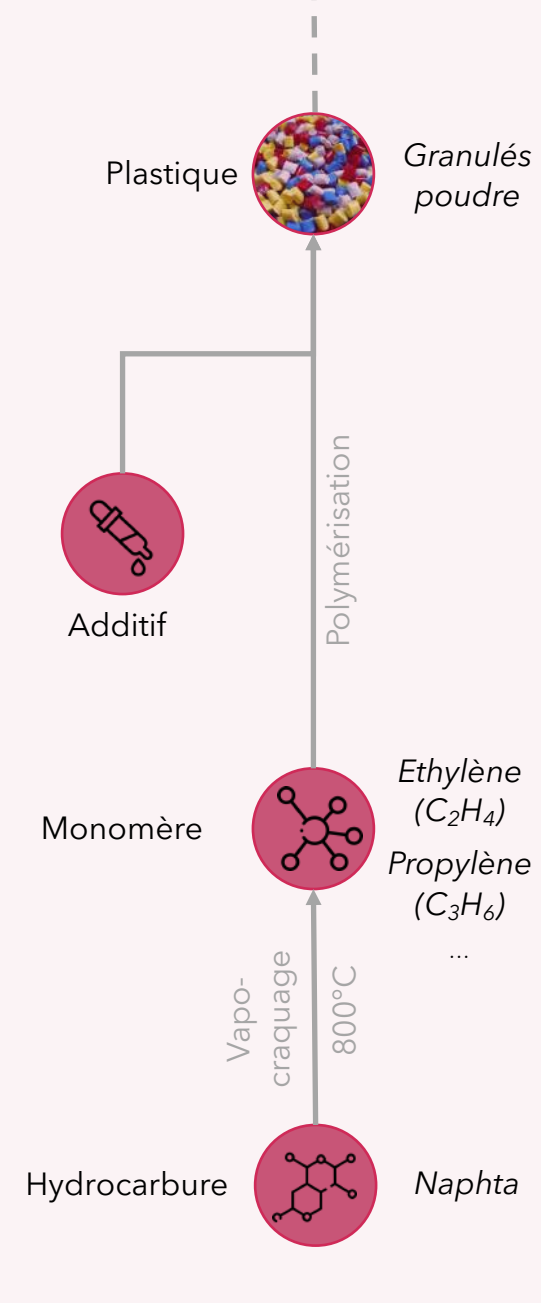


Fig 7.2 Chaîne des procédés en jeu dans la fabrication d'un objet en plastique

Des additifs et autres substances

Les plastiques sont des polymères auxquels des additifs ou d'autres substances ont pu être ajoutés, capables de servir de principal composant structurel de matériaux et d'objets finaux (Cf. définition article 3 al. 2 du règlement UE n°10/2011 du 14 janvier 2011). Les additifs peuvent représenter une part importante d'un plastique, entre 4 et 30 % en moyenne selon les plastiques (et plus dans certains cas). Ces additifs peuvent avoir de très nombreuses fonctions : ils sont colorants, régulateurs de viscosité, plastifiants, anti-oxydants, stabilisants UV, anti-microbiens ... Sur les 4000 types d'additifs connus seulement 900 sont autorisés par l'Union européenne pour le contact alimentaire. **Beaucoup de ces additifs se retrouvent dans la nature avec des impacts sanitaires peu étudiés ou maîtrisés.** Ces additifs sont aussi un enjeu dans la filière de recyclage mécanique dont nous parlerons plus tard.

Un impact carbone

Un des impacts majeurs du plastique, souvent oublié derrière la pollution environnementale concerne les émissions de gaz à effet de serre : dès le processus de production du plastique, nécessitant une consommation importante d'énergie (110 GJ/t)¹⁸ qui est aujourd'hui carbonée, des émissions de gaz à effet de serre sont donc générées¹⁹. Concernant la fin de vie du plastique, il est aujourd'hui peu recyclé. Par conséquent, lorsqu'il est incinéré pour la production d'énergie, le carbone originellement stocké dans le matériau est directement émis. L'incinération, bien qu'émettrice, permet de prévenir la pollution causée par les méthodes d'enfouissement et de dispersion dans l'environnement. **En prenant en compte l'entièreté du cycle de vie du plastique, ces émissions représentent près de 4% des émissions mondiales**²⁰.

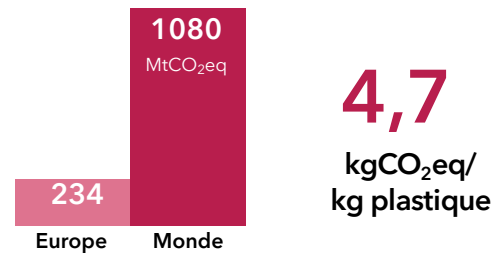


Fig. 8. Graphique des émissions de GHG Mondial et Européenne en MtCO₂eq
Source : Annex 1

Une multitude d'impacts sur notre environnement

Derrière la commodité apparente de ce matériau omniprésent se cachent des réalités environnementales nombreuses et très préoccupantes. Elles se regroupent sous différentes catégories représentées Figure 2. Ces différents impacts environnementaux surviennent à différentes étapes du cycle de vie du plastique, soulignant que chaque phase, de la production à la gestion en fin de vie, a des conséquences écologiques significatives.

Toxicité			Dégradation environnement		
Ecosystème		Humaine	Eutrophisation		Acidification
Terrestre	Marine	Eau douce	Marine	Eau douce	pH
Ozone			Ressources		Climat
Épuisement	Ozone photochimique	Épuisement fossile	Rareté de l'eau	Utilisation terre	GES Émissions

Fig. 9. Tableau des impacts du plastique, inspiré de l'OCDE⁵ et de l'ICCA²¹

Un matériau aux nombreux avantages

Les divers polymères sont omniprésents dans de nombreux secteurs, mais leur utilisation actuelle est particulièrement marquée dans les emballages et la construction (voir **figure 4**). Cette prédominance s'explique par leurs **propriétés avantageuses, associées à des avantages économiques substantiels**. Cependant, les plastiques présentent également d'autres avantages, y compris sur le plan environnemental.

Le faible poids, par exemple, contribue à des **efficacités énergétiques** améliorées, les rendant difficilement remplaçables par d'autres matériaux, comme en témoigne l'application du polyéthylène dans les pales d'éoliennes et diverses pièces de véhicules. En outre, leurs **propriétés isolantes, telles que celles du polystyrène expansé (PS-E), sont exploitées dans l'isolation** extérieure des bâtiments.

Au-delà du domaine de l'énergie, **les plastiques ont révolutionné le secteur médical** en introduisant des solutions à usage unique, **garantissant la stérilité et limitant la propagation des maladies**. Ils ont également contribué à **la lutte contre le gaspillage alimentaire** en améliorant la conservation des aliments.

Face à ces avancées, **la substitution de ces matériaux s'avère complexe et nécessite une réévaluation de certaines pratiques**. Lorsqu'une substitution n'est pas envisageable, une stratégie raisonnable serait la décarbonation de ces matériaux.

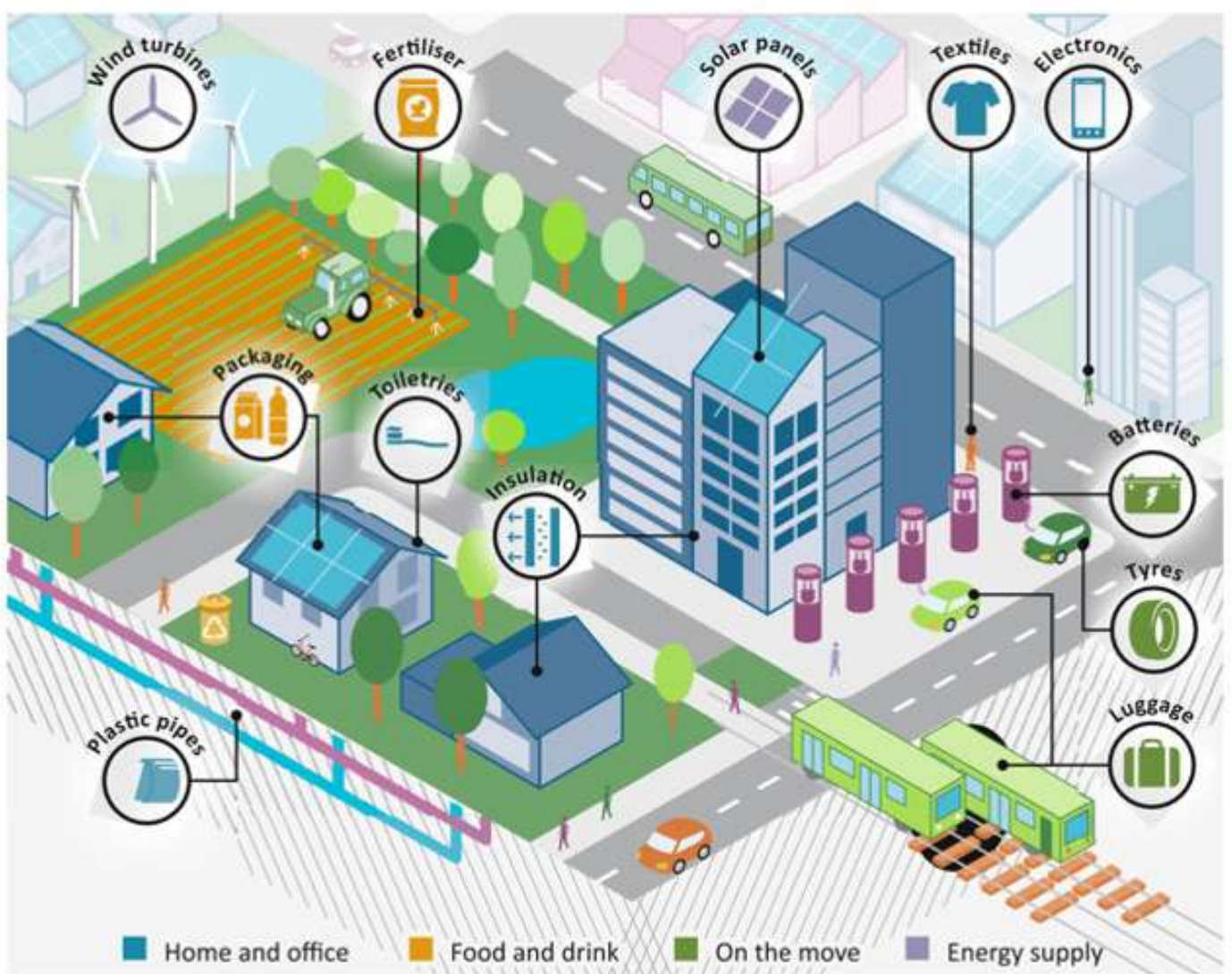


Fig. 10. Présence du plastique dans la société, et besoin pour la transition, Source : IEA

L'usage unique au cœur du problème

Le plastique est mis en avant comme une solution plus performante que ses alternatives dans bon nombre de cas de figures²² sur le plan des émissions de gaz à effet de serre, mais les autres pollutions sont écartées et les seules alternatives considérées sont les métaux, le verre et le papier sur le même type d'usage. Sur les bouteilles

en plastique par exemple, **l'enjeu n'est pas tant de discerner entre le plastique le verre ou l'aluminium mais bien d'éviter l'usage unique partout où il peut l'être**. Le même constat peut être fait pour les sacs à usage unique.

Le plastique dans la transition, gros bénéfices, petits volumes

Selon une étude de l'ICCA (International Council of Chemical Association), **ces divers avantages pourraient potentiellement éviter jusqu'à 2,5 GtCO₂eq par an à l'échelle mondiale d'ici 2030.**^{21,23,24,25}

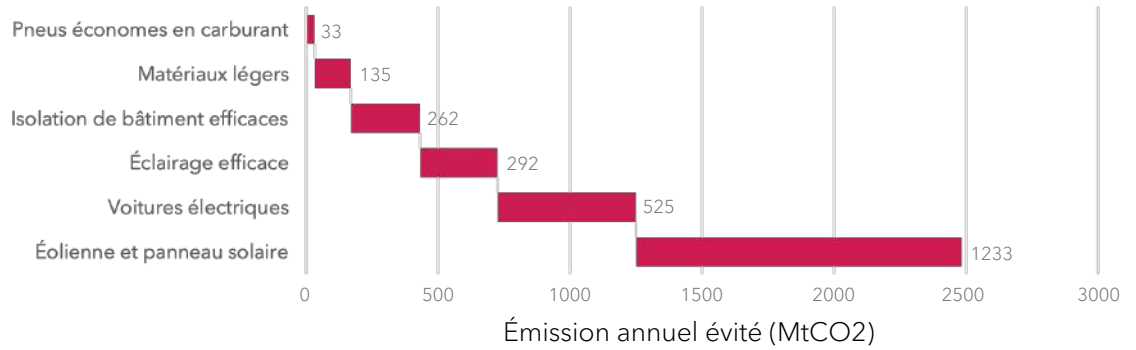


Fig 11 : Contribution des solutions de décarbonation utilisant du plastique aux réductions de GES à l'horizon 2030 dans un scénario de limitation de l'augmentation des températures à 2°C. Source : Etude ICCA- Ecofys 2017.

Les besoins de la transition européenne

Ces bénéfices importants du plastique ne légitiment pourtant pas une partie importante de nos usages du plastique. En effet, si l'on prend l'exemple de l'éolien, il faut aujourd'hui 5t de fibre de verre par MW installé²⁶. Ainsi, l'installation de 10 GW/an en Europe d'ici 2030 impliquerait l'utilisation de 50kt/an **c'est à dire 0.1% des 50Mt/an consommés aujourd'hui**. La production éolienne permettrait à elle seule de réduire les émissions d'environ 60 Mt de CO₂ sur l'année 2030, soit 3% des 3 GtCO₂ émises en Europe aujourd'hui sur une année*. **Le même type de raisonnement peut être fait pour le PV** : Il faut environ 8t de plastique/MW de centrale photovoltaïque installée²⁶, c'est un petit peu plus que l'éolien, mais dans le PV le plastique est plus facile à recycler.

L'installation des éoliennes en Europe permettent...



-60 MtCO₂eq
En 2030



5 Tonnes /MW

Avec une consommation plastique des éoliennes

Représentant uniquement

0,1

% de la production européenne actuelle de plastique



Le plastique des éoliennes

Ce sont les pales d'éoliennes qui nécessitent du plastique. Elles sont fabriquées à partir d'un composite thermodurcissable en fibre carbone ou fibre de verre avec de la résine époxy ou du polyester. Les recherches actuelles visent :

- **au recyclage de la fibre de verre**, soit par des procédés mécanique (refaire de la fibre avec de bonnes propriétés²⁷, ou en utilisant la fibre de verre pour la fabrication du ciment), soit par des procédés chimiques (par exemple par dissolution de la résine²⁸).
- **à la fabrication de pales à partir de plastique recyclé** ou dans un plastique recyclable. C'est l'objectif du projet Zebra de LM Wind power²⁹.

Ces technologies sont déployées dans des démonstrateurs industriels mais il est difficile de connaître leur durabilité, ainsi que le surcoût et les performances associés.

* Hypothèses de calcul : un GW d'éolien permet de produire 2 TWh/an d'électricité bas carbone, laquelle permet d'éviter 1Mt CO₂ lié par exemple à une production de charbon ou de gaz diminuée



04

Vers le Net Zéro

Émissions de gaz à effet de serre du plastique

Les différents leviers possibles

Une transformation à tous les niveaux

Scénario européen

Que dit la réglementation Européenne

Portons notre attention sur les diverses stratégies visant à transformer l'économie actuelle afin d'atténuer les problèmes qu'elle génère. **Ce rapport se focalise exclusivement sur les mesures nécessaires pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, tout en reconnaissant les multiples pollutions et autres contraintes environnementales causées par le plastique.**

Émissions de gaz à effet de serre du plastique

Chaque étape du cycle de vie du plastique émet du CO₂ : production de pétrole, raffinage, production de polymères. Ces trois premières étapes, constituant la phase de production, représentent la principale source d'émissions due à une consommation élevée d'énergie, totalisant 83% des émissions totales. Enfin, une fois devenu déchet, le recyclage et l'incinération du plastique contribuent également aux émissions de CO₂.^{30,31}

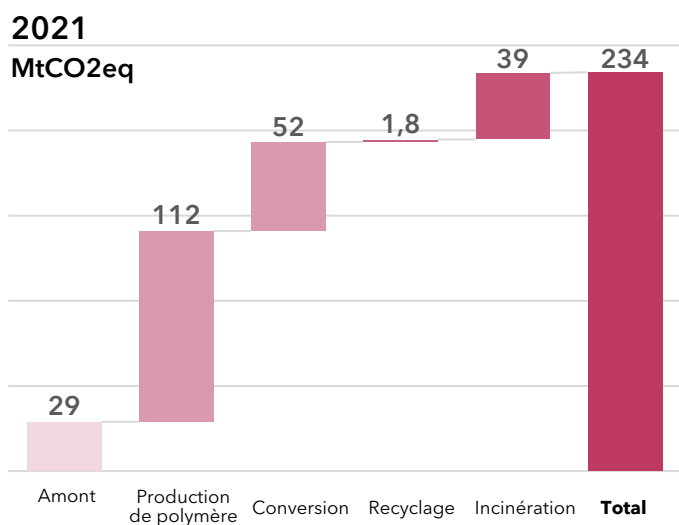


Fig. 12. Diagramme de cascade des émissions du secteur du plastique européen, voir Annexe 1

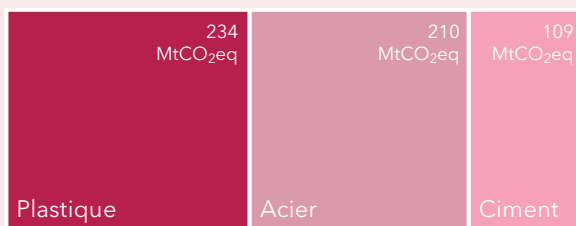
En 2021, les émissions de plastique en Europe se chiffrent à 234 MtCO₂eq, en prenant en compte les émissions sur l'ensemble du cycle de vie.^{10,34}

L'industrie plastique, en raison de ses besoins en matière carbonée et de ses processus énergivores, demeure l'un des secteurs les plus difficiles à décarboner.

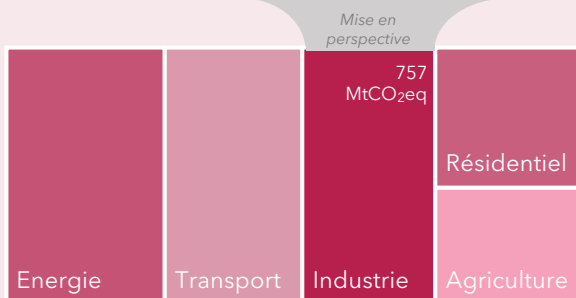
Face à la complexité des formes plastiques et des méthodes de production, une approche détaillée s'avère indispensable pour chaque type de plastique et son usage associé. De plus, la mise en place d'un cadre réglementaire complet sur les analyses du cycle de vie est nécessaire.³⁵

Dans la suite du rapport nous allons explorer différentes solutions pour décarboner le secteur du plastique.

Box 3 - Mise en perspective



Il s'agit d'émissions de cycle de vie comprenant des émissions à imputer à l'énergie aux transports et n'ont pas que à l'industrie...



Emissions européennes totales : 3242 MtCO₂eq

Fig. 13. Mise en perspective des émissions matière et industrie de l'Europe^{32,33}

Depuis les années 90, l'Europe a assisté à une réduction notable des émissions de gaz à effet de serre de son secteur industriel, avec une diminution de 35%.³³

Raffinerie ©Blende-8



Les différents leviers possibles

Circularité

- 1 Repenser**
Diminuer les utilisations du plastique
- 2 Réduire**
Se limiter à la stricte quantité nécessaire
- 3 Réutiliser**
Soutenir l'utilisation prolongée des produits

4 Recyclage Mécanique
Récupération mécanique du matériau à l'origine de l'objet, appuyé par un design d'objet permettant le plus de recyclage mécanique possible.

5 Recyclage Chimique
Récupération chimique des matières carbonées à l'origine de l'objet

Comme dans les autres secteurs de l'économie, le plus directement actionnable consiste à adopter des mesures de sobriété.

Ensuite, nous retrouvons les leviers technologiques tels que le recyclage, ainsi que la gestion des déchets.

Nouveaux moyens de production

Électrification
Remplacer la source d'énergie des technologies existantes de productions

Plastique via CCU (Power-to-Plastique)
Remplacer la source de carbone d'origine fossile par du carbone atmosphérique

Plastique issu de la biomasse
Remplacer la source de carbone d'origine fossile par de la biomasse

Comme pour les autres ressources nécessitant du carbone (SAF), on peut changer la source du carbone fossile avec des ressources « renouvelables »

Carbone capture

CCS Capture du carbone
Capture sur les technologies existantes et futures émettant de manière concentrée

Enfin, l'industrie ayant des processus difficiles à électrifier mais avec des émissions intenses localisées, la capture du carbone peut venir compenser les émissions résiduelles.

Une transformation à tous les niveaux

Ainsi, les différents leviers interviennent à différents moments de la chaîne de valeur du plastique. Les leviers de circularité permettent de réutiliser la matière à différentes étapes de la chaîne, les nouveaux moyens de production interviennent au début de la chaîne de vie, enfin le CCS (Capture et Stockage du Carbone) intervient à la fois au début ainsi qu'à la fin de vie. ⁴²

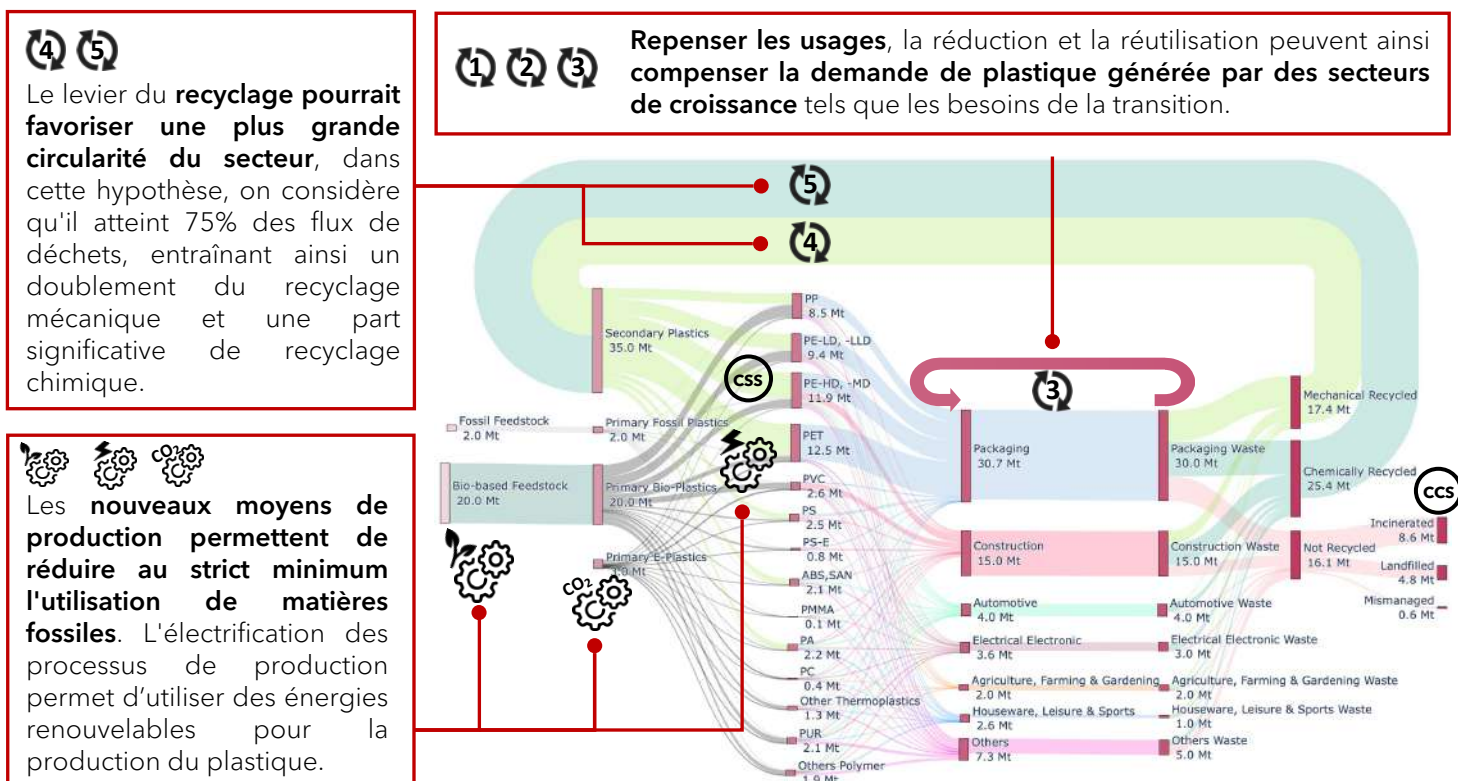


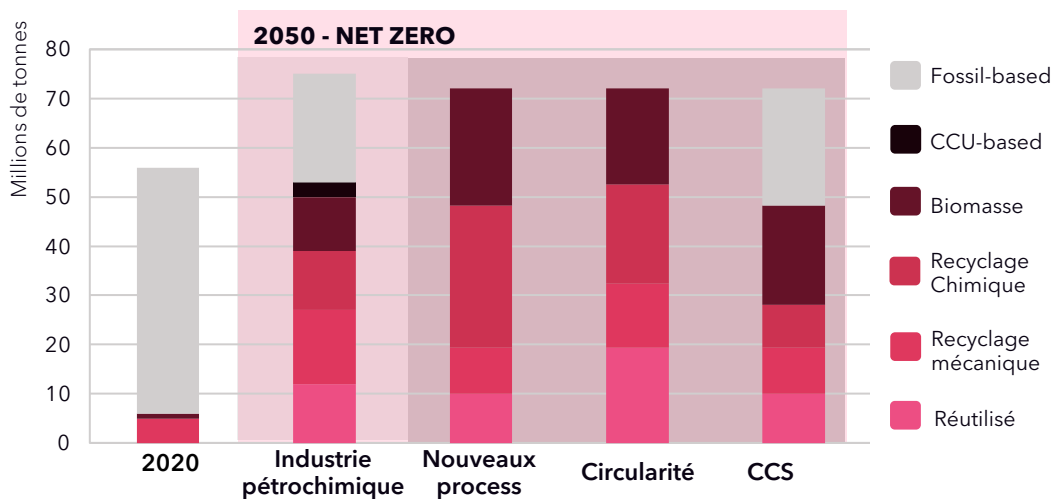
Fig. 14. Un exemple de scénario où l'économie du plastique passe d'un état linéaire à un mode circulaire basé sur des technologies bas-carbone. Issu d'une combinaison d'hypothèses de différents scénarios de décarbonation du secteur

NB. L'hypothèse faite ici d'avoir 75% de matière recyclée est très optimiste, car comme nous le montrons dans les sections suivantes : (1) le recyclage mécanique est efficace mais intrinsèquement limité en volume et (2) le recyclage chimique implique des pertes de matière qui peuvent être de l'ordre de 50% (voir Figure 25 pour des valeurs précises en fonction des types de recyclage chimique).

Quelques scénarios de transformation du secteur plastique européen

Les scénarios de décarbonation à l'échelle européenne font intervenir une multitude de solutions bas-carbone dans des proportions variées. Une dynamique en faveur d'une plus grande circularité se profile pour l'avenir, avec un développement du recyclage chimique pour l'instant peu mûre. Le recyclage mécanique voit également des améliorations dans tous les scénarios envisagés. **Cependant, bien que cette circularité se développe, elle ne suffira pas à répondre à la demande croissante de plastique.** C'est pourquoi de nouvelles sources de carbone font leur apparition tels que la biomasse, qui est

abondante dans toutes les perspectives. En revanche, la filière utilisant du carbone capturé pour produire du plastique ne figure que dans un scénario, et ce, à une faible échelle. **On constate que certains scénarios conservent une production fossile tout en étant neutres en carbone,** grâce à deux leviers clés : le CCS (captage et stockage du carbone) et la capacité du plastique à stocker du carbone couplée à l'utilisation de carbone atmosphérique, à partir de la biomasse ou des technologies d'utilisation du carbone capturé (CCU).



PLASTICS EUROPE
Enabling a sustainable future

The plastics Transition est un rapport réalisé par une association de pétrochimiste : Plastics Europe. (industrie pétrochimique)

MATERIAL ECONOMICS

Material economics est un think tank suédois, proche du cabinet de conseil Mc Kinsey. (Nouveaux process, Circularité, CCS)

Fig. 15. Graphique en barres comparant la production de plastique en 2020 et en 2050, Source : ^{70 50}, voir Annexe 2 pour la France

Que dit la réglementation européenne



Single use plastics

Teneur en matière recyclée des bouteilles en PET :

2030	30%
2025	25%

L'État membre doit assurer la collecte séparée des bouteilles en PET.

Waste Framework Directive : Objectif de préparation au réemploi/recyclage des :

Année	Déchet Municipaux	Emballage plastique
2020	50%	75%
2025	55%	
2030	65%	

Packaging and Packaging Waste : Au moins X % en poids de ... sont recyclés

Année	Déchet d'emballage	Déchet plastique
2030	70%	55%
2025	65%	50%

Des outils de financement européens sont déployés pour soutenir des projets liés aux problématiques des plastiques. Ces soutiens s'articulent autour de la **recherche et de l'innovation**, notamment avec Horizon Europe pour la période 2021-2027, ainsi que l'efficacité des ressources et des investissements environnementaux, notamment à travers le programme LIFE intégré dans le budget à long terme de l'Union européenne et le plan de relance. Certains fonds structurels, tels que le FEDER et InvestUE, sont également réorientés pour contribuer à ces initiatives cruciales ³⁷.

Fig. 16. Schéma de présentation des différentes politiques européennes sur le plastique

05

Plus de Circularité

Les différentes boucles de recyclage

La collecte

Le design d'objet

Des innovations à venir pour le triage

Le recyclage mécanique

Le recyclage physique

Le recyclage chimique

 Dépolymérisation

 Thermochimique

 Dérivés

 Les produits

 Projets européens

Emissions de gaz à effet de serre

Coût du recyclage

Conclusion

Les différentes boucles de recyclage

Nous allons explorer les différentes solutions technologiques de recyclage (Voir le sommaire **figure 17**), pour chacune les technologies disponibles et leurs spécificités.

Sommaire :

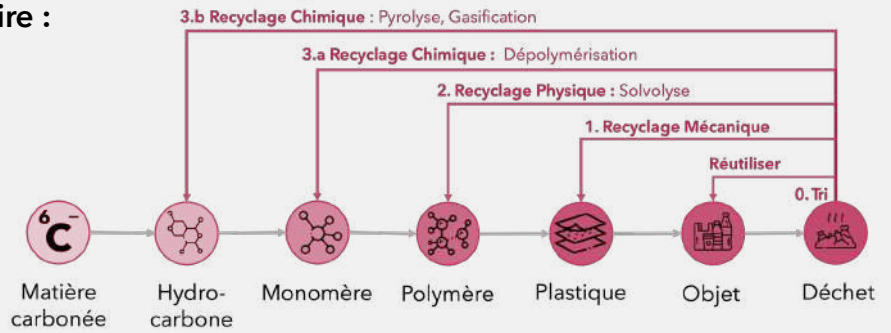


Fig. 17. Infographie des boucles de recyclage

La collecte des déchets plastiques



Fig. 18. Image d'illustration de la collecte

Seulement 29,5 millions de tonnes de déchets plastiques ont été collectées en 2020, alors que l'Europe génère environ 45 millions de tonnes de déchets plastiques par an. Une grande partie de ces plastiques est mélangée à différents flux de déchets municipaux, commerciaux, ou encore de démolition. Pour remédier à cette situation, l'une des **premières stratégies envisageables repose sur une approche de collecte différenciée**. Il reste encore des efforts à réaliser au niveau de la sensibilisation des utilisateurs et des programmes de collecte. Il est important de noter que les taux de recyclage des déchets plastiques sont 13 fois plus élevés lorsqu'ils sont collectés séparément des autres déchets recyclables. Ainsi, certains pays, tels que les Pays-Bas, la Norvège et la Suède, ont déjà pris des mesures visant à accroître la séparation des plastiques par rapport aux autres déchets. **Bien que ce processus de tri différencié entraîne des coûts supplémentaires, il offre une solution immédiatement disponible pour progresser vers une circularité accrue des plastiques.**

Le design d'objets, une brique essentielle du recyclage

Un levier majeur est l'**éco-design des objets en plastique pour permettre un meilleur recyclage**. Par exemple, on peut **interdire les étiquettes avec de la colle**, sélectionner les résines les plus recyclables, ou **éviter de superposer différents types de plastiques qui ne peuvent pas être broyés ensemble ensuite** (ce qui est souvent le cas, dans les pots de yaourt par exemple).

Les refus générés à chaque étape de tri et de transformation seraient limités, et l'efficacité du recyclage s'en trouverait améliorée.

Cela implique de mettre en place un **cadre clair et une politique incitative pour les fabricants de produits plastiques**, afin qu'ils prennent la responsabilité des produits qu'ils mettent sur le marché et pensent leur fin de vie au moment de leur conception. En France la loi AGEC impose depuis 2022 une pénalité aux producteurs d'emballages plastiques sans filière de recyclage.

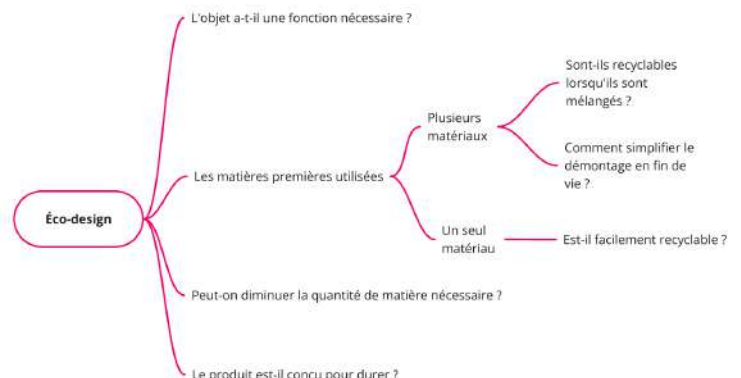


Fig. 19. Carte heuristique de l'éco-design, exemple de questionnement à avoir dès la conception de l'objet

Des innovations à venir pour le triage des déchets plastiques

Actuellement, la technologie de tri de référence repose sur l'infrarouge, mais elle présente des limites d'efficacité, notamment avec les matériaux sales ou opaques, diminuant ainsi les quantités recyclables. Diverses solutions sont envisageables pour améliorer ce processus⁴², l'une d'entre elles étant le développement de nouvelles technologies de tri parmi lesquelles :

- La **séparation par densité mécanique**, qui, grâce à l'ajout de matière magnétique, crée un champ magnétique différencié selon les densités, permettant ainsi le tri des plastiques en fonction de leur densité.
- La **séparation tribo-électrique**, qui constitue une autre approche, chargeant les surfaces plastiques en polymère et les classant selon leur nature.
- D'autres technologies émergent, telles que le tri centrifuge, le tri par flottaison...

Et des approches de reconnaissance visuelle:

- Les **technologies de "watermarks"**, cette dernière consiste à apposer un tatouage numérique lors de la production de l'objet, facilitant ainsi son identification lors du tri.
- Les **technologies utilisant l'intelligence artificielle (IA)**, sont de plus en plus prometteuses. Une fois correctement entraînées, elles pourraient reconnaître et trier de manière précise les différents matériaux.

Toutes ces solutions techniques impliquent des coûts supplémentaires et une consommation énergétique accrue, mais elles constituent une étape cruciale qui permet des recyclages efficaces et doit être prise en considération.

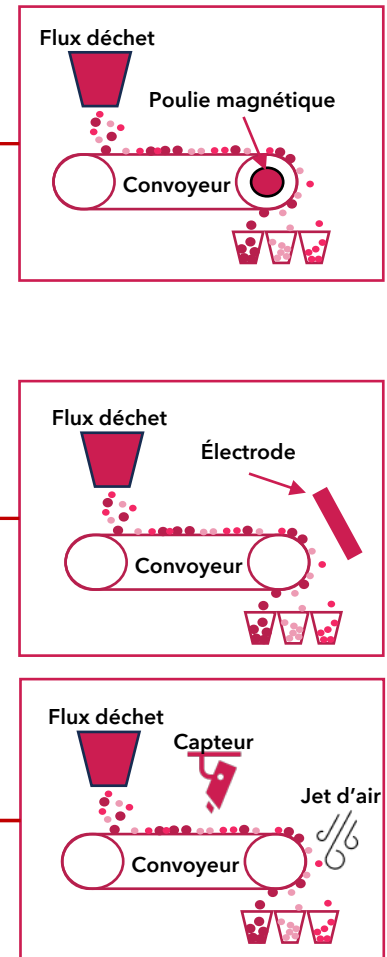


Fig. 20. Illustration technologies de tri⁴⁶

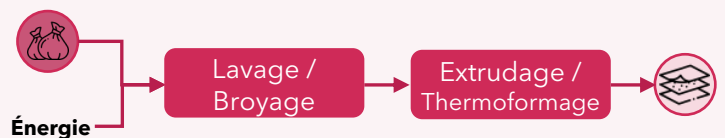
1. Le recyclage mécanique

Recyclage le plus courant qui consiste à laver, broyer, extruder, transformer en granulés pour réutiliser les plastiques sous forme de matière première secondaire⁴³.

TRL*
9

+ Technologie la plus mature
Très efficace
Consomme peu d'énergie

- Pertes de qualité de la matière
Propreté des déchets d'entrée,
Sensible aux additifs.



Le procédé historique du recyclage, représentant actuellement 99,9% du recyclage en Europe. Avec 5,5 millions de tonnes de matières recyclées utilisées dans la production en 2021. Le facteur limitant le développement de cette technologie réside dans le tri, le flux d'entrée nécessitant d'être monomatériau et de répondre à certains critères de qualité⁴⁴.

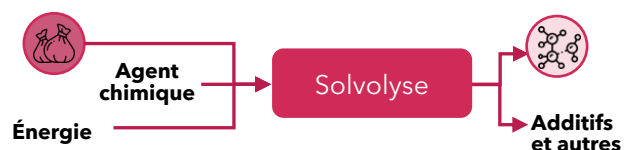
2. Le recyclage physique

Une des technologies est le processus d'extraction du polymère par dissolution du plastique par un solvant.⁴⁵

TRL
7

+ Traitement possible de divers types de polymères,
Élimination des additifs pour revenir à une matière vierge,
Récupération d'additifs précieux

- Dépendance au solvant respectueux de l'environnement.
Efficacité variable, Complexité opérationnelle due au défi de récupération du solvant



Processus en pleine évolution, avec des initiatives telles que CreaSolv[®] de Fraunhofer. Bien que des progrès significatifs aient été réalisés, des défis persistent, notamment la nécessité de surmonter les problèmes liés à l'élimination complète des solvants. Ces approches prometteuses demandent encore des développements pour être déployées à grande échelle industrielle.⁴⁵

3. Le recyclage chimique

Le **recyclage chimique** recouvre un ensemble de technologies de recyclage, et tire son nom de son approche moléculaire de la transformation. Contrairement aux méthodes de recyclage précédentes, qui se limitent à la récupération du matériau et des polymères, **le recyclage chimique va plus loin en décomposant les longues chaînes carbonées des polymères**. Cette décomposition peut se faire directement en monomères ou en un mélange d'hydrocarbures, nécessitant ensuite un traitement supplémentaire pour obtenir les monomères. Plusieurs technologies sont disponibles, **le choix entre ces technologies dépend notamment de la nature du polymère et de la qualité des déchets**, des aspects que nous examinerons plus en détail par la suite.

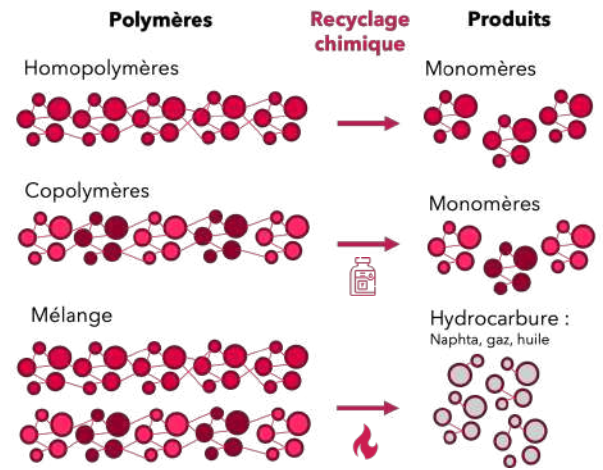


Fig. 21 Infographie molécules et recyclage ⁷

Il existe deux méthodes pour casser les chaînes carbonées



Par **l'intervention d'un agent chimique** qui réagit avec les liaisons carbonées, entraînant leur rupture et formant des molécules plus petites. (Dépolymérisation)



Par **le chauffage** (avec ou sans la présence d'oxygène), qui rompt les liaisons carbonées à haute température, produisant des composés plus simples.

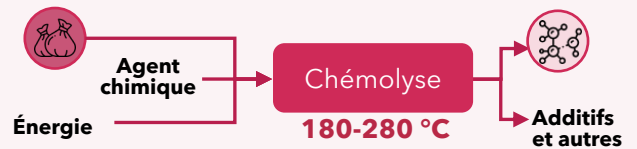
3.1 Dépolymérisation

Chémolyse : processus de décomposition chimique avec diverses variantes telles que la méthanolyse, la glycolyse, l'hydrolyse et l'aminolyse selon l'agent utilisé.



+ Déjà intégré dans les lignes de production de polymère
Nécessite une entrée d'énergie faible

- Volumes élevés nécessaires, adapté uniquement aux plastiques homogènes PET, PU, PC. Coût élevé. Sensibilité aux contaminants



Certains processus de chémolyse tels que la glycolyse sont appliqués à grande échelle DuPont/DOW, Goodyear, Shell... L'hydrolyse a également été appliquée à une échelle commerciale et pilote, tandis que la méthanolyse est en développement

3.2 Le recyclage thermochimique

Pyrolyse : réaction de craquage thermique, en l'absence d'oxygène, qui décompose la macrostructure du polymère⁴⁶



+ Technologie simple
Processus flexible
Adapté aux plastiques difficiles à dépolymériser

- Complexité des réactions
Besoin élevé en énergie
Tolérance faible au PVC
Sensibilité à la contamination des matières premières



Technologie la plus répandue dans la littérature et dans les projets, en Europe au début de 2022, une capacité de gestion des déchets via la pyrolyse de 1,1 million de tonnes avait été annoncée. Plusieurs installations sont déjà en fonctionnement aux États-Unis, au Japon, en Chine et en Allemagne.^{44 47}

Gazéification : réaction basée sur l'oxydation à l'aide d'un agent (air, vapeur, oxygène, ...) ^{46 48}



+ Adapté aux déchets plastiques mixtes, Produits très détaillés
Multiples applications du gaz
Produit, Technologie bien établie

- Gaz nécessitant amélioration, Volumes importants de matières premières, Coûteux et énergivore, Production char et goudrons.



Plusieurs sites dans le monde utilise la gazéification à échelle commerciale, aussi l'usine Enerkem au Canada qui produit 38 millions de litres de méthanol à partir de 100 000 tonnes de déchets. Un projet aux Pays-bas annonce une capacité de 360 000 tonnes.^{44 48}

Box 4 - Les projets de recyclage chimique en Europe

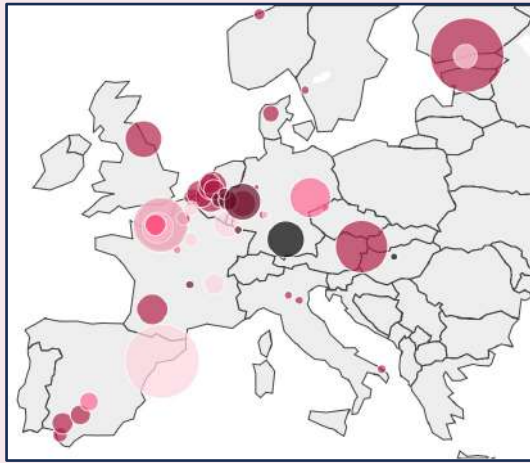


Fig. 22. Mapping des différents projets de recyclage chimique, source 49 50

La cartographie des projets européens révèle que :

la filière a annoncé une capacité de recyclage chimique pour les déchets plastiques non triés de 1,5 million de tonnes, essentiellement via la pyrolyse.

Plastiques	Capacité
● Plastiques variés	1500 kt/a
● PU	220 kt/a
● PE/PET	760 kt/a
● PS	162 kt/a
● PVC	33 kt/a
● Tyres	104 kt/a

Pays	Capacité	Projet
France	720 kt/an	13
Spain	503 kt/an	5
Finland	440 kt/an	2
Germany	382 kt/an	7
Netherlands	252 kt/an	8
Austria	200 kt/an	1

Dérivés de ces technologies de recyclage chimique

Nom	Principe	Température	TRL	Positif	Négatif	Projet
Sous critique / Supercritique dépolymérisation	Processus de décomposition chimique utilisant un agent sous forme subcritique ou supercritique	200 °C ↕ 300 °C	TRL 5	Efficacité énergétique Meilleure séparation des matériaux	Coût élevé Difficile à mettre en place	Le Japon teste une technologie utilisant l'hydrolyse dans l'eau subcritique
Craquage Catalytique	Processus de pyrolyse auquel on ajoute un catalyseur	400 °C ↕ 450 °C	TRL 8	Température basse Rendement élevé Temps de réaction court Économie d'énergie et de coûts	Sensibilité aux intrants Désactivation catalyseur nécessite prétraitement	Technologie mature, utilisées au Japon. Un projet convertissait 15000 t déchet, a dû cesser les activités en raison de problème financier.
Pyrolyse assistée par micro-onde	Ajout d'un matériau diélectrique absorbant les micro-ondes transférant aux déchet la chaleur par conduction	~ 1000 °C	TRL 4	Distribution chaleur uniforme, adapté tous déchets Températures Bon contrôle, rapide	Sensible variations déchets Défi d'utilisation absorbants diélectriques, volumes substantiels	Technologie lancée en 2003. Besoin de développements en raison du manque de données sur les propriétés diélectriques des déchets.
Pyrolyse Plasma	Intégration des propriétés thermo-chimiques du plasma à la pyrolyse conventionnelles	1700 °C ↕ 9800 °C	TRL 4	Température élevée Évite les composés toxiques Adapté tous déchets Très peu de produit indésirable	Besoin très élevé en électricité Couteux	Au niveau du laboratoire, des défis techniques persistent avant que cela ne soit disponible commercialement, défis divers en fonction du type de plasma utilisé.
Pyrolyse avec reformage en ligne	Processus reliant deux réacteurs connectés en ligne, un pour la pyrolyse et l'autre pour le reformage	300 °C ↕ 700 °C	TRL 4	Produit une grande quantité d'hydrogène, gaz produit exempt de goudrons	Utilise de l'hydrogène Beaucoup d'investissements nécessaires Coût d'opération élevé	Grand potentiel, mais technologie encore à l'échelle de laboratoire.
Hydro Craquage	Processus de craquage auquel on ajoute de l'hydrogène, ce qui entraîne une meilleure qualité du produit	375 °C ↕ 500 °C	TRL 7	Produit de haute qualité Température basse, requiert moins d'énergies	Coût élevé de l'hydrogène Effet de poison après l'hydrocraquage du PVC	La technologie déjà utilisée dans l'industrie du pétrole. Testée pour le recyclage du plastique, au stade de pilote, défis sur les effets poison provoqué par le PVC dans l'hydrocraquage.
Gazéification Plasma	Processus de gazéification dans lequel l'agent oxydant est le plasma	1200 °C ↕ 1500 °C	TRL 8	Pureté du gaz produit Moins de Goudron Tolérance élevée à la qualité des matières premières	Coûts d'investissement et d'exploitation élevés Besoin en électricité très élevé	Processus existant au Japon, en Inde et en Chine. En Europe, deux usines étaient en projet au Royaume-Uni, projet abandonné en raison de difficultés technique et de coûts d'investissement trop élevés.

Fig. 23. Tableau récapitulatif des différentes technologies
Source : 44 46 48 51 52

Les différents produits du recyclage thermochimique

Nous venons de passer en revue différentes technologies de recyclage chimique, parmi lesquelles des **technologies « thermochimiques »**, utilisant de la chaleur pour remonter au stade d'hydrocarbures, telles que la gazéification, la pyrolyse et leurs dérivés. Ces technologies **ont l'avantage de produire une matière première "vierge", adaptée à des applications finales complexes** qui peuvent être autres que le plastique. **La circularité stricte n'est garantie que dans le cas d'un retour à de la matière plastique.** Cette matière "vierge", mélange d'hydrocarbures, se présente sous les trois formes de la matière :

- **Liquide** : Huile de pyrolyse,
- **Gazeuse** : Gaz de synthèse,
- **Solide** : produits secondaires tels que le charbon, le goudron, etc...

La répartition des formes de cette matière dépend du processus utilisé : la pyrolyse produit principalement du naphta, tandis que la gazéification produit du gaz de synthèse.⁵³

L'huile de pyrolyse est constituée d'hydrocarbures lourds, d'hydrocarbures légers et d'autres mélanges. **Elle peut être utilisée pour produire des carburants**, tels que le diesel ou le kérosène par exemple. Dans le recyclage, elle est traitée via les processus de vapocraquage pour obtenir à nouveau des monomères.

Le gaz de synthèse est principalement constitué d'H₂, CO, et en moindre quantité de CO₂, CH₄, N₂ et d'autres hydrocarbures légers. **Il peut être utilisé pour produire de l'énergie, des vecteurs énergétiques** (comme l'hydrogène) ou des produits chimiques (carburants, méthanol, etc.). Dans le cas du recyclage, le gaz obtenu est catalysé pour obtenir des monomères comme le propylène ou l'éthylène.

Ainsi, **il peut être intéressant de maximiser la production d'un produit plutôt qu'un autre en raison de son efficacité ou d'une valorisation plus élevée.** Pour cela, les **paramètres les plus importants sont la température et la durée** qui contrôlent la réaction de craquage de la chaîne polymère, influençant ainsi la composition du produit. Aussi, les types de déchets et d'agents influent également sur la concentration en molécules valorisables.⁵⁴

Box 5 - Différencier et attribuer cette matière vierge recyclé grâce à la Mass Balance

L'utilisation de ces produits du recyclage pour produire des plastiques et tendre vers plus de circularité **nécessite des arbitrages**. Or, pour la production, la ressource recyclée (R) est mélangée avec la ressource historique (H) d'origine fossile à différentes étapes, produisant ainsi divers produits chimiques convertis en une variété de produits finaux avec plus ou moins de contenus recyclés (A,B,C,D).

Il faut donc attribuer un taux de matière recyclée pour quantifier la circularité du matériau. Une des solutions est le **bilan massique**, qui vise à attribuer la part recyclée en pesant le contenu recyclé et le contenu vierge à l'entrée, puis en retirant la part du produit ne pouvant pas provenir du contenu recyclé et la part du produit ne pouvant pas venir du contenu vierge, et en associant le rapport de masse restante

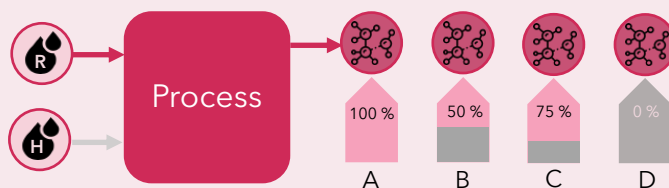


Fig. 24. Processus de mass balance

pour différents polymères. **L'importance du bilan massique dans le développement du recyclage réside dans sa capacité à fournir une traçabilité transparente du contenu recyclé**, à attribuer celui-ci à des produits spécifiques et à répondre aux exigences réglementaires en matière de recyclage⁵⁵.

Emissions de gaz à effet de serre

En termes de réduction d'émissions, **les recyclages mécanique, physique et chimique sont généralement préférables à la valorisation énergétique** en termes d'impact sur le changement climatique, offrant des économies nettes de gaz à effet de serre grâce à la substitution des matières premières vierges et au fait que le plastique n'est pas incinéré^{56 57}.

La capacité de décarbonation du recyclage chimique dépend des moyens de production aval tels que les vapocraqueurs. À l'avenir, avec une transition vers des systèmes énergétiques à faible teneur en carbone, le recyclage chimique pourrait offrir des économies

supplémentaires significatives en matière de gaz à effet de serre^{58 59}.

D'autre part, en termes d'émissions évitées, le recyclage chimique peut être moins intéressant que la valorisation énergétique si celle-ci remplace une centrale thermique fonctionnant à la lignite⁴⁴. **Au regard des défis liés au changement climatique et à la raréfaction des ressources non renouvelables, le recyclage apporte des avantages significatifs.** Cependant, il est essentiel de noter, comme le souligne l'étude de l'IPEN⁶⁰, que le recyclage chimique ne résout pas les problèmes de toxicité et autres associés aux plastiques.

Coût du recyclage

Sous les conditions actuelles du système énergétique de l'UE, la **performance du recyclage physique et chimique n'est pas toujours supérieure à celle de la valorisation énergétique**. Ces nouvelles technologies ont des revenus nets négatifs, -63 €/t pour la méthanolyse, -160 €/t pour la pyrolyse et même -357,4 €/t pour la gazéification.

Seules la dissolution et la glycolyse génèrent aujourd'hui des revenus nets positifs. **Ces technologies sont encore en cours de développement, de ce fait les coûts sont projetés à la baisse dans le futur, d'après une modélisation elles pourraient être économiquement intéressantes dès 2040** (hormis la gazéification)^{61 62}.

Conclusion graphique sur le recyclage du plastique

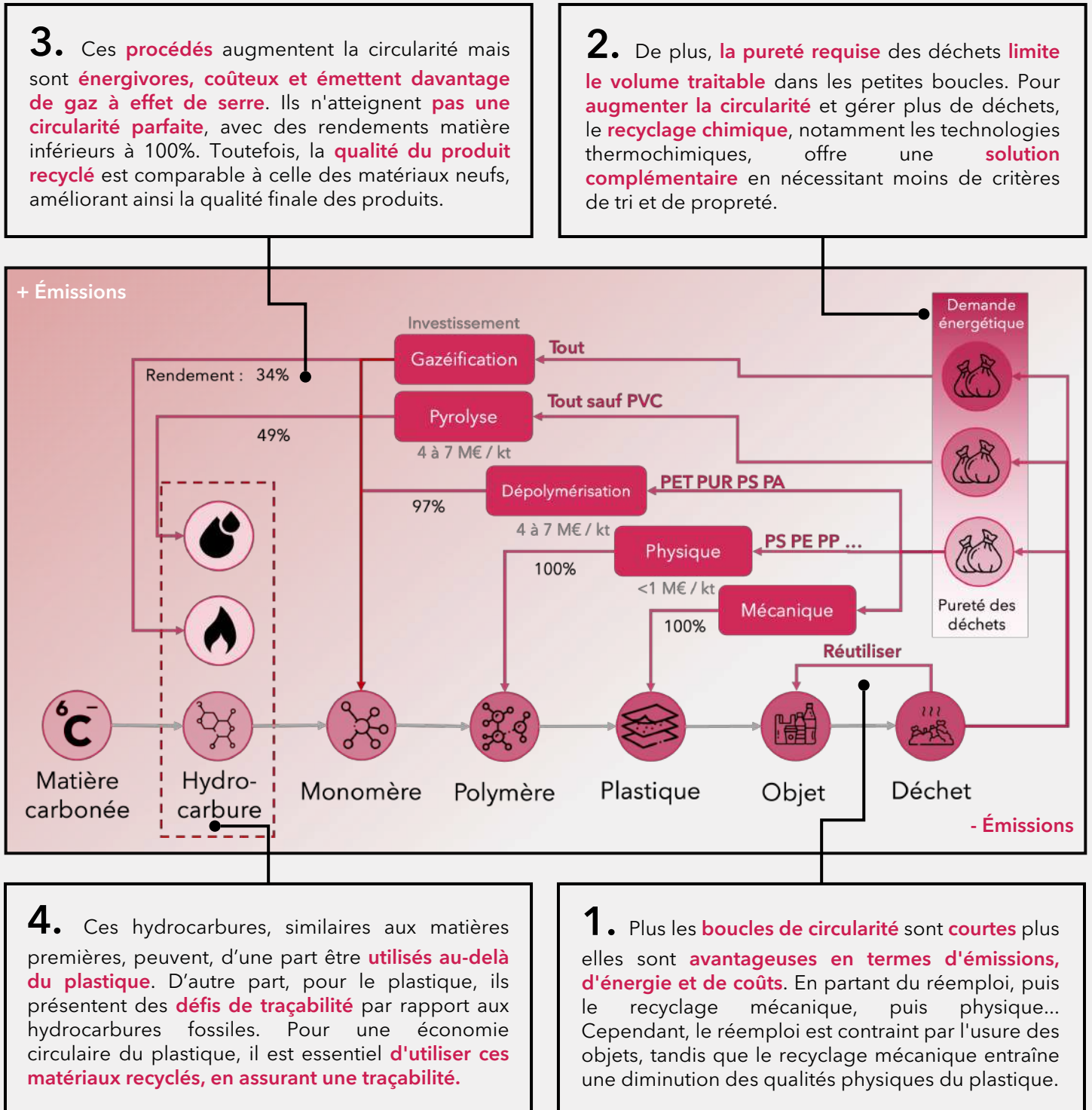


Fig. 25. Différentes boucles de circularité et implications de chacune^{63 64}

06

Vers une production plus durable

Limite de la circularité

Retrofit

La biomasse comme source de carbone

Technologies

Stockage de carbone

Nouvelle filière

Le CO₂ comme source de carbone

Entre énergie et ressources

Comparaison des différentes technologies

Différents moyens de production

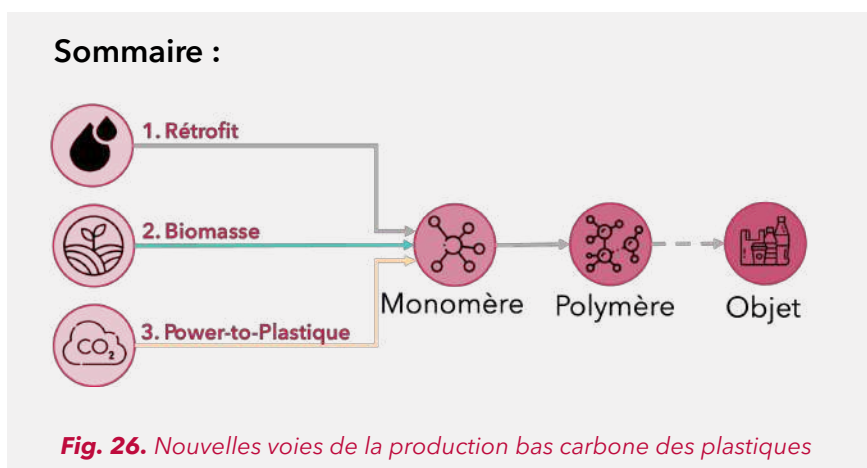
Conclusion

Complexité de la décarbonation



Limites de la circularité

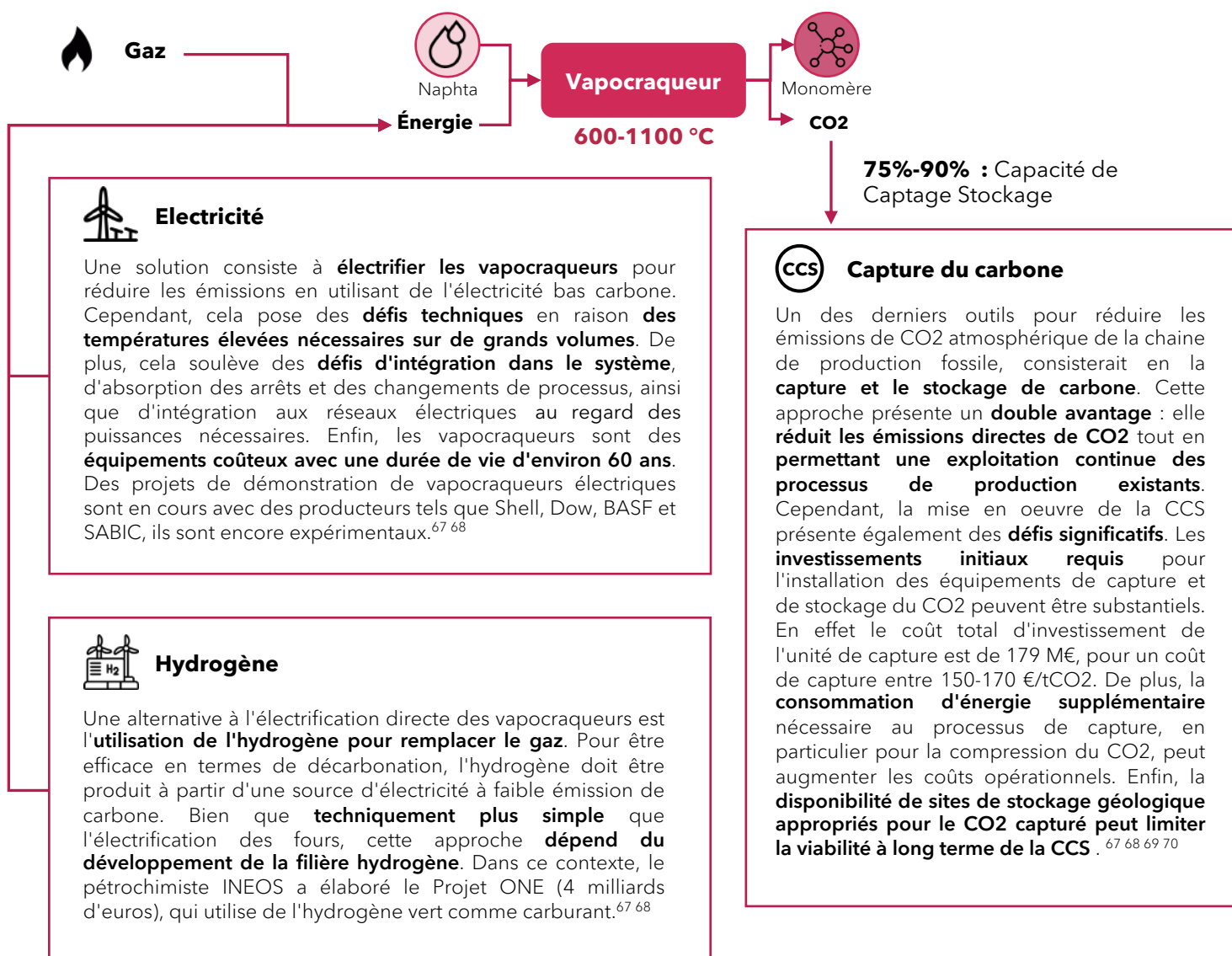
Malgré toutes les améliorations possibles des méthodes de recyclage, une **circularité parfaite est difficilement envisageable en raison notamment des rendements matière des procédés, nécessitant toujours une part de plastique "neuf"**. S'affranchir totalement de production primaire semble donc complexe, raison pour laquelle une réflexion est nécessaire autour de voies de production bas-carbone. **Deux approches sont possibles : conserver les procédés fossiles actuels et améliorer leur bilan énergétique et carbone, ou s'orienter vers des procédés utilisant du carbone atmosphérique ou biogénique**^{65,66}.



Rétrofit : décarboner la voie fossile, entre électrification et CCS

Une approche envisageable pour réduire les émissions des processus actuels consiste à mettre en place des **mesures d'efficacité**, notamment en optant pour l'électrification. Dans le secteur de la production de plastique, **plusieurs équipements de traitement peuvent aisément être convertis à l'électricité**, comme les pompes, les compresseurs et les chaudières basse température. **Le principal défi** dans cette modernisation

se concentre sur l'opération du **vapocraqueur**. Ce dispositif est essentiel pour décomposer les hydrocarbures en chaînes carbonées plus courtes, un processus qui requiert des températures élevées, allant de 600 à 1100°C. **Pour atteindre et maintenir de telles températures, une puissance et une énergie considérables sont nécessaires, environ 900 MW** pour le fonctionnement d'un seul vapocraqueur.⁴⁶



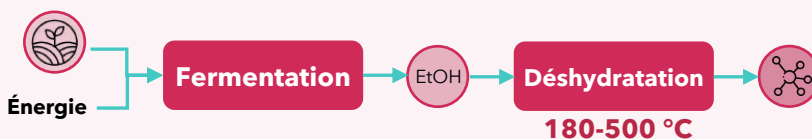
La biomasse comme source de carbone

La biomasse se révèle être un moyen efficace d'introduire le CO₂ atmosphérique dans la chaîne de valeur du plastique. Les plantes absorbent le CO₂ lors de la photosynthèse, stockant ainsi du carbone dans des composés et dérivés tels que **les sucres, les huiles et la biomasse ligneuse, pouvant être convertis en produits chimiques utiles**. Le principe repose sur la production d'alcools, ensuite déshydratés pour obtenir des monomères, en utilisant différentes technologies telles que le « méthanol to oléfines ». ⁷¹

1. Via l'éthanol

Fermentation des sucres de la biomasse permettant d'obtenir de l'éthanol qui **par déshydratation produit de l'éthane**. ⁷¹

TRL 8



Projet :

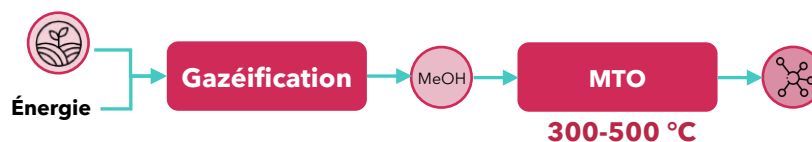
Le plus grand producteur actuel de bioéthylène est le Brésil ⁷², dont la tête de file est Braskem. Le concept est également mis en oeuvre en Europe. En 2014, Axens, Total et IFP Energies Nouvelles ont annoncé une technologie de production de bioéthylène par déshydratation du bioéthanol sous la marque de technologie AtoITM, pour produire du bioéthylène de qualité polymère ⁷³.

- + Coût production bas
Processus simple
Peu énergivore
- Ne couvre qu'une partie des monomères
Beaucoup de ressources

2. Via le méthanol

Processus de gazéification de la biomasse, suivi d'une synthèse du méthanol et enfin d'une déshydratation par Méthanol to Oléfines (MTO) ⁷³

TRL 6



Projet :

Le MTO est déjà exploré dans l'industrie du plastique et déjà utilisé en Chine, en utilisant du méthanol issu du charbon. ⁶⁶

- + Adapté à tous types de biomasse et tous types de monomère
- Energivore
Peu de documentation

Stockage de carbone

Les **plastiques issus de la biomasse peuvent ainsi contribuer au stockage de CO₂ et à des émissions négatives**, durant l'utilisation du plastique. Cependant, il est essentiel de **prendre en compte les impacts environnementaux complets** lors du cycle de vie, notamment les changements d'utilisation des terres, la biodiversité, les impacts climatiques et les problèmes de déchets. **Actuellement, aucune norme de durabilité de l'UE ne s'applique à ces plastiques**, bien que les consommateurs s'attendent à ce qu'ils soient entièrement durables.

On note différentes empreintes carbonées des plastiques issus de la biomasse, selon la biomasse utilisée, le plastique produit, les transformations nécessaires ainsi que les méthodologies de calcul de l'empreinte carbone.

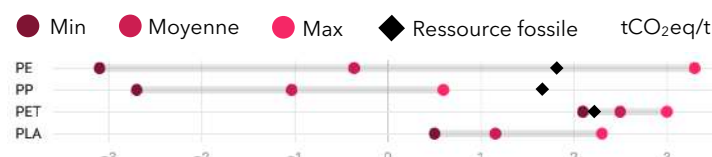


Fig. 27. Empreinte carbone des plastiques issus de la biomasse Source ⁷⁴

Une nouvelle filière

Ces **technologies de production de plastique à partir de biomasse connaissent un essor**, atteignant une production de 1,9 million de tonnes en Europe en 2021. Il convient de noter qu'**avant l'avènement de la pétrochimie, la majorité des matériaux organiques et des produits chimiques étaient obtenus à partir de biomasse**. Cependant, avec la baisse des prix du pétrole et les progrès technologiques, les nouvelles matières plastiques dérivées de ressources fossiles se sont largement répandues et sont aujourd'hui omniprésentes. De cette manière, **il est possible de reproduire ces plastiques dérivés du pétrole en utilisant des biomasses**, tout en ayant la capacité de développer de nouveaux matériaux avec des propriétés

distinctes, tels que le PLA et le PHE. Les modes de production de ces nouveaux plastiques sont moins émetteurs que ceux utilisés pour les plastiques classiques. ^{75,76,77}

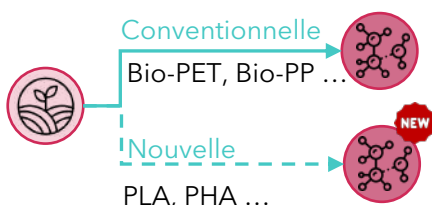
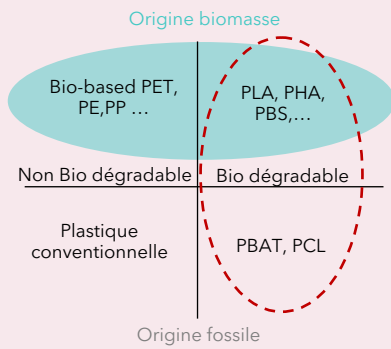


Fig. 28. Différentes voies de production des monomères

Box 6 - Différentes biomasses

La biomasse est constituée des matières organiques. **La biomasse conventionnelle** regroupe les cultures sucrières, amidonnières et oléagineuses. Des **ressources qui entrent en concurrence avec l'alimentation humaine** et animale, ce qui soulève des inquiétudes à la fois d'ordre éthique et environnemental. Parmi elles figurent aussi les huiles de cuisson et les graisses animales, dont les stocks sont également limités. **La biomasse avancée**, qui inclut les résidus de l'industrie forestière et les cultures non alimentaires, n'entre pas en compétition avec les produits alimentaires, **offrant une alternative plus durable et réduisant les conflits d'usage**.

Box 7 Les différents types de Bio



Le terme "bio-plastique" ne se limite pas aux plastiques issus de la biomasse ; il englobe également les plastiques biodégradables qui se décomposent naturellement. Bien que ces plastiques aient été largement adoptés, les progrès dans ce domaine ont ralenti depuis 2013, principalement en raison des **controverses entourant leur impact environnemental**. En effet, les plastiques compostables, comme l'acide polylactique (PLA), **nécessitent des conditions spécifiques pour se dégrader, conditions souvent absentes dans la nature**, ce qui soulève des questions sur leur biodégradabilité effective. Des problèmes tels que la gestion de leur collecte, le recyclage inefficace, la confusion chez les consommateurs, et les questions d'étiquetage limitent leur potentiel écologique. Néanmoins, **ils peuvent offrir des avantages dans certains cas**, comme le compostage domestique. Des avancées dans la recherche pourraient aboutir à de meilleurs matériaux et à des usages innovants.

Fig. 29. Frontière du bio-dégradable, Source : ⁸⁶

Le CO₂ comme source de carbone : le Power-to-Plastique

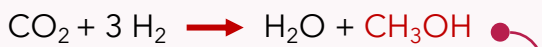
Un autre moyen d'introduire le CO₂ atmosphérique dans la chaîne de valeur du plastique, serait **d'utiliser les technologies de captage et de capture du CO₂**. L'idée est d'enrichir la molécule de carbone avec de l'hydrogène pour reproduire les monomères⁷⁸.

1. Via le méthanol

Processus d'enrichissement du carbone par de l'hydrogène via hydrogénation puis synthèse du méthanol.⁷⁹



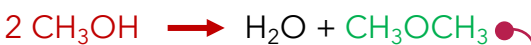
Hydrogénation



TRL 7

Technologie existante en Islande qui produit 5 millions de litres/an à partir de dioxyde de carbone d'une usine de production d'électricité.

Méthanol-to-Oléfines



TRL 7

Technologie déjà maîtrisée, qui constitue un moyen de production de plastique à partir de gaz naturel ainsi que de charbon. Elle est notamment déjà utilisée en Chine pour produire des plastiques à partir de charbon.



CH₃OH : Méthanol

CH₃OCH₃ : Diméthyléther

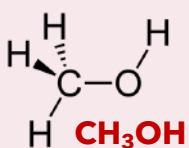
Cependant, ce **mode de production est très énergivore**, ce qui n'est pas nécessairement dû au seul processus d'hydrogénation, mais également à la capture du carbone en amont et à la production d'hydrogène.



C₂H₄ : Éthylène

C₃H₆ : Propylène

Box 8 Le méthanol



Le **méthanol** est un des **produits chimiques les plus produits au monde**, il est utilisé pour les **carburants** et comme **précurseur à d'autres produits chimiques**. Il est aujourd'hui obtenu par reformage à la vapeur du gaz naturel, mais aussi par gazéification du charbon. Le volume de **production** européen est de **1,5 Mt aujourd'hui** et pourrait atteindre **2,2 Mt en 2050** notamment dû à la filière des oléfines.

2. Autres

De nouvelles technologies Power-to-Plastic émergent, notamment l'utilisation directe du diméthyléther (DME) et le couplage oxydatif du méthane (OCM). **Cependant, ces technologies sont encore à leurs débuts** et il est peu probable qu'elles soient utilisées à grande échelle dans des applications industrielles avant 2050. ⁸⁵

Entre énergie et ressources

Les différentes technologies que nous venons de présenter requièrent des quantités d'énergie et de matière plus importantes que les anciens moyens de production⁸⁰. Ainsi, le développement de ces

technologies va être limité par les capacités disponibles en énergie renouvelable et en matière que ça soit la biomasse, l'hydrogène ainsi qu'en dioxyde de carbone.

Estimation des besoins pour la production de 15 Mt de plastique soit 25% de la production actuelle européenne

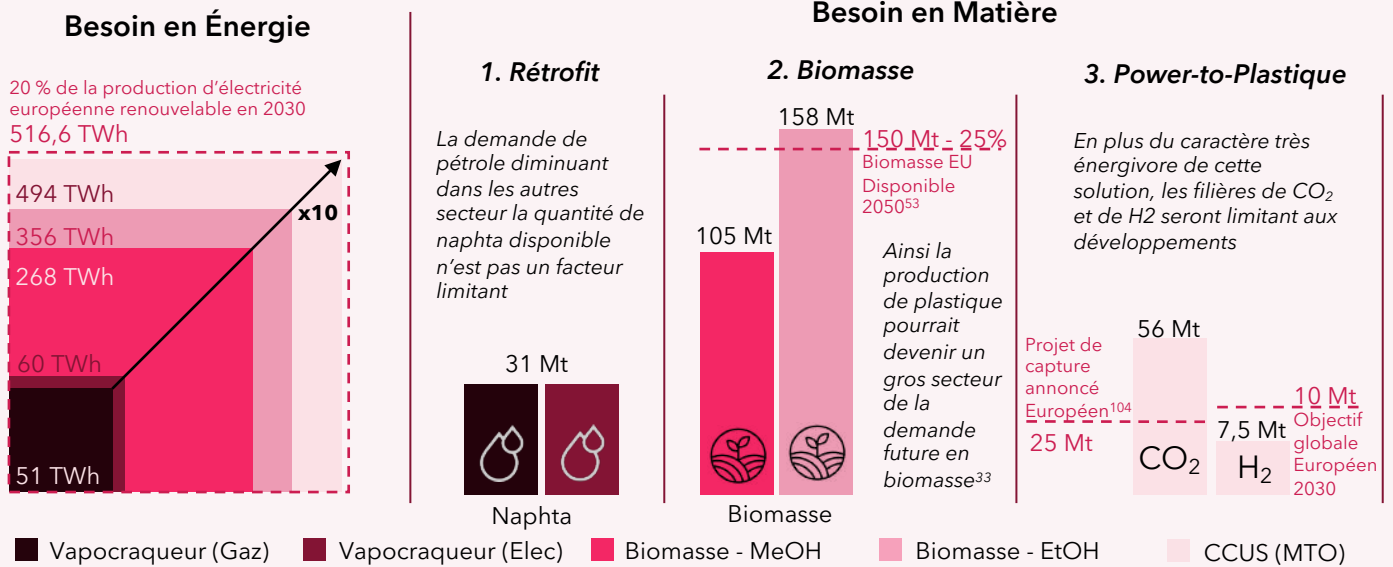


Fig. 30. Besoin en énergie et matière des différents processus de production Source^{66,81,82}

Un moyen de stockage du carbone ?

En considérant la composition carbonée du plastique et la possibilité de le produire à partir de processus de captage, une nouvelle perspective émerge : le plastique pourrait servir de moyen de stockage de CO₂.

Aujourd'hui il y a autour de **622 Mt de plastique dans l'économie européenne**, la grande majorité de celui-ci se trouve dans nos constructions. De ce fait, sachant qu'en moyenne les plastiques contiennent 2,7 tCO₂/t⁸³ le plastique dans l'économie européenne contient actuellement, **1,68 GtCO₂**.

Ce CO₂ est aujourd'hui d'origine fossile et va augmenter les quantités atmosphériques. Pour éviter ces émissions deux solutions : recycler ce plastique, l'incinérer avec du CCS.

Plastique dans l'économie Européenne

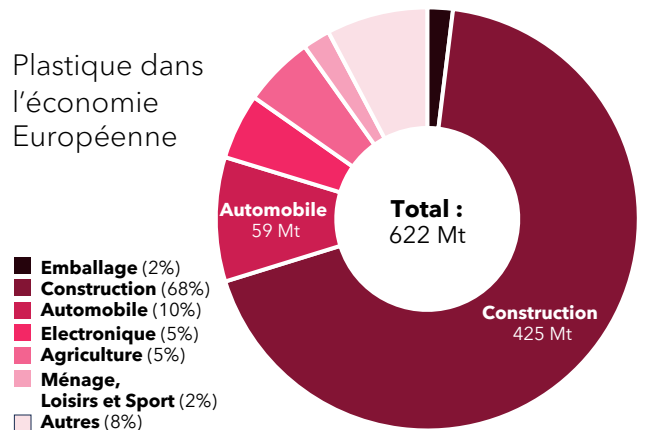


Fig. 31. Plastique dans l'économie

	Incinération	Économie circulaire	Incinération + CCS
CO ₂ Biogénique CO ₂ Atmosphérique	Neutre en carbone possible	Émissions négatives possibles	Émissions négatives possibles
CO ₂ Capturé	Émissions positives	Neutre en carbone possible	Neutre en carbone possible
CO ₂ Fossile	Émissions positives	Neutre en carbone possible	Neutre en carbone possible

Pour que le plastique comptabilise des émissions négatives il faut que le carbone soit retiré de l'atmosphère et stocké pendant de longues durées.

Pour cela soit il reste dans l'économie du plastique soit le carbone est récupéré après l'incinération.

Pour les autres sources de carbone des émissions négatives ne peuvent être envisagées.

Limite :

Bien que le plastique puisse contenir du carbone, nous avons bien vu que les rendements matériels du recyclage n'étaient pas de 100% ainsi l'économie circulaire n'est pas parfaite et à chaque cycle une partie du stockage de carbone est perdue, le nombre de cycle dépend de l'utilisation de celui-ci, ainsi parler de stockage pour le plastique des emballages n'a pas de sens. De plus, la technologie CCS ne permet pas une capture parfaite de toutes les particules de CO₂ émises, aujourd'hui son efficacité pourrait atteindre jusqu'à 90%, ainsi les potentiels 1,68 GtCO₂eq sont largement surévalués.

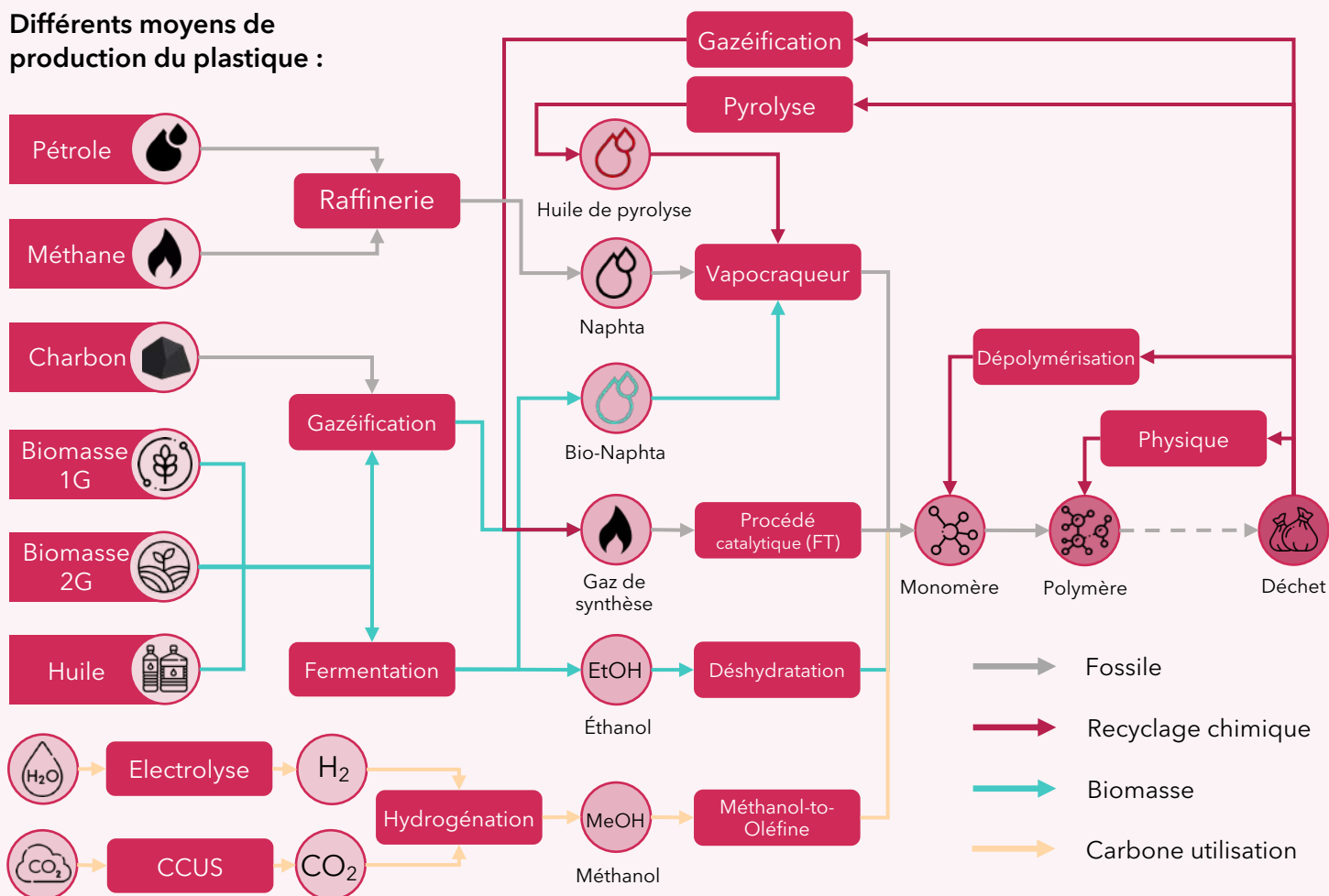
Comparaison des différentes technologies

Les **différentes technologies permettent des réductions d'émissions** mais entraînent des coûts substantiels, le tableau suivant est issu d'une comparaison de la bibliographie. Ainsi pour remplacer la technologie traditionnelle du vapocraqueur, **seule la technologie du recyclage chimique et de la biomasse en passant par la déshydratation de la biomasse est aujourd'hui disponible à échelle industrielle.** Le méthanol est une molécule grandement considérée dans la production de plastique mais les technologies ne sont pas encore assez développées, et les avantages de coût et d'émissions ne font pas consensus.

Technologie	TRL	Coût (€/t)	Émissions (tCO ₂ eq/t)
Vapocraqueur	TRL 9	816 - 1550	0,7 - 1,4
Vapocraqueur +CCS	TRL 4-5	1100 - 1700	0,5 - 0,7
Vapocraqueur Elec	TRL 4-5	1267 - 1770	0,5 - 1,1
Vapocraqueur H2	TRL 4	2005 - 2110	0,2 - 0,6
Via Biomasse EtOH	TRL 8	1800 - 2800	-3 - -0,2
Via Biomasse MeOH	TRL 6	1740 - 1740	-2,5 - -1,2
Via CCUS MTO	TRL 3	1300 - 2858	-2,8 - 0,5
Recyclage Chimique	TRL 9	1200 - 1730	-1,4 - 0,8

Fig. 32. Analyse comparative de la bibliographie des différents coûts et émissions de production de monomère (High Valuable Chemicals) Source ⁸⁴

Différents moyens de production du plastique :



NB : Toutes les méthodes de production ne sont pas mentionnées ici, certaines sont incluses dans les procédés catalytiques. Par exemple, la synthèse Fisher-Tropsch n'est pas explicitement abordée dans ce rapport. Ainsi, il existe de nombreux autres processus qui permettent de produire des alcènes et d'autres composés nécessaires à la production de plastiques.

Fig. 33. Différentes voies de production des monomères ^{71 82}

Complexité de la variété de plastique

Il est crucial de comprendre que, même si **tous les plastiques peuvent théoriquement être fabriqués à partir de diverses ressources**, certains polymères se distinguent par une efficacité accrue lors de leur création à partir de ressources spécifiques. Cela est dû au fait que **la fabrication de certains plastiques à partir d'alternatives peut exiger une consommation énergétique significative**. Cette diversité de ressources et d'approches souligne les **multiples facteurs à considérer dans la réduction des émissions de carbone du secteur**. Une gestion efficace des polymères exige

une compréhension de leur complexité et une adaptation aux caractéristiques uniques de chaque type de plastique, en tenant compte de son cycle de vie et de son utilisation. La principale difficulté dans la transition vers des plastiques plus durables réside dans cette complexité. Historiquement, l'industrie a délaissé la ressource biomasse et s'est concentrée sur les produits dérivés du pétrole les plus avantageux. **Bien qu'il soit techniquement faisable de reproduire ces plastiques fossiles avec de nouvelles ressources, cela implique souvent une dépense énergétique conséquente.**

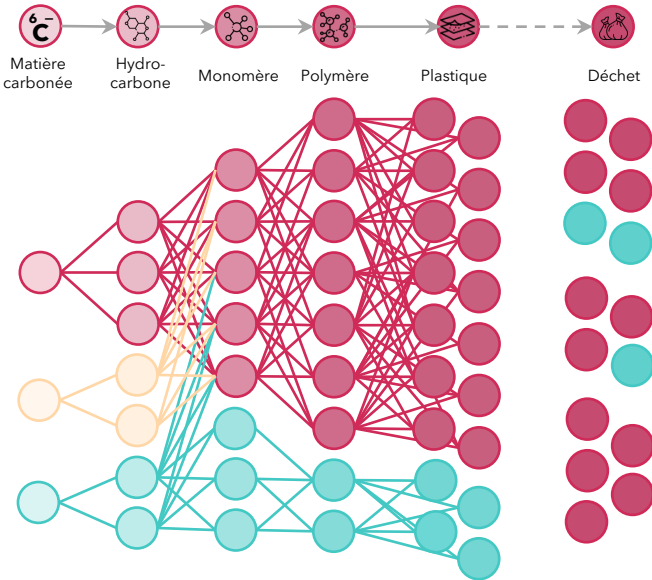


Fig. 34. Illustration de la complexité du secteur du plastique

À chaque étape du cycle de vie, une variété de combinaisons est possible : les monomères peuvent être assemblés de nombreuses manières pour créer des polymères, lesquels peuvent ensuite être combinés avec divers additifs pour obtenir des plastiques aux propriétés distinctes. Cependant, les liaisons entre ces éléments révèlent les transformations requises ; plus une liaison est longue, plus l'énergie nécessaire à sa formation est importante.

Cela souligne les défis liés à cette complexité :

- **Pour le recyclage**, un tri est essentiel afin de minimiser la longueur des cycles de transformation et remonter le moins haut possible.
- **Pour la production**, l'exploitation de nouvelles ressources nécessite davantage de transformations pour obtenir les types de plastiques traditionnels.

Conclusion graphique sur la circularité du plastique

Nous avons examiné diverses stratégies de circularité, incluant le recyclage et les méthodes de production de plastique basées sur la circularité du carbone, mettant en évidence une variété d'approches pour diminuer les émissions de carbone dans le secteur. **Aucune solution ne doit être privilégiée au détriment d'une autre.** En effet,

pour réduire les émissions de carbone, **une multiplication des solutions permet d'éviter la création de tensions sur des secteurs.** L'efficacité réside dans la **diversification et l'intégration harmonieuse des stratégies, permettant ainsi une approche plus adaptée et flexible face aux défis environnementaux.**

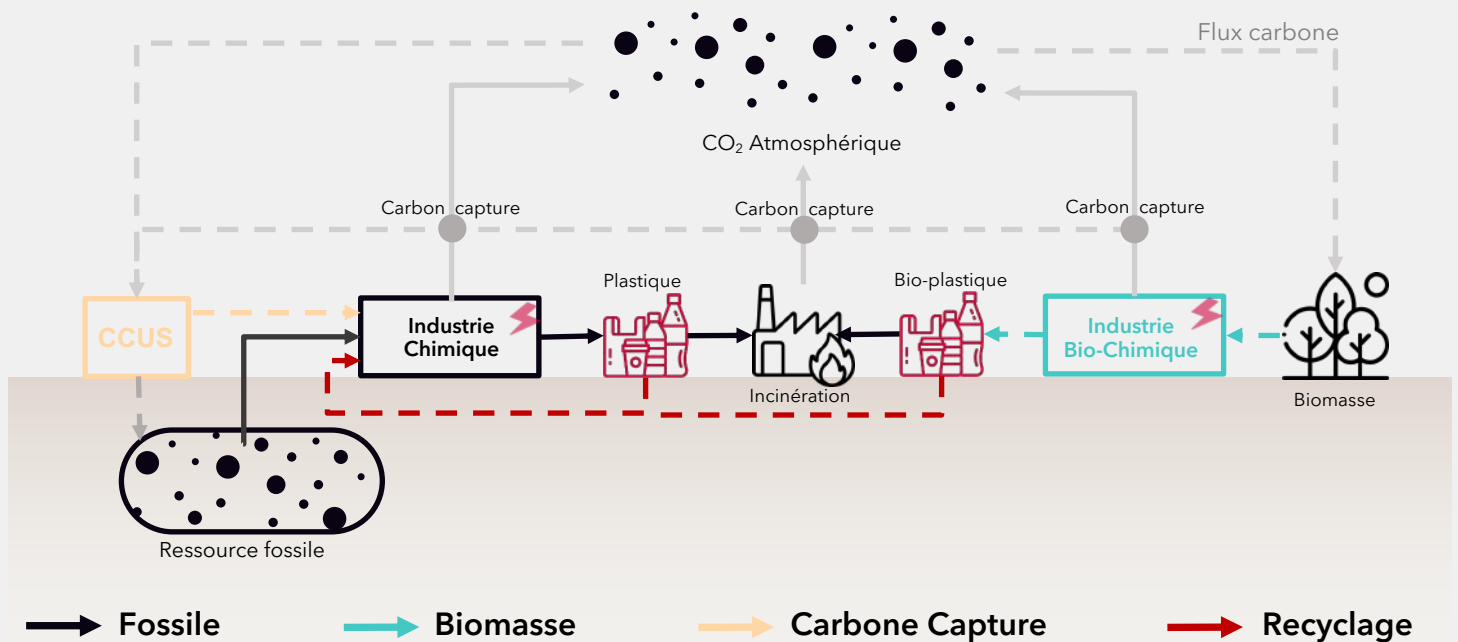


Fig. 35. Illustration des différentes solutions de décarbonations du plastique

Acteurs du secteur

Ce mapping **non exhaustif** présente certains acteurs clés développant de nouvelles technologies dans divers domaines : le recyclage chimique, le rétrofit incluant l'électrification, l'hydrogène et la capture de carbone, la biomasse, et l'utilisation du CO2 (CCU). **Il est notable que les entreprises pétrochimiques, absentes du secteur du recyclage**

mécanique, s'impliquent dans le recyclage chimique. Ce dernier produit notamment de l'huile de pyrolyse, similaire au naphta, domaine où ces entreprises possèdent une expertise. À l'opposé, le secteur des bioplastiques est investi par de nouvelles entreprises.

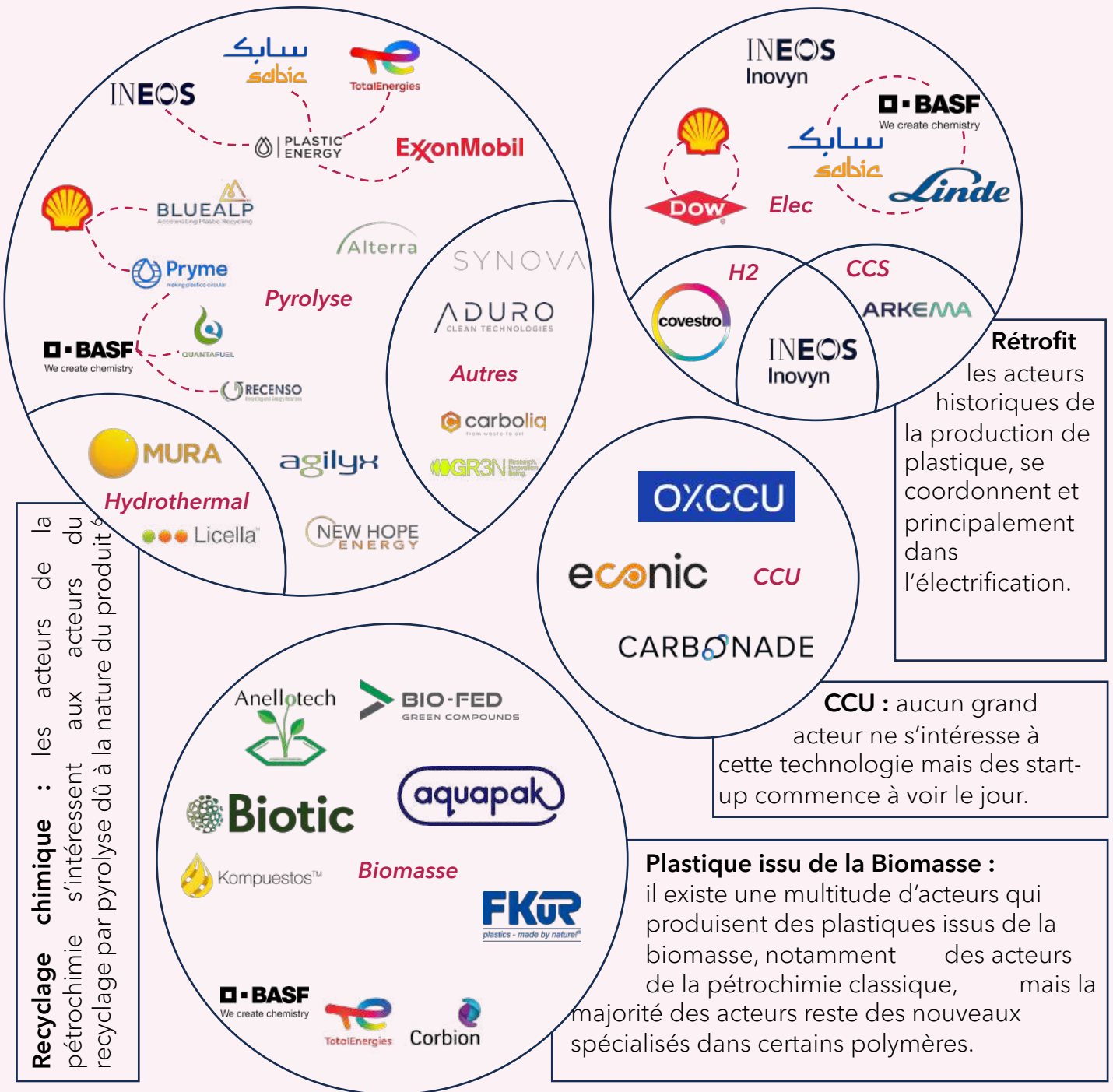


Fig. 36. Mapping des différents acteurs des technologies pour la transition du plastique

Ce mapping n'est pas exhaustif. Pour obtenir des informations plus détaillées sur les entreprises mentionnées, veuillez contacter l'auteur.



07

Ouverture

La transition de notre économie

Mise en exergue par le plastique

Ouverture

Les problèmes du plastique sont à l'image de beaucoup d'autres problèmes de notre économie.

La transition de notre économie

Le modèle économique et industriel actuel apporte un **confort de vie inégalé**, mais **révèle aujourd'hui ses limites**, notamment en raison de son **caractère linéaire**. Ce système qui repose sur l'extraction, la transformation, l'utilisation et le rejet des matières, sous formes de matériaux ou d'énergie, **engendre des conséquences environnementales** préoccupantes notamment dans le cas du carbone. **L'extraction et l'utilisation des ressources fossiles** libèrent le carbone initialement stocké, **contribuant à l'effet de serre et au réchauffement de notre planète**.

Face à ces défis, la transition vers un **modèle économique circulaire** apparaît comme une solution viable pour réduire notre impact sur le climat tout en préservant notre qualité de vie. **Cette circularité se décline en plusieurs niveaux**, les premiers niveaux tels que la **réutilisation et le recyclage**, puis une **circularité plus lointaine via les molécules du carbone** déjà présentes dans l'atmosphère et l'utilisation de capture et d'utilisation du carbone par voie organique ou technologique.

Bien que la faisabilité de ces approches circulaires, qui permettent de transformer les déchets et émissions en ressources, **ces processus de transformation restent très énergivores**. La réussite de la **transition vers une économie circulaire** repose avant tout sur notre **capacité à mobiliser des sources d'énergie renouvelables**, tout en tenant compte des **contraintes matérielles et temporelles** inhérentes à leur déploiement. Pour atténuer ces contraintes, il est pertinent de **diminuer notre consommation**. Les stratégies favorisant la **sobriété, réduisant ainsi la demande en énergie** facilitent une empreinte environnementale plus faible. Elles s'intègrent à l'approche circulaire, nous encourageant à **repenser notre utilisation des ressources** en vue d'une économie durable.

En conclusion, bien que notre système actuel présente de **sérieux défis environnementaux**, les principes de **circularité** offrent un chemin vers la durabilité. **Adopter et innover dans les pratiques circulaires en s'appuyant sur des énergies bas carbone, tout en s'adaptant à l'urgence de la transformation et à ses contraintes temporelles, en combinant la sobriété au levier technologie, est crucial pour minimiser notre impact sur la planète et assurer un avenir durable pour les générations futures.**

Mise en exergue par le plastique

L'exemple du plastique met en lumière les limites de notre modèle économique linéaire. Bien qu'il ait **contribué au développement de nouvelles technologies** et à la **réduction de la mortalité**, sa production, basée sur le pétrole est jumelé à une utilisation éphémère, il se transforme rapidement en déchet. **Son cycle libère du carbone stocké, exacerbant les problèmes environnementaux.**

Notre analyse approfondie sur le plastique révèle **le potentiel de la circularité**. Nous avons d'abord examiné les différentes **boucles de recyclage**, permettant de traiter les déchets plastiques. En outre, nous avons exploré **la circularité carbone**, notamment à travers l'utilisation de plastiques dérivés de la **biomasse** et ceux produits par la **capture du carbone (Power-to-Plastic)**.

Ces alternatives circulaires soulèvent des questions relatives à la **consommation énergétique, l'utilisation des sols** et aux **émissions associées**. Bien que tous les plastiques puissent théoriquement être produits à partir de n'importe quelle source de carbone, **certains polymères sont plus efficacement produits à partir de ressources spécifiques**, réduisant ainsi la consommation énergétique nécessaire. Il apparaît donc **essentiel de privilégier les plus petites boucles de transformation** à chaque fois, et de s'assurer de la disponibilité globale et des potentiels conflits d'usage en ressources et énergie.

La **transition** vers une gestion durable du plastique **exige une connaissance approfondie** de sa complexité et une **stratégie adaptée** aux caractéristiques uniques de chaque type de plastique, selon son cycle de vie et ses applications spécifiques. Cela souligne l'importance d'aborder la problématique du plastique dans toute sa complexité, afin de **naviguer efficacement vers une économie circulaire et respectueuse de l'environnement**. Et faire tout cela le plus rapidement possible.



AUTEURS

Rémi Grimaud

Mines Paris PSL, IHEIE

Zenon Research

grimaud.remi38@gmail.com

Robin Girard

Mines Paris PSL, PERSEE

Zenon Research

www.robingirard.eu

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient
chaleureusement pour la relecture et
les suggestions utiles de :

Adèle Peugeot

Véolia

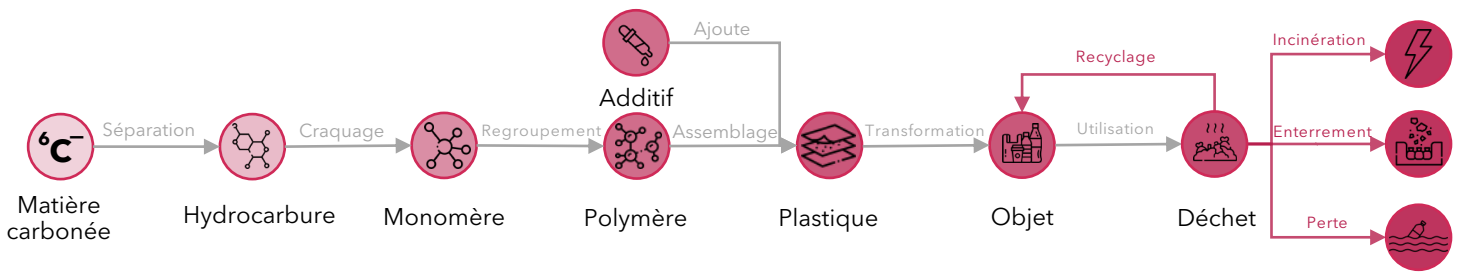
Patrick Navard

Mines Paris PSL, CEMEF

**François de Rochette, Louise Hurel,
Thomas Boigontier**

Mines Paris PSL

Annex 1 - Emissions du plastique



Hypothèse	Facteur d'émissions de Gaz à effet de Serre (tCO ₂ /t polymère)	Source
-----------	--	--------

Amont : de la matière carbonée à l'hydrocarbure

Production Pétrole	0,228	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
Raffinerie	0,34	Tenhunen-Lunkka et al (2022)

Production polymère : Hydrocarbure à Polymère

PP	1,342	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PE-LD	1,412	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PE-HD	1,362	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PVC	1,942	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PUR	5,132	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PET	2,372	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PS/EPS	3,112	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
ABS/SAN	3	Plastics Europe (2015)
PMMA	4	Plastics Europe (2015)
PA	4,5	Plastics Europe (2014)
PC	3,4	Plastics Europe (2019)
Autres thermoplastiques	4	Plastics Europe (2014)
Autre	1,942	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PLA	0,92	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PE	0,9	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PBAR	3,11	Tenhunen-Lunkka et al (2022)

Conversion : Polymère à Plastique

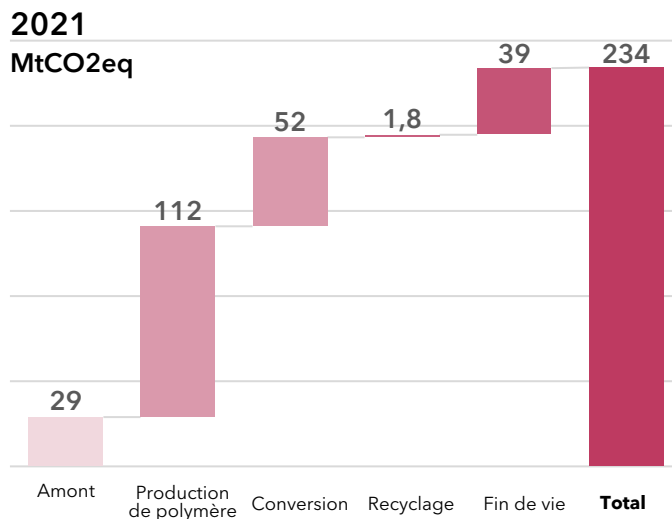
PP	0,94	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PE-LD	1,13	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PE-HD	1,16	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PVC	0,51	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PUR	0,51	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PET	0,94	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PS,EPS	0,51	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PLA	0,51	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
PBAT	0,22	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
Bio-PE	1,13	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
Autres	0,94	Tenhunen-Lunkka et al (2022)

Recyclage : de Déchet à Plastique

Recyclage Mécanique	0,32	Tenhunen-Lunkka et al
Recyclage Chimique	1,4	Reshaping Plastics (2022)

Fin de vie : de Déchet à CO₂...

Incinération	1,73	Tenhunen-Lunkka et al (2022)
Mise en décharge	0,03	Tenhunen-Lunkka et al (2022)



Annex 2 – Bonus Scénarios Français

Les scénarios français

Bien qu'il n'existe pas encore de feuille de route spécifique au secteur du plastique en France, plusieurs scénarios prospectifs s'intéressent à la question de manière plus ou moins exhaustive.



L'ADEME présente 4 scénarios :

Le scénario S1 ("génération frugale") mise sur une forte réduction de la demande en plastique (-57%), permise par une stricte limitation des plastiques aux usages réglementés où aucune alternative de substitution n'est disponible. En termes de circularité, les plastiques sont largement recyclés, principalement par voie mécanique. Seulement 2% de la production provient de nouveaux processus issus de la biomasse, tandis que le reste est produit via les vapocraqueurs classiques, dont 13% sont issus de bio-naphta et le reste du naphta.

En revanche, dans le scénario S4 « Pari réparateur », la demande en plastique diminue elle aussi mais de 18% seulement, le vrac gagne en popularité auprès d'une minorité de consommateurs sensibles à la question environnementale. Les emballages plastiques à usage unique ont disparu en 2040, remplacés par des emballages recyclables et recyclés. En termes de production, seulement 1% de la production provenant de nouveaux processus issus de la biomasse. Cependant, 57% du plastique est produit par bio-naphta, 8% provient du recyclage chimique, et les 35% restants sont issus du naphta.

Dans ces deux scénarios du plastique de source fossile subsiste et la voie du méthanol-to-oléfines (MTO) ne se développe pas. Hors dans leur scénario 3 « technologie verte », 32% du plastique provient du MTO et il n'y a pas de production issue de fossile.



RTE explore moins la question du plastique dans son rapport sur les futurs énergétiques 2050. Les hypothèses se concentrent principalement sur des obligations d'incorporation atteignant 40%, sans précision sur l'inclusion du recyclage chimique. Dans le scénario référence, une réduction de la demande de plastique d'emballage de 50% par rapport à 2019 est envisagée, tandis que cette réduction atteint 70% dans le scénario de sobriété. Cependant, les détails sur la consommation plastique restent limités.



Négawatt mise également sur une réduction de 25% de la consommation de plastique, principalement due à la diminution du secteur de l'emballage. La moitié de cette réduction proviendrait du recyclage, cependant, il est précisé que seul le recyclage mécanique est pris en compte, le recyclage chimique n'étant pas mentionné.



The Shift Project a publié un rapport dédié au secteur de la chimie, incluant le plastique aux côtés des engrais, des solvants et des encres. Pour le plastique, ce rapport mise sur un effort de sobriété, notamment par le biais d'une réglementation des usages plastiques, ce qui entraînerait une baisse de 33% de la demande totale. De plus, il prévoit le développement du recyclage avec une collecte visant 90% en 2050. En ce qui concerne les technologies de rupture, le rapport compte sur l'électrification du vapocraqueur et le recyclage chimique, ce qui permettrait une réduction de 10% des émissions de gaz à effet de serre, sans donner plus de détail.

